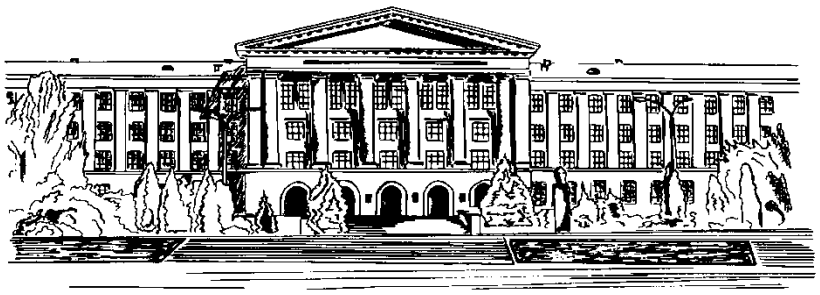
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ДГТУ)

XII международная научно-техническая конференция «Динамика технических систем» «ДТС-2015»

Сборник трудов

(Ростов-на-Дону, 16-17 декабря 2015 г.)



Ростов-на-Дону
2016

УДК 378:001(063)
Д44
Редакционная коллегия:

Месхи Б.Ч. – доктор технических наук, профессор, ректор ДГТУ.
Лукьянов А.Д. – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Автоматизация производственных процессов» (отв. ред.).
Сухинов А.И. - доктор физико-математических наук, профессор, проректор по НИР и ИД ДГТУ
Айзикович М.А. - доктор физико-математических наук, профессор,
Бабичев А.П. – доктор технических наук, профессор.
Бурлакова В.Э. – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Химия».
Заковоротный В.Л. – доктор технических наук, профессор.
Карапетянц А.Н. – доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой «ПОВТиАС».
Лебедев В.А. – доктор технических наук, профессор.
Нейдорф Р.А. - доктор технических наук, профессор.
Рыжкин А.А. – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Инструментальное производство».
Соловьев А.Н. - доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»
Феденко М.А. – руководитель службы экспортного контроля.

Д44 Динамика технических систем «ДТС-2015» [Электронный ресурс]: сборник трудовXIIмеждународной научно-технической конференции (Ростов-на-Дону, 16-17декабря 2015 г.) /ДГТУ; под ред. А.Д. Лукьянова — Ростов н/Д: ДГТУ, 2016. – 432 с.—1 электрон, опт.диск (CD-ROM). — Систем, требования: Pentium 500MHz; 512 Мб; Windows 2000; 128Мб; Adobe Reader 6 и выше. — Загл. с этикетки диска. — 300 экз.

ISBN 978-5-7890-1087-7

В сборник вошли материалы докладов по итогам работы XII международная научно-техническая конференция «Динамика технических систем» «ДТС-2015». Конференция проводилась 16-17декабря 2015 г. в Донском государственном техническом университете и была посвящена обсуждению проблем и перспектив развития научных направлений в области динамики технических систем, теории управления, синергетики и обработки данных. Конференция проводилась при поддержке РФФИ.

УДК 378:001(063)
© ДГТУ, 2016
ISBN 978-5-7890-1087-7

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Рыжкин А.А. Синергетические аспекты управления износостойкостью инструментальных режущих материалов. 9

Рыжкин А.А., Боков А.А., Бурлакова В.Э. Окисление твердых сплавов с модифицированной кобальтовой связкой....11

Алиев М.М., Тороп Ю.А. Влияние полимерсодержащих сред на диссипативные процессы в условиях резания металлов....15

Рубанов В.В. Износостойкость наплавочных материалов на основе железа, никеля и кобальта в тяжелонагруженных парах трения....18

Кохановский В.А., Больших И.В. Фторопластосодержащие покрытия с матрицей холодного отверждения 21

Шульга Г.И., Астахов А.В., Скринников Е.В., Васильев М.А., Васильев Б.Н., Шульга Т.Г. Твердые порошковые смазочные материалы в технологических процессах волочения изделий 23

Илясов В.В. Определение относительного износа инструментальных материалов из первых принципов 27

Рыжкин А.А., Моисеев Д.В. Влияние тонкослойных покрытий на тепловое состояние зоны резания....31

Шучев К.Г., Фоминов Е.В. Вероятностная модель стойкости режущего инструмента при нелинейном накоплении повреждений 34

Боков А.И., Данилевский В.П., Мигура А.В., Тороп Ю.А. Об особенностях микродугового оксидрирования (МДО) на резонансных частотах асимметричного переменного тока 39

Зотов В.В. Многокритериальная задача оптимизации режима многоинструментальной обработки дорогостоящих деталей. 41

Шульга Г.И., Скринников Е.В., Шульга Т.Г., Васильев М.А., Васильев Б.Н. Топокомпозиты для многопереходной вытяжки кузовных деталей автомобилей 43

Климов М.М., Рыжкин А.А., Моисеенко С.А. Выбор оптимальных режимов изнашивания при лезвийной обработке по термодинамическим характеристикам....47

Илясов В.В., Хатламаджян Д.Ю., Ашканов А.В. Перспективы повышения износостойкости инструментальных материалов за счет cn-покрытий, наносимых методом лазерной абляции 51

Рыжкин А.А., Фоминов Е.В., Сигиденко К.Е. Структурно-термодинамические аспекты повышения работоспособности ИРМ. 55

Митрофанов А.А., Чащин Е.А., Балашова С.А., Харахашев А.Х., Климов М.М. Повышение эксплуатационных характеристик газотермических покрытий воздействием непрерывного излучения CO_2 – лазера.....59

Бурлакова В.Э., Дроган Е.Г. Триботехнические возможности водных растворов оксикислот в паре трения бронза – сталь.....62

Дроган Е.Г., Кочергин Е.С., Милов А.А. Исследование взаимодействия атома меди и ее ионов с кислородсодержащими молекулами.....66

Кужаров А.А., Герасина Ю.С., Тищенко А.В., Ломаченко К.А., Солдатов А.В. Влияние размера нанокластеров меди на триботехнические характеристики фрикционного контакта.....69

Кужаров А.А., Герасина Ю.С., Тищенко А.В. Синтез и триботехнические свойства нанокластеров серебра 74

Задошенко Е.Г., Бурлакова В.Э. Трибологические свойства магнитной жидкости.....78

Задошенко Е.Г., Бурлакова В.Э. Исследование противоизносных свойств смазки ЦИАТИМ-201, модифицированнойнаночастицами никеля 82

Хохлов А.В., Любченко С.Н., Кравченко В.В. Использование комплексов f-металлов для регулирования триботехнических свойств металлоплакирующих смазок.....87

Новикова А.А., Петросова Н.А. Синтез фотокаталитически активных наночастиц оксида меди (II) методом соосаждения.....91

Новикова А.А., Илюхин Н.Д. Получение наночастиц восстановленного оксида графита 94

Евстифеев Е.Н., Попов Е.Н. Гидрофобизованные модифицированные лигносульфонаты для брикетного производства.....97

Лукьянов Б.С., Лукьянова М.Б., Комиссарова О.А., Щёкина Ю.А., Муханов Е.Л., Панина А.П. Спироциклические системы как активные элементы молекулярной фотоники.....102

Лукьянов Б.С., Лукьянова М.Б., Комиссарова О.А., Щёкина Ю.А., Муханов Е.Л., Панина А.П. Определение термодинамических параметров термоиндуцированной валентной изомеризации спиропиранов методом ЯМР ^{1}H.....105

Пугачев А.Д., Лукьянова М.Б., Лукьянов Б.С., Муханов Е.Л., Ожогин И.В., Комиссарова О.А. Количественная оценка показателей стабильности золей серебра 109

Соколенко А.И., Скибина Л.М., Бурдина Е.И. Изучение антифрикционных свойств металлополимерных покрытий, полученных методом электроосаждения. 114

Дроган Е.Г., Кочергин Е.С., Милов А.А. Исследование взаимодействия атома меди и ее ионов с азотсодержащими молекулами 118

Петров А.М. Оптимальный угол установки колодок в двухколодочном тормозе одностороннего действия.....121

Братищев А.В. О нульмерных аттракторах при синергетическом управлении динамической системой третьего порядка 126

Иванов А.А., Бржозовский Б.М., Бочкарев П.Ю. Управление реализацией технологических процессов механообработки с учетом динамического состояния производственных систем 132

Калий Д.С., Радионов И.А. Синергетическая система управления двигателем внутреннего сгорания.....139

Синицын А.С., Синицына А.А., Кузьменко А.А. Синергетический синтез нелинейных адаптивных законов управления ветротурбиной.....144

Якименко О.И., Кузьменко А.А. Синергетическое управление движением автономного подводного аппарата в вертикальной плоскости 150

Мартынов В.В., Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Янкин И.Н. Исследование взаимосвязи между устойчивостью плазменного облака и колебаниями технологической установки при низкотемпературном плазменном упрочнении 155

Губанова А.А., Бегун В.Г. Особенности формирования стационарной траектории установившихся периодических движений при фрезеровании 160

Лукьянов А.Д., Онойко Т.С., Бегун В.Г., Верещетин П.П. К вопросу о прецизионном позиционировании маложестких высокоинерциальных заготовок в условиях граничного трения.....166

Быкадор В.С., Костенко Г.Ю., Филатьева Н.А. Исследование математической модели процесса прерывистого точения вала со шпоночным пазом.....170

Фам Дин Тунг, Заковоротный В.Л., Быкадор В.С., Голованёв В.А. Самоорганизация и бифуркации динамической системы обработки металлов резанием 175

Лапшин В.П., Тюняев Р.А., Христофорова В.В. Оценка влияния скорости подачи, на равновесные режимы привода обеспечивающего фрезерование заготовки переменной толщины 180

Быкадор В.С., Бобрешов Р.И. Динамическая диагностика состояния обработки поликристаллическими алмазными инструментами 185

Заковоротный В.Л., Лукьянов А.Д. Управление динамикой обработки на металлорежущих станках. Системный анализ и синтез. 194

Заковоротный В.Л., Лукьянов А.Д., Лобов А.А. Параметрические явления в динамике процесса резания 207

Бабенко Т.С., Курская И.А. Математическое моделирование преобразования траекторий исполнительных элементов станка в траектории формообразующих движений 216

Заковоротный В.Л., Бобрешов Р.И. Оценивание состояния режущих поверхностей поликристаллических алмазных инструментов по сигналу виброакустической эмиссии 227

Туркин И.А., Семко И.А. Синергетический системный синтез управления динамикой сверления глубоких отверстий 240

Чувейко М.В., Носачев С.В., Семко И.А. Математическая модель упругого проскальзывания в контакте колесо-дорога 245

Митрин Б.И., Зеленцов В.Б., Айзикович С.М., Кэ Л.Л. Влияние упругости подложки на термоупругодинамическую неустойчивость скользящего фрикционного контакта тел с покрытием 250

Петров А.Н., Айзикович С.М., Игумнов Л.А. Гранично-элементное моделирование поверхностных волн на пороупругом полупространстве на основе шаговой схемы 255

Садырин Е.В., Ширяева Т.И., Кренев Л.И., Айзикович С.М. Использование наноиндентирования и атомно-силовой микроскопии для исследования механических и микрогеометрических характеристик покрытия TiN, нанесенного методом ионно-плазменного напыления 259

Пожарский Д.А., Артамонова Е.А. Эллиптическая трещина в ортотропном пространстве 264

Бабичев А.П., Вейесса Г.К., Вобу А.Н. Влияние режимов обработки и рабочей среды на радиус кромки роликовых подшипников 268

Анкудимов Ю.П., Садовая И.В., Чернега Ю.Г. Динамическая модель виброударной обработки275

Чукарина И.М., Чаава М.М., Щерба М.Ю., Стельмах А.В. Теоретическое исследование спектров шума цилиндровых шлифовальных деревообрабатывающих станков 279

Бабичев А.П., Глазман Б.С., Веснин В.Н., Вейсса Г.К., Лавренова Т.В. Технологические и организационно-экономические аспекты утилизации изделий сельхозмашиностроения .284

Лебедев В.А., Штынь С.Ю., Кочубей А.А. Оценка предельно - эффективной упрочняемостидеталей динамическими методами ППД.....289

Бабичев А.П., Бирюков Д.Д., Гомцян Г.С. Экспериментальные исследования одностороннего виброволновогонагружения сплошного изогнутого образца 292

Лебедев В.А., Кочубей А.А., Ломовцев А. Моделирование процесса ППД свободнодвижущимися инденторами.....295

Бундур М.С., Пелевин Н.А., Прокопенко В.А. Особенности динамики шпиндельных гидростатических подшипников технологического оборудования 300

Попов М.Е., Эль Дакдуки А. Устойчивость технологических систем обработки деталей методами поверхностного пластического деформирования 305

Попов М.Е., Попов А.М. Система поддержки принятия решения при выборе материала и технологии упрочняющей обработки деталей в интегрированных САПР.....311

Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Садовая И.В.,Исаев А.Г., Гребенкин Р.В. Разработка САПР ТП обработки деталей ппд в гранулированных рабочих средах 317

Хайров Д.А. Управление динамикой механической обработки на основе учета упруго-диссипативных связей в зоне резания 322

Шведова А.С., Голубь Д.И., Раздорский С.А., Руденко А.А. Повышение эффективности технологических процессов обработки динамическими методами поверхностного пластического деформирования.....327

Бабичев А.П., Эссола Д., Вейсса Гутета Кабетаи, Пастухов Ф.А., Вёснин В.Н. Разборка резьбовых соединений виброволновымметодом в ходе восстановления и утилизации изделий машиностроения 334

Алепко А.В., Яковенко Д.М., Наумов И.И. Определение параметров движения схвата параллельного манипулятора с гибкими звеньями под действием на груз внешней возмущающей силы.....340

Somayeh Sadeghi-Kohan , Zainalabedin Navabi . Progressive Age Monitoring in Many-core for Balancing Wear-out of the Cores 346

Mohammad Ebrahimi , Zainalabedin Navabi . A Low-Overhead Sensor for Age Monitoring in FPGAs347

Zainalabedin Navabi. Role of HDLs in Design and Description of Modern Digital Systems 348

Косоглотов А.А., Лазаренко С.В., Горбенко М.А., Лященко З.В., Лосев В.А. Адаптация динамических систем на базе комплексного использования алгоритмов объединенного принципа максимума.....349

Косоглотов А.А., Лазаренко С.В., Горбенко М.А., Лосев В.А.Объединенный принцип максимума в задаче структурного синтеза систем с заданным состоянием на основе функций Крылова354

Рябых Г.Ю., Николенко Г.В., Курень С.Г., Литвин А.В. Математическая обработкаданных по загрязнению атмосферы.....359

Попов А.Н., Радионов И.А. Синергетический синтез алгоритмов комплексной оптимизации тяги подвижного состава.....363

Баранов И.В., Воронин И.В., Соловьев А.Н. Эволюционный алгоритм решения задачи поиска глобального оптимума с естественным критерием останова.....368

Мохсен М.Н. Анализ и обобщение типичных статических и динамических нелинейностей технологических процессов химической и пищевой промышленности.....372

Нейдорф Р.А., Мохсен М.Н. Синтез закона квазиоптимального управления теплообменником с существенной объектно обусловленной связностью переменных технологического состояния 379

Фридрих Р.А., Окунева Н.В., Золотовский А.В. О точности расчета кинематических параметров кривошипно-шатунного привода.....386

Минкин М.С., Куимов Д.Н., Кулинич М.Н. Электромеханическая активация нефти и нефтяных остатков в аппаратах вихревого слоя 392

Лапшин В.П., Кравец В.С. Анализ и синтез методом АКАР системы управления колесного транспортного средства 397

Лукьянов А.Д., Павлов П.П. Моделирование динамических процессов в системе рекуперативной вентиляции с реверсированием потока. 409

Дмитренко А.А., Лукьянов А.Д. Особенности моделирования динамики температурно - деформационных процессов при 3d-печати корпусных деталей из термопластичных пластиков.....415

Тихонов Ан.А., Тихонов А.А., Семенченко И.Ю. Исследования основных технологических параметров процесса гидроабразивной обработки 425

Радин В. В., Феденко М.А. Методика оптимального проектирования контроллеров систем адаптивного управления техпроцессом зернокомбайна 431

УДК 621.9+621.2.082.18

Синергетические аспекты управления износостойкостью инструментальных режущих материалов.

Рыжкин А.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Представлены современные подходы к оценке интенсивности изнашивания инструментальных режущих материалов по теоретической зависимости, полученной на базе уравнения баланса энтропии; обосновано улучшение трибологических характеристик сложно-легированных быстрорежущих сталей и экспериментальных однокарбидных твердых сплавов как высокоэнтропийных материалов; приведены результаты стойкостных обозначений исследований этих сплавов и направление выбора оптимальных режимов резания.

Ключевые слова: режущие материалы, износостойкость, энтропия, высокоэнтропийные режущие материалы.

Abstract. Modern approach to valuation of wear intensity of cutting tool materials, based on theoretical equation which was derived from the balance equation of entropy, is presented; the improvement of tribological characteristics of compositely-alloyed high-speed steels and experimental hard alloys as high-entropy materials is established; the results of resistance studies designations of these alloys and the direction of selection of optimum cutting modes are presented.

Keywords: cutting materials, wear resistance, entropy, high-entropy cutting materials.

На современном этапе развития машиностроения и металлообработки важную роль играет формообразующий инструмент (РИ). В настоящее время определены основные тенденции повышения эксплуатационных характеристик РИ, к числу которых относятся перечисленные в докладе научные и технологические проблемы повышения износостойкости инструментальных режущих материалов (ИРМ).

Пара трения «инструмент-деталь» рассматриваемая как открытая термодинамическая система, поведение которой описывается уравнением баланса энтропии; трение- флуктуационный процесс, причем при эволюции этой системы флуктуации давлений, скоростей, температур не уничтожаются, а затухают, переводя систему трения в состояние с минимальным производством энтропии.

В докладе развивается предложенный автором с сотрудниками энтропийный подход к оценке интенсивности изнашивания теплонагруженных пар трения. Приводится структура аналитической зависимости для оценки интенсивности изнашивания ИРМ, в которой учтено влияние температуры на величину энтропии; выполнена оценка величины доли энергии трения, затрачиваемой на образование частицы износа, а также вклада в производство энтропии вязко-пластических эффектов и окислительных процессов.

$$J = \frac{\left[\int_0^h \lambda\left(\frac{dT}{dx}\cdot\frac{1}{T} - \frac{d^2T}{dx^2}\cdot\frac{1}{T}\right)dx + \delta_{ij}\varepsilon_{ij}\frac{1}{T} + \sum_{i=1}^{i=k}(H_i - TS_i)\frac{1}{T}\frac{dh}{d\tau}\cdot\eta_i\right]}{V\left(S_{298}^0 + \frac{1}{T}\int_{298}^{T} C_p d\tau\right)};$$

где $\frac{dh}{d\tau} = \frac{1}{F\sqrt{2\tau}}\sqrt{\sum_1^k\left(\frac{M_i}{\gamma_i m_i n_i}\right)\cdot\eta_i\cdot\sum_1^k\left(\frac{H_i - TS_i}{m_i n_i \rho_i}\right)\cdot\eta_i}$.

Выполнен анализ влияния диссипативной тепловой функции на износ ИРМ; показано, что температура T и grad T влияют на величину термодинамических неоднородностей и другой механо-физико-химической природы. Приводятся формулы для расчета теплового состояния зоны резания при различных вариантах задания теплового потока.

Излагаются результаты теоретического прогнозирования трибологических и эксплуатационных свойств твердосплавных режущих материалов; показано влияние структуры твердых сплавов (ТС) и композиционных покрытий на их теплофизическую совместимость и электрохимическую устойчивость; установлена функциональная связь между энтропиями как функцией термодинамического состояния материала и величинами абсолютных термо-ЭДС для твердых сплавов и быстрорежущих сталей; обоснованы новые составы экспериментальных твердых сплавов с модифицированной кобальтовой связкой, названные нами высокоэнтропийными (защищены патентом РФ); приводятся результаты сравнительных трибологических исследований этих сплавов и базового сплава ВК8 при точении жаропрочной стали 12Х18Н10Т. Стойкость новых сплавов в 2,4-3,0 раза выше, чем резцов из ВК8.

В заключительной части доклада представлены материалы по выбору оптимальных режимов резания по критерию максимальной стойкости инструмента: теоретические зависимости на основе равенства температур, тепловых потоков и тепловых энтропий на контактных площадках инструмента; разработанные термодинамические критерии оптимизации процесса резания, защищенные патентами РФ.

Библиографический список.

1. Рыжкин А.А. Теплофизические процессы при изнашивании инструментальных режущих материалов: Ростов н/Д, изд. центр ДГТУ, 2005. – 311 с.

2. Рыжкин А.А, Шучев К.Г, Моисеенко С.А, Висторопская Ф.А. Термодинамический подход к расчету окислительного изнашивания твердых сплавов // Вестник РГУПС. – 2012, № 1. – с. 28-38.

3. Рыжкин А.А и др. Оценка работоспособности высокоэнтропийных инструментальных режущих материалов // Трение и износ. – 2016, том 37, № 1, с. 60-69 (в печати).

УДК 621.9 + 621.2.082.18

Окисление твердых сплавов с модифицированной кобальтовой связкой

Рыжкин А.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Боков А.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Бурлакова В.Э., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, vburlakova@donstu.ru

Аннотация. Изучено влияние устойчивости однокарбидных сплавов с модифицированной связкой против высокотемпературной газовой коррозии. Установлено, что увеличение содержания кобальта и молибдена в составе твердого сплава снижает его устойчивость.

Ключевые слова: твердые сплавы, газовая высокотемпературная коррозия, окислительный износ.

Abstract. The influence of heat resistance of hard alloys by modifying their alloy components are studied. Shows the formation of oxide films on the studied samples of the alloys in high-temperature gas corrosion. Found that the increase of the cobalt and molybdenum in the composition of the solid alloy reduces its resistance.

Keywords: solid alloys, high-temperature gas corrosion, oxidative wear.

На современном этапе в практике металлообработки находят широкое применение для резания жаропрочных сталей и сплавов стандартные однокарбидные сплавы ВК, как обеспечивающие наибольшую стойкость по сравнению с двухкарбидными сплавами.

Условия конкретного взаимодействия пары «инструмент-деталь» в процессе резания определяются совокупностью свойств контактируемых тел, а также свойствами внешней среды, где осуществляется трение. Внешняя газовая среда изменяет основные параметры процесса трения — износ, силу трения, шероховатость поверхностей трущихся тел, и обусловливает протекание процесса износа, когда возникающие на контакте тонкопленочные вторичные структуры являются следствием совместного действия диффузионных процессов и химических реакций, активированных деформацией и температурой [1].

Целью работы является изучение устойчивости экспериментальных твердых сплавов к высокотемпературной газовой коррозии и долговечности в условиях резания.

В качестве объектов исследования использованы сплавы типа ВК 8 с добавками легирующих компонентов[1,2].

Для определения жаростойкости [3] испытуемые образцы перед экспериментом зачищали наждачной бумагой, измеряли их геометрические размеры, рассчитывали площадь поверхности. Образцы обезжиривали, промывали, сушили, взвешивали на аналитических весах и помещали в открытые тигли из огнеупорного материала в самую горячую зону, выдерживали при температурах

300 ^{0}C и 500 ^{0}C в течение 0,5, 1 и 4 часов. После охлаждения тигли взвешивали. Привес по массе рассчитывали по разности до и после окисления.

Качественный рентгенофазовый анализ (РФА) проводился на дифрактометре ARL`Xtra (Cu-Kα, λ = 1,5406 Å).

Износостойкость твердых сплавов оценивали по данным относительного износа при продольном точении жаропрочной стали 12Х18Н10Т.

Из результатов высокотемпературной коррозии (рис. 1)следует, что более жаростойким при температуре 300°С является образец сплава 2.21 в ряду группы сплавов 2.1, 2.19, 2.21, содержащих Co, Fe, Cu. Добавление легирующих компонентов Fe/Cu и увеличение содержания Co увеличивает жаростойкость сплавов 2.1 и 2.19 по сравнению с базовым сплавом ВК8 при окислении выше полутора часов.

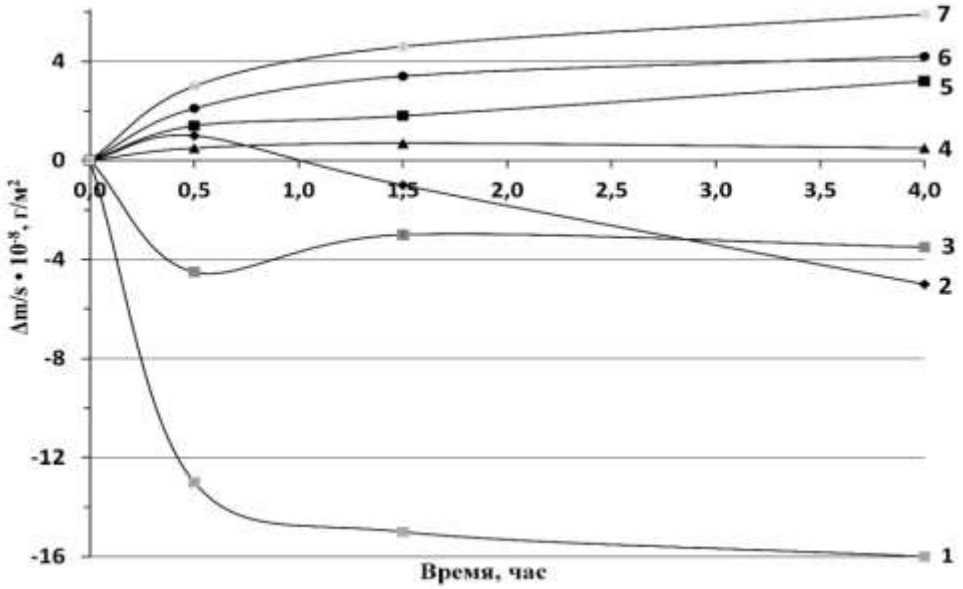


Рис. 1. Кинетические кривые высокотемпературного окисления сплавов: при 300 °С кривые 1 – 2.23 и 2 – 2.22; при 500 °С кривые 3 – 2.23, 4 – 2.22, 5 – 2.21, 6 – 2.1, 7 – 2.19

Жаростойкость исследуемых сплавов снижается в ряду 2.21→2.1→2.19→ВК8. Следует отметить, что образцы 2.22, 2.23, 2.24, содержащие в связке молибден от 1,8 до 5,44 %, не выдерживают высокотемпературного окисления, растрескиваются при температуре выше 300 °С. Повышение температуры до 500 °С обнаруживает несколько большую устойчивость образца 2.19 к газовой коррозии по сравнению со всеми исследованными сплавами.

Увеличение содержания Co (образец 2.21) и Mo в сплавах 2.22, 2.23 и 2.24 приводит к снижению их жаростойкости. При увеличении температуры до 500 °С жаростойкость всех исследованных образцов повышается по сравнению с базовым ВК8, при этом образец 2.19 оказывается наиболее жаростойким из всех изученных сплавов.

Внешний вид окисленных образцов и результаты кинетических исследований свидетельствуют о невысокой стойкости карбида вольфрама к окислению. Увеличение температуры окисления до 500 °С приводит к формированию на сплавах 2.1, 2.19, 2.21 плотных оксидных пленок, на образцах 2.22 – 2.24 образуется темно-зеленый слой окалины с тенденцией отслаивания по краям образцов и раскрашивания, образец сплава ВК8 не выдерживает высокотемпературного окисления: на нем наблюдается образование рыхлого слоя окалины.

С увеличением температуры вследствие летучести фазы MoO_3 резко увеличивается скорость процесса, протекающего с потерей массы. Летучий оксид MoO_3 обусловливает низкую стойкость сплавов WC + Mo к окислению. Причем, увеличение содержание молибдена уменьшает жаростойкость сплавов, рис. 1. При окислении образцов 2.22 – 2.24 в среде кислорода происходит убыль массы, обусловленная, по-видимому, образованием газообразных компонентов реакции – оксидов MoO_3.

Изучаемый твердосплавный материал в общем случае является двухфазным, содержащий карбид WC, при его окислении в условиях резания и трения и при нагреве в печи возможно протекание следующих реакций:

$^1/_2WC + O_2 = {}^1/_2WO_3 + {}^1/_2CO$	ΔH = -988,3КДж/моль	(1)
$^2/_5WC + O_2 = {}^2/_5WO_3 + {}^2/_5CO_2$	ΔH = -988,9КДж/моль	(2)
$^2/_3WC + O_2 = {}^2/_3WO_3 + {}^2/_3C$	ΔH = -1775,7КДж/моль	(3)
$WC + 2O_2 = WO_2 + CO_2$	ΔH = -986,8КДж/моль	(4)

Вероятность протекания реакций окисления (1) – (4), оцененная по величине теплот реакций для различных карбидов, в том числе и для WC [4], свидетельствует о преимущественном протекании реакции. (2).

Согласно результатам РФА основными продуктами окисления модифицированных сплавов после выдержки при 500 °С являются оксид вольфрама (VI) и двойной оксид $CoWO_4$.Третьей фазой, присутствующей на всех рентгенограммах, является карбид вольфрама. Уменьшение соотношения интенсивностей отражений, характерных для фаз WO_3 и WC, в ряду 2.1 → 2.22 → 2.19 свидетельствует о достаточной устойчивости образца 2.19 к окислению, в то время как образец 2.1 подвергается окислению в наибольшей степени. Анализ рентгенограммы сплава ВК8 показывает, что основной фазой на поверхности образца после высокотемпературного окисления является оксид вольфрама (IV), в то время как отражений, характерных для фазы WC, не наблюдается.

Экспериментальные данные привеса образцов при нагреве до температур 300^0С и 500^0С, согласуются со сравнительными результатами интенсивности изнашивания сплавов в условиях резания, табл.1.

Таблица 1

Стойкость твердых сплавов против газовой коррозии

Сплав	Привес массы образцов при нагреве до температур, г		Интенсивность изнашивания $J \cdot 10^{-7}$(V_0=1,25 м/с)
	300 °С	500 °С	
ВК8	$1 \cdot 10^{-4}$	$23 \cdot 10^{-3}$	18,0
2.1	$5 \cdot 10^{-4}$	$1{,}7 \cdot 10^{-3}$	9,0
2.19	$1 \cdot 10^{-4}$	$1{,}1 \cdot 10^{-3}$	6,0
2.21	$4 \cdot 10^{-4}$	$1{,}0 \cdot 10^{-3}$	0,5
2.22	$2 \cdot 10^{-4}$	$0{,}6 \cdot 10^{-3}$	0,45

Таким образом, в результате выполненных исследований установлено, что на всех сплавах при их высокотемпературном окислении образуются преимущественно оксид вольфрама и двойной оксид вольфрама и кобальта.

Большую устойчивость сплавов к газовой высокотемпературной коррозии обеспечивает добавление в кобальтовую связку железа и меди, а также титана и молибдена.

Снижение окислительного вида изнашивания в условиях резания является вероятной причиной повышенной износостойкости этих сплавов.

Библиографический список.

1. Рыжкин А.А. Теплофизические процессы при изнашивании инструментальных режущих материалов. - Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2005 -310 с.

2. Твердый сплав на основе карбида вольфрама (варианты): Пат. На изобретение 2531332: Рос. Федерация: МПК С22С29/08 / А.А. Рыжкин, Б.Ч. Месхи, А.И. Боков и др. // Патентообладатель: ФГБОУ ВПО «Донской гос. техн. ун-т» - 2012128284: заявл.: 4.07.2012: опубл. 20.10.2014. Бюл. № 29.

3. Рыжкин А.А. Трибохимический аспект влияния износостойких покрытий на износ при резании / А.А. Рыжкин, В.В. Зотов, Д.П. Глоба, Ф.А. Висторопская // Вестник ДГТУ. - 2000. - т.10, №6(49). - с. 844-859.

УДК 621.079: 621.9.02

Влияние полимерсодержащих сред на диссипативные процессы в условиях резания металлов

Алиев М.М., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,m_aliev62@mail.ru

Тороп Ю.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Исследуется механизм действия латексных технологических сред и их влияние на износостойкость твердосплавного режущего инструмента при резании металлов и пути управления термодиссипативной способностью трибосистем. Изучен механизм действия СОЖ с полимерсодержащими присадками на тепловое состояние зоны резания в условиях резания металлов.

Ключевые слова: термодинамические процессы, диссипация энергии трения, зона контакта при резании, СОТС, трение; самоорганизация; износостойкость; инструментальные материалы

Abstract. The essential feature of the physical model of heavy-load friction pair ‘tool vs. work-piece’ considered by the authors consists of complicated character of the heat transfer coefficient describing heat loses to environment from free surfaces of the tool. The coefficient is regarded as consisting of two parts: constant part, describing free convection, and variable part, describing forced convection which takes place on local surface areas of the tool submerged into boundary air or coolant flow forced by work-piece movement and other dissipative effects. A heat transfer problem for the model was formulated and solved. Expressions for temperature fields in contacting bodies and the mean contact surface temperature were obtained.

Keywords: thermodynamic processes, dissipation of energy, contact zone in friction, of Lubricant Cooling Liquid (LCL), friction; self-organization; wear resistance; cutting tool materials; .

Одним из важнейших направлений повышения качества технологических систем металлообработки является разработка и применение новых составов смазочно–охлаждающих технологических средств (СОТС). При этом большое значение приобретает вопрос определения рациональной сферы применения СОТС, способов их подачи в зону резания и оптимальных режимов резания для различных конструкций инструмента и сочетаний инструментального и обрабатываемого материалов. Необходимость решения этих задач требует уделить значительное внимание расширению существующих представлении о природе и закономерностях протекания физико–химических процессов, имеющих место в трибосистеме "инструмент - заготовка", с участием "третьего тела" - активной внешней среды.

Работа посвящена исследованию на основе термодинамического подхода влияния жидких СОТС на фрикционные и износные характеристики инструментальных твердых сплавов в условиях контактного взаимодействия при резании конструкционных материалов. Целью работы является оценка эффективности применения активных жидких СОТС, прогнозирование режущих свойств

инструмента и поиск оптимальных режимов резания. В этой связи работа безусловно представляет интерес и является актуальной.

Для оценки эффективности смазочных средств и анализа контактных явлений, происходящих при резании металлов, несомненным является привлечение фундаментальных представлений термодинамики необратимых процессов в открытых системах, обменивающихся энергией и энтропией с окружающей средой, а также комплексность подхода к проблеме контактного взаимодействия, заключающаяся в том, что рассмотрение химических процессов термической деструкции полимерсодержащих СОЖ тесно увязывается с рассмотрением процесса тепло- и массопереноса.

Основные научные результаты, полученные в работе, следующие:

1. Экспериментально исследовано влияние полимерсодержащих СОЖ различного состава на температурное поле и фрикционно–износные характеристики инструментальных твердых сплавов при резании. Установлено наличие четкой корреляционной связи между охлаждающим действием СОЖ, проявляющимся в повышении температурного градиента в контактной зоне инструментального материала, и качественными характеристиками процесса изнашивания. Указанная корреляционная связь проявляется как на макроуровне (длина пластического контакта, усадка стружки, усилия резания), так и на микроуровне (интенсивность изнашивания, флуктуации скорости и давления, приводящие к температурным вспышкам). Для получения дополнительной информации о процессах, происходящих на контактных площадках инструмента, использован комплекс энергоэнтропийных статистических характеристик случайных реализаций флуктуаций параметров трибосистемы, что позволяет проводить оценку упорядоченности системы на макроуровне при переходе к образованию диссипативной структуры в области оптимальных по износостойкости режимов.

2. Проведено экспериментальное исследование кинетики деструкционных процессов, термоокислительной стабильности присадок и компонентов СОЖ методами дифференциально–термического и термогравиметрического анализа. Установлено существование значительных отличий в кинетике термоокислительной деструкции СОЖ с присадками дивинил–стирольного латекса (ДВСЛ) по сравнению с другими сортами охлаждающих жидкостей. Выдвинута гипотеза о том, что повышенная эффективность СОЖ на основе ДВСЛ связана с многостадийной деструкцией полимера и взаимодействием продуктов разложения с поверхностью инструмента, приводящим к образованию термически устойчивых граничных слоев на поверхности инструмента, усиливающих охлаждающее действие за счет эндотермического эффекта (что наблюдается на термограммах деструкций СОЖ) и интенсификации конвективного теплообмена. Это, как источник теплопоглощения приводит к снижению объемных температур в инструментальном материале,

увеличению температурных градиентов и локализации объемного источника тепловыделения к поверхности контакта.

3. На основе рассмотрения комплекса "инструмент - заготовка – внешняя среда" как открытой термодинамической системы разработана методика оценки диссипативных возможностей трибосистемы по данным анализа статистической энтропии, вычисляемой по экспериментально определяемым флуктационным характеристикам (виброскорость и термоЭДС).

4. Предложено также учитывать температурные флуктуации в структуре выражения для оценки максимальной поверхностной температуры с частотой процесса, на которой наблюдается максимальная интенсивность источника тепловыделения.

5. Развитие термодинамических представлений применительно к анализу трения и износа твердых сплавов в условиях резания позволило установить влияние эмульсий применяемой в качестве СОЖ на интенсификацию диссипации энергии контактного взаимодействия из зоны резания, за счет кинетических флуктуационных процессов.

6. Установлена корреляционная связь между интенсивностью изнашивания твердых сплавов и энергоэнтропийного критерия K_S в зависимости от режима трения–резания, дано термодинамическое обоснование изменения этого критерия износа от пути резания и показана возможность его применения для выбора оптимальных режимов резания, оптимального состава СОЖ и материалов пар трения.

Применение в качестве СОЖ эмульсии ДВСЛ увеличивает негэнтропию из внешней среды, локализует максимальные температуры и их флуктуации в тонком поверхностном слое, смещает термодинамический баланс в сторону более высокой структурной упорядоченности в зоне трения, уменьшает конфигурационную энтропию и повышает износостойкость твердых сплавов. Предлагается, что при определенных условиях резания применением активных СОТС можно создать благоприятную энергоэнтропийную обстановку в зоне контакта, которая будет характеризоваться повышенной диссипацией энергии контактного взаимодействия из зоны трения, более интенсивной самоорганизацией контактных процессов, высоким уровнем и темпом роста негэнтропии, что приведет к образованию динамических структур, снижающих трение и изнашивание.

УДК 621.791

Износостойкость наплавочных материалов на основе железа, никеля и кобальта в тяжелонагруженных парах трения

Рубанов В.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Показано, что при трении в пластически деформируемом металле и при трении качения в условиях тяжелонагруженных парах трения механизм износа определяет длительность стадии развития трещин усталости.

Ключевые слова: абразивный износ, схватывание, выкрашивание крупных блоков, микротрещины.

Abstract. It is shown that the friction in plastically deformed metal and rolling friction under conditions of heavily loaded friction pairs, the wear mechanism determines the duration of the stage of development of fatigue cracks.

Keywords: abrasion wear, grasping, chipping of large blocks, microcracks.

Введение. Износостойкость наплавленного слоя, полученного индукционной наплавкой порошковых износостойких материалов в тяжелонагруженных парах трения необходимых для получения высококачественного наплавленного слоя и разработки технологий индукционной наплавки как способов упрочнения быстроизнашивающихся деталей.

Результаты работы. Анализ зависимостей линейного износа от продолжительности испытаний для исследованных наплавочных материалов при трении скольжения о пластически деформируемый металл и при трении качения в условиях тяжелого нагружения (рис. 1) дает возможность заключить, что механизм изнашивания поверхности трения в обоих случаях аналогичен.

Как показали фрактографические и металлографические исследования поверхностного слоя после изнашивания в условиях тяжелого нагружения как при трении скольжения, так и при трении качения, разрушение исследованных наплавочных материалов происходит в результате абразивного износа, схватывания, отслаивания лепестков, выкрашивания структурных составляющих и крупных блоков.

Доэвтектические материалы всех исследованных групп сплавов (ЛГС-2, ВЗК, ПГ-СР2) обладают в данных условиях низкой износостойкостью из-за воздействия абразивных частиц, пластического деформирования поверхности и отслаивания лепестков износа.

Процессы схватывания и абразивного изнашивания существенны при трении скольжения о пластически деформируемый металл.

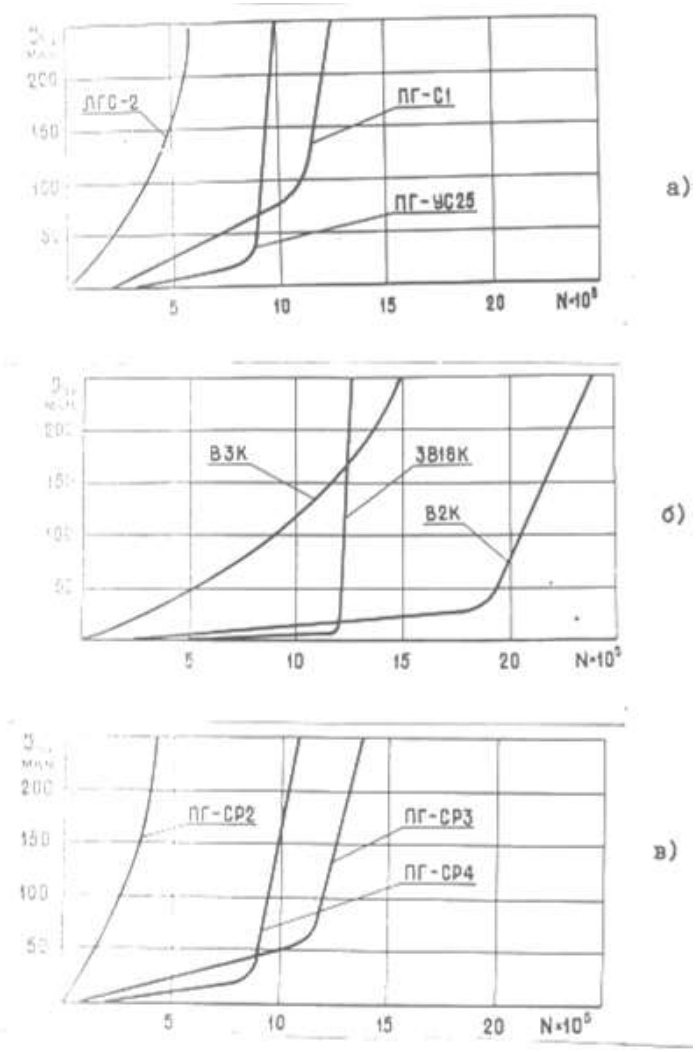


Рис. 1. Зависимость величины линейного износа наплавочных материалов от продолжительности испытаний: а) сплавы на основе железа; б) сплавы на основе кобальта; в) сплавы на основе никеля.

Во всех остальных случаях более износостойкие эвтектические (В2К) и заэвтектические материалы, износостойкость которых определяется периодом начала выкрашивания крупных блоков.

Зарождение микротрещин происходит в связи с неоднородностью структуры наплавленного слоя, наличием шлаковых или неметаллических включений, а также крупных хрупких структурных составляющих. Собственно, стадия зарождения микротрещин практически не обнаруживается при трении скольжения о пластически деформируемый металл, при трении качения эта стадия более продолжительная по причине цикличности нагружения. Зарождению новых микротрещин способствует образование частиц износа.

В процессе изнашивания зарождение и развитие усталостных микротрещин фактически происходит одновременно, когда одни микротрещины развиваются на расшатанных дефектах структуры, начинают зарождаться новые микротрещины.

Стадию развития микротрещин следует считать основной, поскольку она определяет износостойкость материала. После дорастания трещины происходит выкрашивание крупных блоков,

приводящее к образованию грубого рельефа и, когда этот процесс интенсифицируется, наступает третья стадия -стадия катастрофического износа поверхностного слоя.

Таким образом, длительность стадии развития трещин усталости определяет износостойкость наплавочных материалов при трении скольжения о пластически деформируемый металл и при трении качения в условиях тяжелых пар трения.

УДК: 121.822.002

Фторопластосодержащие покрытия с матрицей холодного отверждения

Кохановский В.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Больших И.В., Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. В работе приводятся результаты адгезионных, вязкоупругих и триботехнических исследований композиционных покрытий.

Ключевые слова: антифрикционные полимерные композиты, адгезионная прочность, ползучесть, износ.

Abstract. The results of the experiments research for the adhesion strength, the creep and the friction of the composites covers.

Keyword: antifriction polymeric composite, adhesion strength, creep, wear.

Металлополимерные трибосистемы с покрытиями из фторопластсодержащих композиционных материалов широко применяются в авиационной технике. Однако дальнейшему расширению их применения в других отраслях машиностроения препятствует технология горячего отверждения матричного связующего композита, являющегося также адгезивом для закрепления покрытия на субстрате.

Комплексное изучение всех аспектов рассматриваемой задачи позволило отобрать в качестве матричного адгезива, удовлетворяющего поставленным требованиям, эпоксиднодиановую смолу ЭД-20 и отвердитель полиэтилен-полиамин. В качестве элемента, снижающего генерацию тепла в трибосопряжении выбрано турбинное масло марки Тп22-С.

На первом этапе установлена полная совместимость этих материалов (до 30%, вес.)как при их смешивании, так и после отверждения смолы. Дальнейшие экспериментальные исследования показали, что наличие в эпоксидной матрице капсулированного масла снижает адгезионную прочность покрытий в среднем на 8%, что допустимо.

Реологические свойства эпоксидной композиции с 10% наполнителя в виде турбинного масла существенным образом не отличаются от обычной фенольной матрицы и описываются моделью вида

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \left(\frac{\sigma}{E} - \frac{\sigma}{E_0}\right)\left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right],$$

где σ – сжимающие напряжения, МПа; τ – постоянная времени ползучести, мин;E_0и E – мгновенный и равновесный модули и, МПа; t – время нагружения, мин.

Результаты параметризации модели сведены в таблицу 1.

Таблица1. Параметры модели ползучести (атлас, 10% Тп22-С, Т=22^0С)

Напряжения, МПа	Мгновенный модуль, МПа	Равновесный модуль, МПа	Постоянная ползучести, мин
10	58,8	54,7	10,1
70	399,1	375,2	8,2

Окончательные результаты сравнительных стендовых испытаний сведены в таблицу 2, где приведены величины износа для покрытий с эпоксидной матрицей как с добавлением масла, так и без него.

Таблица 2.Результаты триботехнических испытаний (σ= 40 МПа, V = 0,1м/с)

% Тп22-С	Тол-щина, мм	Время работы, час						
		1	3	5	13	20	30	50
0	0,55	0,017	0,020	0,046	0,050	0,056	0,070	0,091
10	0,56	0,005	0,008	0,011	0,019	0,026	0,031	0,033

Объяснением физической сущности повышения ресурса покрытия более, чем в 2 раза являются следующие обстоятельства:

1 – находясь в толще композита любые жидкости, включая жидкие смазочные материалы, повышают жесткость покрытий,

2 – под действием рабочих нагрузок и в результате изнашивания покрытия смазочный материал проникает в контактную зону и смазывает ее,

3 – смазывая зону контакта смазочный материал блокирует процесс адгезионного переноса фторопласта на контртело, сохраняет его объем, т.е. повышает общий ресурс покрытия.

Вывод. Разработка композиционных полимерных покрытий с эпоксидной матрицей холодного отверждения и добавкой смазочного материала является перспективной.

УДК 621.89

Твердые порошковые смазочные материалы в технологических процессах волочения изделий

Шульга Г.И. , Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

Астахов А.В. , Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

Скринников Е.В. , Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

Васильев М.А. , Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

Васильев Б.Н., Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

Шульга Т.Г. Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия, g.shulga41@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена возможность применения аддитивных технологий при нанесении порошковых смазочных материалов на заготовки перед волочением труб, прутков и проволоки из различных конструкционных сталей. Исследован состав разработанного технологического твердого порошкового смазочного материала ПСМ-2 методом рентгенофлуоресцентной микроскопии анализом на спектрометре ARLQUANT´X.

Ключевые слова: аддитивные технологии, волочение, проволока, пруток, твердый порошковый смазочный материал, спектрометр.

Abstract. The possibility of additive manufacturing in putting lubricants on the rods before drawing pipes rods and wire made of different structural steels, has been considered. The composition of technological solid power lubricant ПСМ-2, developed by the method of X-ray fluorescent microscopy, by the analysis on the spectrometer ARL QUANT`X has been investigated.

Keywords: additive manufacturing, drawing, wire, rot, solid lubricant, spectrometer.

В современном мировом машиностроении активно осваиваются аддитивные технологии, основанные на применении новых материалов, информационных технологий и автоматизации производственных процессов [1]. Мировой рынок аддитивных технологий растет и к 2017 году достигнет до 6 млрд долларов, а к 2020 году до 10,8 млрд.

Традиционные машиностроительные технологии являются «вычитающими», т.е. необходимый размер деталей достигается механической обработкой путем снятия припуска с заготовки или уменьшением размера заготовки в результате давления. Аддитивные технология являются «добавляющими», т.е. в процессе изготовления детали происходит послойное добавление материала до необходимых размеров изделия. Аддитивными являются лишь технологии, которые создают объект послойно на основе трехмерной компьютерной модели.

Технологическими направлениями реализации аддитивных технологий являются: селективное лазерное спекание керамических, полимерных материалов, металлических порошков, электронно-лучевое спекание металлических материалов, прямое нанесение порошковых материалов, применяемое при восстановлении (ремонте) единичных деталей сложной конфигурации.

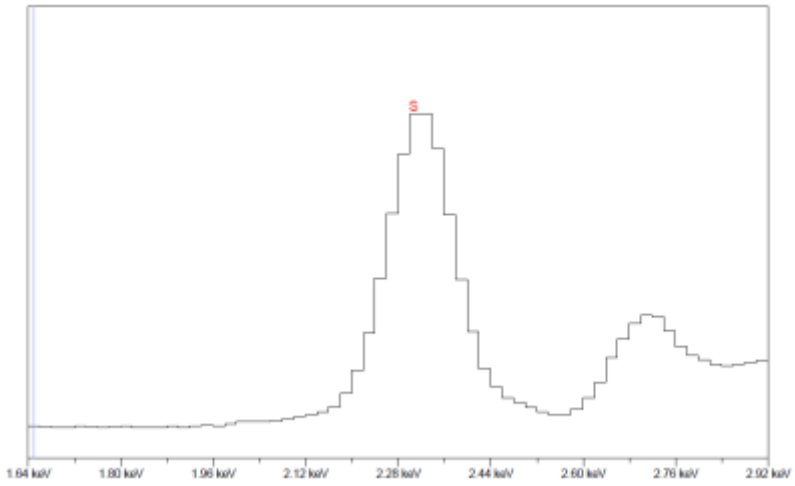
Прямое послойное нанесение порошковых материалов может быть использовано в технологических процессах волочения труб, прутков, проволоки из труднодеформируемых материалов при получении на поверхности заготовки многослойных композиционных антифрикционных покрытий.

Проанализированы составы технологических смазочных средств (ТСС): технологических жидких, твердых смазочных материалов, подсмазочных и смазочных покрытий, применяемых при волочении труб, прутков, проволоки из различных конструкционных материалов [1-5].

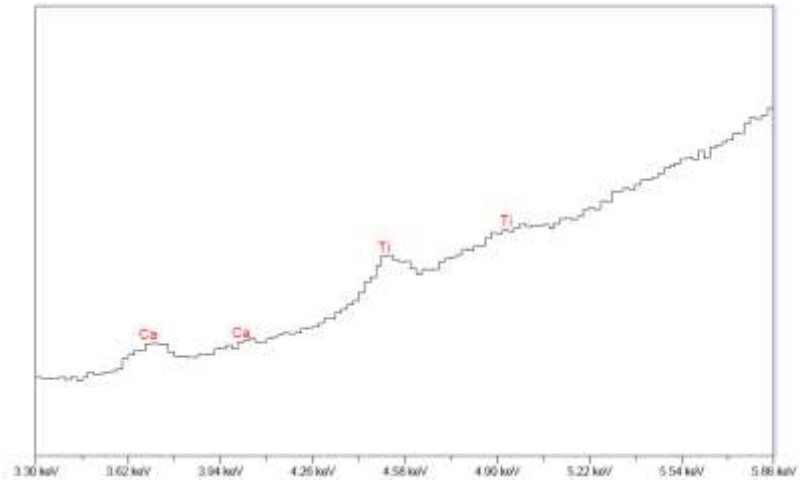
Традиционные технологии не обеспечивают на заготовках покрытий с высокой точностью, оперативного получения многослойных композиционных технологических покрытий с заданными свойствами. Для промышленности представляет интерес разработка порошковых твердых смазочных материалов, используемых для их нанесения на заготовки аддитивных технологий при волочении труб, прутков, проволоки из труднообрабатываемых материалов, обладающих высокими смазочными свойствами, обеспечивающих высокое качество поверхности изделий, легко удаляемых водными или щелочными растворами.

В ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова разработаны твердые технологические порошковые смазочные материалы на основе ПСМ-1, ПСМ-2, ПСМ-2М, содержащие фрактальные нанокластеры [3-5], для волочения труб, прутков и проволоки из углеродистых и легированных сталей. Данные смазочные материалы в производственных условиях при волочении прутков из углеродистых и легированных сталей показали положительные результаты.

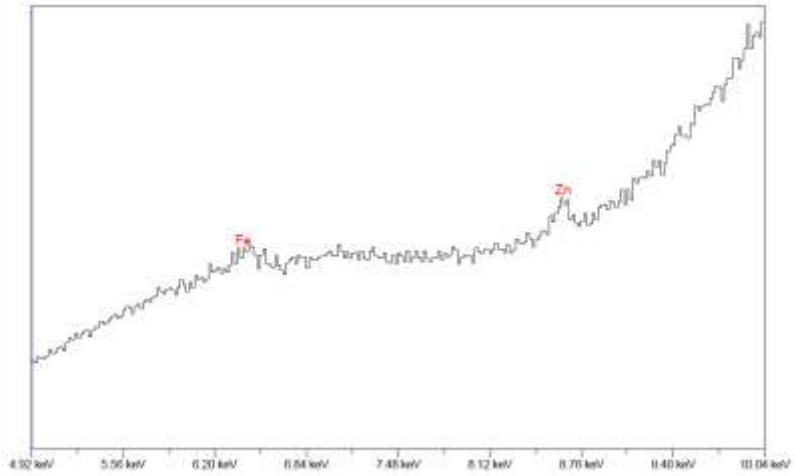
Для исследования механизма смазочного действия состав твердого порошкового технологического смазочного материала ПСМ-2 исследовали на энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре ARL QUANT´X на содержание 79 элементов [5, 6]. Исследования проводили в ЦКП «Нанотехнологии» НИИ Нанотехнологий и новых материалов ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова. На рис. а, в, с приведены результаты исследований состава технологического твердого порошкового смазочного материала ПСМ-2 рентгенофлуоресцентным анализом на спектрометре ARL QUANT´X.Установлено наличие в твердом смазочном материале следующих элементов:S,Ca,Ti,Fe,Zn.



a)



b)



c)

Рис. 1 – Граф рентгенофлуоресцентного анализа материала ПСМ-2: a) режим LowZa, напряжение на трубке 4 кВ, ток – 1.98 мА, первичное излучение – без фильтра, b) режим LowZb, напряжение на трубке 8 кВ, ток – 1.98 мА, первичное излучение – целлюлозный фильтр; c) режим MidZa, напряжение на трубке 16 кВ, ток – 1.98 мА, первичное излучение – тонкий палладиевый фильтр.

Таким образом в твердом технологическом порошковом смазочном материале ПСМ-2 обнаружено наличие следовых количеств различных элементов, которые в комплексе могут

оказывать влияние на механизм его смазочного действия. Областью дальнейшего исследования является изучение влияния количественного состава ПСМ-2 на механизм процессов волочения труб, прутков и проволоки из различных конструкционных материалов, а также возможности использования аддитивных технологий прямого нанесения на заготовки для получения многослойных композиционных антифрикционных покрытий с заданными свойствами.

Библиографический список.

1. http://konstruktor.net/podrobnee-det/iterns/addivnye-texnologii-v-rossijskoj-promyshiennosti.htm/

2. Брейтуэйт Е.Р. Твердые смазочные материалы и антифрикционные покрытия. Под ред. д.т.н. В.В.Синицына. Пер.с англ.С.Д. Клюшнева. – М.: Химия,1967. – 320 с.

3. Шульга Г.И., Скринников Е.В., Шульга Т.Г. др. Твердые слоистые смазочные материалы// Проблемы синергетики в трибологии, трибоэлектрохимии, материаловедении и мехатронике. Матер.XIIIМеждунар.научн.-практ. конф.19 нояб.2013 г./ Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) имени М.И.Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2013. – С.40-50.

4.. Шульга Г.И. Улучшение качества поверхности применением функциональных водорастворимых покрытий, содержащих фрактальные нанокластеры //Качество и жизнь 2014. – №1.–С.56-61.

5. Шульга Г.И., Астахов А.В., Скринников Е.В., Васильев М.А., Васильев Б.Н. Исследование состава технологического твердого порошкового смазочного материала ПСМ-2 // Новые материалы и технологии их получения: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. г. Новочеркасск, 15 октября 2014 г./Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ),2014 – С.13-18.

6. Шабалин Е.И., Богачева И.Ю., Шабалина Ю.В. Особенности бесстандартного анализа оксидов легких элементов с помощью программы UNIQANT http://wwwsworld.com.ua/index.php/ru/conference/the-conferences/archives/archchives-of-individual-coferences/march-2014.

УДК 620.178.162.44

Определение относительного износа инструментальных материалов из первых принципов

Илясов В.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Предложен метод расчета относительного абразивного износа из первых принципов. Результаты расчетов сопоставляются с экспериментов и другими оценками.

Ключевые слова: абразивный износ, относительная износостойкость, метод расчета, из первых принципов.

Abstract. Method of account relative abrasive wear from the first principles is offered. The results of accounts are compared from experiments and other estimations.

Key words: abrasive wear, relative wear resistance, method of account, first principles study.

Мониторинг состояния проблемы оценки износа инструментальных материалов показал, что наиболее характерным является механический износ поверхностей, характеризующийся потерей размеров и массы пар трения, который проявляется при износе прессового и режущего инструмента, насосных штоков, деталей горнодобывающей и землеройной техники и т.д. Наименее изучен абразивный и эрозионный износ поверхностей. В аналитических методах расчёта показателей износостойкости обычно отражены определенные физические модели изнашивания [1]. В данном докладе рассматривается механический износ поверхностей с потерей размеров и массы эксплуатируемых изделий, в частности, абразивный износ, который проявляется в трибосистемах с равномерной интенсивностью во всем диапазоне температур в зоне контакта [2].

В данном докладе предложена физическая модель абразивного износа, построенная на основе эмпирической зависимости Хрущова М.М. $I_{rel} = b \cdot H$ [3] и соотношения Гао [4,5] для определения из первых принципов твердости соединения

$$H = \left[\prod^{i} \left(H_j^i \right)^{n^i} \right]^{1/\sum n^i},$$

где H, H_j^i - твердость соединения и твердость i-го типа связи соответственно, n^i - перекрытие зарядов в связи типа Me-C, определяемое по методу Милликена [6]. Данная процедура предполагает квантово-механический расчет электронной структуры, определения парциальных и эффективных зарядов на атомах соединения, типов и количества связей, длины связей, степени перекрытия электронных орбиталей атомов в соединении.

Аналитическая зависимость, связывающая относительную износостойкость с характеристиками электронной структуры, может быть представлена в следующем виде

$$I_{rel} = b \cdot \left[\prod_i^i \left(740\, p^i \left(\frac{\left(d^i\right)^3}{\sum_j \left[\left(d^j\right)^3 N_b^j \right]} \right)^{-\left(5/3\right)} \right)^{n^i} \right]^{1/\sum n^i},$$

где p^i - перекрытие орбиталей i-го типа связи, d^i - длина связи, N_b^j - плотность направленных j-связей, b - размерный коэффициент пропорциональности.

Для тестирования данной методики были выполненные оценки относительной износостойкости кристаллографических объектов, представленные в табл. 1. Анализ данных в табл. 1, позволяет отметить, что величина относительной износостойкости, например, карбида вольфрама (353,52) превышает на 4 % величину относительной износостойкости (339,026), полученную по ранее предложенной авторами работ методике [1,7]. Причина этого различия, возможно, обусловлена различием длин C-W-связи (см. табл. 1), которые использованы в расчетах. Результаты настоящего расчета износостойкости карбида вольфрама хорошо согласуются с оценкой Хрущова М.М. ($I_{отн}$ = 330.7 при твёрдости 24.696 ГПа [3]) и величина различия составляет 6,5 %.

Следует отметить экстремально высокие значения относительной износостойкости алмаза (1253,38) и кубического нитрида бора (863,71), которые обычно выделяются в отдельный класс сверхтвердых материалов [9]. Заслуживают интерес материаловедов соединения, для которых получены значения относительной износостойкости выше значений 400: BP и β-Si_3N_4.(см. табл. 1) Особенно притягателен нитрид β-Si_3N_4, который является кристаллографическим аналогом нитрида углерода – перспективного материала для покрытий инструментального материала.

Развитый выше подход был использован для оценки относительной износостойкости широкого класса соединений, в частности всех карбо-нитридных фаз, составляющих основу инструментальных твердых сплавов и не противоречит экспериментальным данным и физическим представлениям. Следует отметить, что данная методика может быть использована для оценки относительной износостойкости металломатричных композиционных материалов, составленных из карбидных и нитридных фаз. Значения относительной износостойкости композита в целом определяется как сумма парциальных износостойкостей отдельных фаз, нормированных на количественное содержание фаз в композите.

Таблица 1. Параметры расчёта, твёрдость и относительная износостойкость карбида вольфрама, карбидов переходных металлов, алмаза, кубического нитрида бора и корунда

Фаза	Тип связи	Длина связи, Å	Перекрытие орбиталей по Милликену	Число связей	Твердость, ГПа	Относительная износостойкость, I_{rel}
WC	C-W	2,197	-	-	26,4[4] 30,24*[4]	353,52
WC	C-W	2,220	-	-	24,182 [7] 24,696*[3]	339,026 [7] 330,7*[3]
TiC	C-Ti	2,167	0,82	12	25,0[8]	334,77
VC	C-V	2,082	0,77	12	28,6[8]	382,98
ZrC	C-Zr	2,356	0,78	12	15,6[8]	208,90
NbC	C-Nb	2,242	0,76	12	19,5[8]	261,12
TaC	C-Ta	2,284	0,91	12	21,3[8]	285,23
алмаз	C-C	1,554	-	-	93,6 [4] 96*±5 [4]	1253,38
c-BN	B-N	1,568	-	-	64,5[4] 63*±5 [4]	863,71
Al_2O_3	O-Al	1,900	-	-	20,6[4] 20*±2[4]	275,85
AlN	N-Al	1,901	-	-	21,7 [4] 18*[4]	290,58
BP	P-B	1,966	-	-	31,2 [4] 33*±2[4]	417,79
β-Si_3N_4	N-Si	1,734	-	-	30,3 [4] 30*±2 [4]	405,74

* - эксперимент

Таким образом, применение описанной выше аналитической модели взаимосвязи физических свойств с износостойкостью позволяет выполнять оценки характеристик износостойкости для широкого класса инструментальных материалов.

Библиографический список.

1. Рыжкин, А.А. О связи между износостойкостью и физическими свойствами инструментальных материалов/А.А. Рыжкин, В.В. Илясов // Вестник машиностроения. - 2000. - № 12. – С. 32-40.

2. Vierrege, G. Zerspanung der Eisenwerkstoffe.-Verlag Stahleisen.-2. Auflage.- Düsseldorf, 1970, s. 81-83.

3. Хрущов, М.М. Закономерности абразивного изнашивания // Износостойкость. -М.: Наука, 1975. - С. 5-28.

4. Gao, F.M. Hardness of Covalent Crystals / F.M. Gao, J.L. He, E.D. Wu et al. // Phys.Rev.Lett. - 2003. - Vol. 91. - P. 015502.

5. Zhang, X.H. Electronic structure, elasticity and hardness of diborides of zirconium and hafnium: First principles calculations / X.H. Zhang, X.G. Luo, J.C. Han et al. //Comput. Mater. Sci. – 2008. – Vol. 44. – P.411-421.

6. Xiao, B.A comparative study of Cr_7C_3, Fe_3C and Fe_2B in cast iron both from ab initio calculations and experiments / B. Xiao, J.D. Xing, J. Feng et al.// J. Phys. D : Appl. Phys. – 2009. – Vol. 42. – P. 115415-115431.

7. Илясов, В.В. Физическая модель износостойкости металломатричных композиционных материалов / В.В. Илясов, А.А. Рыжкин, А.В Илясов // Вестник ДГТУ. – 2008. - Т. 8, № 2. - С. 31-36.

8. Liu, Yang Zhen. First principles study the stability and mechanical properties of MC (M = Ti, V, Zr, Nb, Hf and Ta) compounds / Liu Yang Zhen et al. // J. Alloys Compounds. – 2014. – Vol. 582. – P. 500-504.

9. Илясов, В.В. Сверхтвердые материалы на основе кубического нитрида бора. Физические основы синтеза. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007. – 148 с.

УДК 621.9

Влияние тонкослойных покрытий на тепловое состояние зоны резания

Рыжкин А.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Моисеев Д.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Выполнен расчет температур контакта при трении для стержневой модели, когда однослойные покрытия сохраняются на контакте; найдено, что для различных пар «твердый сплав-обрабатываемый материал» снижение температур обеспечивается покрытиями TiN, ZrN, AlN.

Ключевые слова: износостойкие покрытия, температура контакта, стержневая модель.

Abstract. The calculation of contact temperatures during friction for the beam model, when single-layer coatings are saved, is performed; it is found that for various pairs of "solid alloy-the processed material" the reduction of the temperatures is provided by coatings TiN, ZrN, AlN.

Keywords: wear-resistant coatings, core thermal model, contact temperature.

Одним из направлений повышения стойкости режущего инструмента и надежности инструментальных наладок является применение тонкослойных износостойких покрытий различного состава, которые, как известно [1], уменьшают силы и температуры резания, характеристики контактных процессов (размеры контактных площадок, характеристики деформации срезаемого слоя и др.), а также тормозят протекание процессов, увеличивающих износ инструмента: диффузия, окисление, схватывание и др.

Известно, что тонкослойные покрытия могут изменять тепловое, точнее, термодинамическое состояние инструментального материала при резании, оказывать прямое, косвенное или комбинированное действие. Например, если покрытие сохраняется на контактных площадках инструмента, то в силу их высокой антифрикционности они должны снижать температуру на контактных площадках.

Решалась тепловая контактная задача с однослойным покрытием для стержневой модели в предположении, что покрытие на контакте сохраняется (рис. 1).

Для зоны $0 \le x \le \Delta_n$ стационарное уравнение теплопроводности с граничными условиями:

$$\frac{\partial^2 T_0(x)}{\partial x^2} = 0\,,\ \frac{\partial T_0(x)}{\partial x}\Big|_{x=0} = \frac{(1-\alpha)q}{\lambda_П},\ \ T_0(x)\big|_{x=\Delta_П} = T_П \quad (1),$$

а для зоны $\Delta_n \le x \le \infty$ учитывали теплообмен стержня со средой: $\frac{\partial^2 T_1(x)}{\partial x^2} - m_1 T_1(x) = 0$,

$\frac{\partial T_n(x)}{\partial x}|_{x=\infty} = 0$, $\lambda_П \frac{\partial T_0(x)}{\partial x} = \lambda_1 \frac{\partial T_1(x)}{\partial x}$ (2).

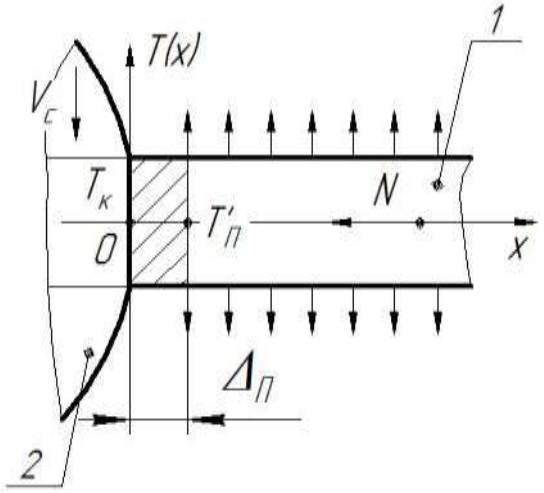


Рис. 1 Модель пары трения с однослойным покрытием толщиной $\Delta_П$

В результате получили зависимость для расчета температуры контакта: $T_к = (1-\alpha) q (\frac{\Delta_П}{\lambda_П} + \frac{1}{\lambda_1 m_1})$ (3), где α – коэффициент распределения тепловых потоков между трущимися телами, равен: $\alpha = \frac{\frac{\Delta_П}{\lambda_П} + \frac{1}{\lambda_1 m_1}}{1{,}13 \frac{\sqrt{\tau}}{\sqrt{\lambda_2 c_2 \rho_2}} + (\frac{\Delta_П}{\lambda_П} + \frac{1}{\lambda_1 m_1})}$ (4)

Задаваясь нормальным давление N=100$н$ при различных скоростях трения, указанных в Табл. 1, рассчитывали плотности тепловых потоков q, принимая коэффициент трения для карбидов, оксидов и нитридов, рассчитали температуры контакта.

Оказалось:

1. Независимо от сочетаний пар «твердый сплав - обрабатываемый материал», покрытие *TiC* (по сравнению с базовым сплавом Т15К6 или ВК8) обеспечивает снижение температуры контакта в 1,7-2,0 раза, TiN – на 14-27%, ZrN – на 27-36%, AlN – на 17-27%.

2. Из оксидов при трении по жаропрочной стали 12Х18Н10Т наиболее эффективны покрытия ZrO_2; снижение $T_к$ по сравнению с Т15К6 и ВК8 составляет 40-52% соответственно.

3. Тонкослойные покрытия из карбидов, нитридов и оксидов, наносимые на базовые твердые сплавы, могут оказать прямое влияние на процесс трения при резании, снижение температуры контакта в общем случае в 1,14-2,03 раза, что должно обеспечить снижение и интенсивности изнашивания [1].

4. Наибольший эффект применения покрытий проявляется при трении по жаропрочной стали 12Х18Н10Т.

Таблица 1

Характеристики теплового состояния зоны контакта при учете прямого влияния покрытий.

Тип покрытия	Параметры теплового состояния для пар					
	Т15К6-Ст45 V=1,2 м/с		Т15К6-12Х18Н10Т *V*=1,7 м/с		ВК8-12Х18Н10Т V=2,0м/с	
	$q_F \cdot 10^6$, Вт/м^2	$T_к$, ºС	$q_F \cdot 10^6$, Вт/м^2	$T_к$, ºС	$q_F \cdot 10^6$, Вт/м^2	$T_к$, ºС
WC	64	98	114	428	150	490
TiC	36,6	56	65,1	245	85,7	262
ZrC	60	91	114	429	-	-
TiN	54,9	84	97,7	368	128	419
ZrN	59,4	91	89,6	337	119	390
AlN	54,8	82	97,7	365	-	-
TiO_2	68,6	105	97,7	365	129	422
ZrO_2	50,3	77	81,4	306	107	350
Al_2O_3	68,6	105	325,7	320	-	-
ВК8	-	-	-	-	161	531
Т15К6	64	96	114	429	-	-

В докладе приводятся результаты изменения характеристик процесса резания при обработке стали 45 твердым сплавом Т15К6 при разных подачах и постоянной глубине резания. В результате наиболее эффективным оказалось покрытие *AlN+TiN*.

Библиографический список.

1. Рыжкин А.А. Теплофизические процессы при изнашивании инструментальных режущих материалов/ А.А. Рыжкин.—Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2005.—311с.

2. Рыжкин А.А. Обработка материалов резанием / А.А. Рыжкин, К.Г. Шучев, М.М. Климов.— Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2007.—419с.

3. Табаков В.П. Многослойные износостойкие покрытия для токарных резьбовых резцов/ В.П. Табаков, Д.И. Сагитов// Технология машиностроения, 2013.— №6.— С. 21-26.

УДК 621.891:621.89

Вероятностная модель стойкости режущего инструмента при нелинейном накоплении повреждений

Шучев К.Г., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,cshuchev53@mail.ru

Фоминов Е.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Рассмотрены методы статистического анализа процесса изнашивания режущего инструмента и элементов пар трения при нелинейном накоплении износных повреждений на основе использования известных моделей надежности и законов распределения ресурсов трибосопряжений.

Ключевые слова: трение, изнашивание, законы распределения ресурса, статистический анализ.

Abstract. Methods of statistical analysis of the wear processes of cutting tools and friction pair elements based on known patterns of resource distribution and reliability of tribological joints in case of nonlinear wear damages accumulation are considered.

Keywords: friction, wear, resource distribution laws, statistical analysis.

Введение. Предполагается, что изнашиваемая контактная поверхность лезвия инструмента (элемента пары трения) покрыта совокупностью хаотически расположенных пятен контакта (единичных очагов поверхностного разрушения). Это динамическое образование: каждое из пятен контакта возникает, существует в пассивном (или «холодном») состоянии в течение некоторого ограниченного времени, затем активируется как единичный очаг поверхностного разрушения («горячее» состояние) и существует в этом качестве в течение ограниченного времени θ, которое рассматривается как непрерывная случайная величина, характеризуемая определенной функцией плотности распределения, а затем разрушается.

В рамках рассматриваемой модели ранее были выделены три варианта сценариев протекания процесса поверхностного разрушения элемента пары трения /1/:

Вид А (наихудший сценарий протекания процесса поверхностного разрушения). В этом случае, соответствующем **N** = 1 (**N**– число последовательных актов разрушения единичных пятен контакта или пакетов пятен до потери работоспособности трибосопряжения), элемент достигает предельного состояния в результате единичного акта разрушения макромасштаба (сколы, поломки, схватывание и т.п.). Ресурс трибосопряжения распределен по экспоненциальному закону, в общем случае двухпараметрическому, который кроме параметра масштаба λ (интенсивность отказов) имеет параметр временного сдвига γ, который физически соответствует минимальному времени, необходимому для активации процесса разрушения макромасштаба:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda(t-\gamma)} = \frac{1}{\bar{\theta}} e^{-\frac{t-\gamma}{\bar{\theta}}}, \qquad (1)$$

где $\bar{\theta} = M\theta$ - среднее время существования единичного пятна контакта в «горячем» состоянии (математическое ожидание случайной величины θ);

$\lambda = \frac{1}{\bar{\theta}}$ - интенсивность отказов единичного пятна контакта, находящегося в «горячем» состоянии (параметр масштаба).

Вид В (идеальный сценарий протекания процесса поверхностного разрушения). В этом случае, соответствующем $N \to \infty$, ресурсный отказ является следствием постепенного протекания процесса накопления повреждений микромасштаба до критического уровня, соответствующего утрате работоспособности трибосопряжения. Закон распределения ресурса при линейном накоплении повреждений во времени является нормальным с функцией плотности распределения (отметим, что в этой формуле $\bar{\theta} = M\theta$ является параметром сдвига):

$$f(t) = n(t;\bar{\theta};\sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} e^{-\frac{(t-\bar{\theta})^2}{2\sigma^2}}, \qquad (2)$$

где **σ** - среднее квадратическое отклонение времени существования единичного пятна контакта в «горячем» состоянии (параметр масштаба).

Вид С (промежуточный сценарий протекания процесса поверхностного разрушения). В этом случае, соответствующем **N**> 1 (чем больше, тем лучше) мы показали, что модель резервированного звена, принятая нами за основу описания коллективного поведения единичных очагов поверхностного разрушения, распределенных на поверхности контакта, приводит к гамма-распределению ресурса трибосопряжения. При этом нормированная интегральная функция гамма-распределения ресурса имеет вид

$$H(y) = \int_0^y h(z)\ dz = \int_0^y \frac{z^{N-1}}{\Gamma(N)}\ e^{-z} dz = \frac{\Gamma_{y/\bar{\theta}}(N)}{\Gamma(N)}, \qquad (3)$$

где $\Gamma_{y/\bar{\theta}}(N)$ - неполная гамма-функция (табулирована);

$y = \varphi(t) = \frac{t}{\bar{\theta}}$ - нормированное время ($\bar{\theta} = M\theta$ в данном случае является параметром масштаба).

Вероятностная модель. При испытаниях на изнашивание элементов деталей машин и стойкостных испытаниях лезвийного режущего инструмента довольно часто имеет место случай, когда кривые износа отдельных реализаций процесса имеют существенную нелинейность с

тенденцией увеличения угла наклона к оси абсцисс с ростом времени. Такой характер кривых изнашивания (рис. 1) свидетельствует о нелинейном во времени протекании процесса накопления износных повреждений, когда интенсивность этого процесса (скорость размерного износа) увеличивается с ростом накопленного износа. Проведем анализ этого случая и получим вероятностную модель процесса изнашивания и модель ресурса трибосопряжения, используя известную в надежности вероятностную **модель пропорционального эффекта** /2/.

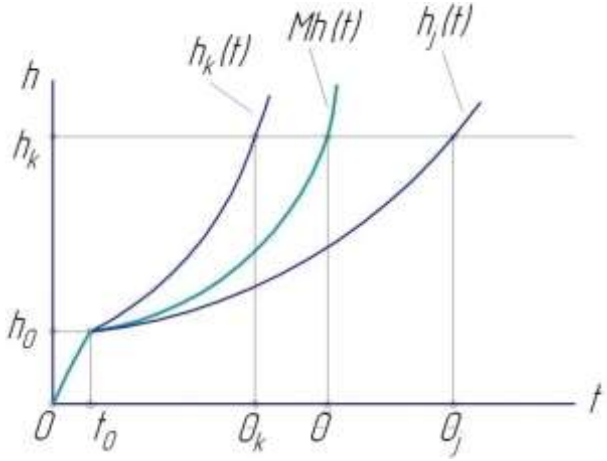


Рис.1. Нелинейное накопление повреждений (вид В2)

Пусть $\mathbf{h_1<h_2<\ \ldots<h_n}$ представляют собой последовательность случайных величин накопленного износа, соответствующих моментам времени $\mathbf{t_1<t_2<\ \ldots<t}$ (**t** – текущее время протекания процесса изнашивания).

Модель пропорционального эффекта предполагает, что на каждом этапе процесса $\mathbf{t_{i-1}\ \ldots\ t_i}$ приращение величины износа пропорционально уже достигнутой к началу этого этапа величине накопленного износа, т.е.

$$h_i - h_{i-1} = \delta_i \ \ h_{i-1}, \qquad (4)$$

где $\mathbf{\delta_1,\delta_2\ \ldots}$ - независимые в совокупности непрерывные положительные случайные величины (коэффициенты пропорциональности) с любым законом распределения.

В соответствии с формулой (4) получаем, что величина накопленного износа в текущий момент времени **t** ($\mathbf{i = n}$) составит

$$h(t) = h_n = h_0(1+\delta_1)(1+\delta_2)\ \ ...(1+\delta_n)\ . \qquad (5)$$

Логарифмируя последнюю формулу, получим

$$\ln h(t) = \ln h_0 + \sum_{i=1}^{n} \ln(1+\delta_i)\ . \qquad (6)$$

Согласно центральной предельной теореме, $\mathbf{\ln h(t)}$ как сумма большого числа **n** независимых случайных величин с любым законом распределения будет распределен

асимптотически нормально с функцией плотности $f[\ln\ h(t)] = n[\ln\ h(t);\ \mu;\ \sigma]$, а величина **h(t)** будет распределена по логарифмически нормальному закону с функцией плотности распределения

$$f(h) = \frac{1}{h\sigma\sqrt{2\pi}}\ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln h - \mu}{\sigma}\right)^2\right], \qquad (7)$$

где μ - параметр положения для нормального распределения **lnh(t)**, который ведет себя скорее как параметр масштаба для распределения **h(t)**;

σ - параметр масштаба (среднее квадратическое отклонение) для нормального распределения **lnh(t)**, который ведет себя скорее как параметр формы для распределения **h(t)**.

Методы определения параметров логарифмически нормального распределения по выборочным данным путем выравнивания эмпирической функции распределения на вероятностной сетке, построенной для этого распределения хорошо известны и описаны в литературе. К сожалению, нам пока не удалось определить в замкнутой аналитической форме функцию плотности распределения ресурса трибосопряжения (стойкости инструмента) для рассмотренной модели поверхностного разрушения (назовем ее **Вид В2**). Есть предположение, что это будет асимметричное распределение промежуточной формы типа распределений Вейбулла или Гумбеля, тип II. Для определения показателей стойкости и долговечности предполагается пока использовать распределение Вейбулла.

Выводы

1. С использованием модели пропорционального эффекта рассмотрен один из вариантов сценария протекания процесса поверхностного разрушения (**Вид В2**), основанный на гипотезе о нелинейном во времени накоплении повреждений на изнашиваемой поверхности элемента пары трения (лезвия инструмента), косвенным подтверждением которой служит существенно нелинейный вид кривой износа на участке нормального установившегося изнашивания.

2. Установлено, что для рассмотренной модели закон распределения величины накопленного износа в произвольный момент времени является логарифмически нормальным.

3. Предполагается, что результаты статистического анализа с применением методов, изложенных в докладе, могут, в совокупности с результатами исследования поверхностей изношенных образцов и анализа продуктов износа, дать полезную информацию о характере протекания процесса изнашивания в условиях трения и резания металлов.

Библиографический список

1. Шучев К.Г., Фоминов Е.В. Вероятностные модели поверхностного разрушения в условиях трения и резания.// Проблемы машиноведения: Трибология – машиностроению. Труды

всероссийской науч.-техн. конф. с участием иностранных специалистов, Москва 29-31 октября 2012 года.- М.: Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Т.1, 2012.- С. 204-207.

2. Справочник по надежности: В 3 т./ Т.1 Под ред. Б.Р. Левина М.: Мир, 1969. – с.59-68.

УДК.621.793.3

Об особенностях микродугового оксидирования (МДО) на резонансных частотах асимметричного переменного тока

Боков А.И., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Данилевский В.П., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Мигура А.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Тороп Ю.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Рассматриваются преимущества работы на резонансных частотах асимметричного переменного тока при нанесении износостойких покрытий методом микродугового оксидирования (МДО).

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, асимметричный переменный ток, резонансная частота.

Abstract. Discusses the benefits of working at the resonant frequencies of asymmetric alternating current when applying wear-resistant coatings by the method of microarc oxidation (MAO).

Keywords: microarc oxidation, asymmetric alternating current, resonant frequency.

Вопросы повышения производительности труда и эффективности производства тесно связаны с применением высоких технологий. Одним из таких направлений в науке и производстве является технология микродугового (микроплазменного) оксидирования (МДО), обеспечивающая высокие триботехнические, теплостойкие, диэлектрические, коррозионностойкие характеристики сплавов вентильных металлов в т.ч. алюминиевых и титановых.

Достижения в применении МДО в основном базируются на использовании слабощелочных растворов КОН с добавлением ультрадисперсных частиц оксидов, Na_2SiO_3 ; Al_2O_3 ; TiO_2 ; Cr_2O_3 ; ZrO и др.

Основной частью установки, определяющей свойства получаемых покрытий, является источник технологического тока. При этом процесс ведется, как правило, на переменном токе промышленной частоты 50 Гц.

Использование генераторов тока на промышленной частоте упрощает их конструкцию, но как показали исследования [1] такие источники питания имеют следующие недостатки:

1. При частоте 50 Гц импульс положительного разряда равен 10 мс, и при создании напряженности электрического поля при котором происходит процесс МДО-400В и токе 20 А, возникает кратер, внутри которого происходят плазмо-химические процессы с температурой до 3000 °С. Известно, что при этом вода разлагается на атомный кислород O_2 и водород Н. При этом кислород соединяется с алюминием образуя Al_2O_3 [2], т.е. происходит значительное оплавление точек образования Al_2O_3 и, как следствие, возникает значительная пористость поверхности – до 15 %.

2. При частоте 50 Гц и большой длительности пробоя анодной составляющей, равной 001 сек., происходит выделение избыточной энергии, которая в большей мере расходуется на нагревание электролита, что приводит к неоправданным затратам электроэнергии и удорожанию процесса образования покрытия.

Исследования в области интенсификации электрохимических процессов показали возможность использования асимметричного переменного тока резонансной частоты при проведении МДО.

При этом расчет резонансной частоты был произведен по формуле $\mathbf{F} = \frac{\mathbf{k}}{\mathbf{nA}}(1)$

где F – частота асимметричного переменного тока, Гц,n – валентность образуемого оксида, А – атомный вес материала детали,k- предельная резонансная частота разряда (или ионизации), равная 95519 Гц.

Результаты расчетов резонансных частот для алюминиевых и титановых сплавов приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Соединения	Атомный вес	Валентность	Резонансная частота
Al_2O_3	26,98	3	1179 Гц
TiO_2	47,86	2	998 Гц

Установлено, что при воздействии на поверхностный слой металла разрядов резонансной частоты, определяемой по формуле (1), пористость покрытия значительно уменьшается, а энергетические затраты сокращаются.

Библиографический список.

1. Гнеденко С.В, Гордиенко П.С. Состав, свойства и особенности формирования покрытий на титане, полученных при потенциалах искрения на аноде в водных электролитах. – Владивосток: 1988. с 58. – Деп. в ВИНИТИ. - № 1158- 1388.

2. Нечаев Г.Г. Модель микроразрядов в процессе микродугового оксидирования // Вестник СГТУ.2013. № 1. с. 107-111.

УДК 621.91.01

Многокритериальная задача оптимизации режима многоинструментальной обработки дорогостоящих деталей.

Зотов В.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Для задачи оптимизации необходимо получить максимальное значение функции производительности и минимальное значение функции себестоимости. Определяется принципы взаимодействия, сравнения критериев с использованием множества Парето.

Ключевые слова: оптимизация, себестоимость, производительность.

Abstract. For optimization problems it is necessary to obtain the maximum value of the function performance and minimum cost functions. Defines the principles of interaction, comparison criteria, and using the Pareto set.

Keywords: optimization, cost, performance.

Рассматривая вопрос оптимизации режимов резания, необходимо отметить, что для решения данной задачи определены два критерия – себестоимость обработки деталей и производительность операций обработки.

Производительность является функцией двух переменных – скорости резания и периода профилактической сменности. Такой же функцией этих же двух переменных является и себестоимость обработки. Следовательно, скорость резания и период профилактической сменности являются управляющими параметрами и можно их совокупность обозначить вектором $\bar{X} = (V, t)$.

Для данной задачи оптимизации необходимо получить максимальное значение функции производительности и минимальное значение функции себестоимости. Как показывают расчеты, одновременное удовлетворение обоих условий оптимизации невозможно. Поэтому, необходимо определить принципы взаимодействия, сравнения критериев.

Однако следует отметить, что обе функции имеют различную размерность и различную направленность. Производительность измеряется количеством деталей в час и ее необходимо максимизировать, а себестоимость – рублями и ее необходимо минимизировать. Для «выравнивания» размерности критериев используем базовые значения функций

$$\Pi_0 = \Pi(\bar{X}_0), Q_0 = Q(\bar{X}_0)$$

и для «однонаправленности» критериев, введем следующие функции, определяющие критерии оптимизации:

$$f_1 = \frac{\Pi_0}{\Pi} \quad f_2 = \frac{Q}{Q_0} - \max$$

Допустимые варианты, определяемые $\bar{X} = (V, t)$, представляют собой множество R_x в двухмерном пространстве альтернатив. Двухмерное пространство, определяемое значениями функций f1 и f2, называется критериальным пространством. Значению точки пространства альтернатив соответствует только одно значение точки критериального пространства.

Следует отметить, что переход от одной точки множества Парето или его образа в критериальном пространстве к другой точке приводит к улучшению одного параметра и к ухудшению другого параметра.

Выбор точки на множестве Парето может определяться ЛПР (лицо принимающее решение) или введением некоторых дополнительных правил.

Наиболее часто применяется функция ценности, определяющая соответствие вектору критериев $\bar{R}_f = (f_1, f_2)$ некоторого числа φ. В качестве формулы, определяющей функцию φ, используем линейную зависимость.

$$\varphi = \lambda_1 f_1 + \lambda_2 f_2 = \lambda f$$

Коэффициенты λ1, λ2являются весами, еслиλ1+λ2=1

УДК 621.893 - 022.532:621.983

Топокомпозиты для многопереходной вытяжки кузовных деталей автомобилей

Шульга Г.И. , Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия, g.shulga41@mail.ru

Скринников Е.В. , Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

Шульга Т.Г, Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

Васильев М.А. , Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

Васильев Б.Н., Южно-Российский государственный политехнический университет (Новочеркасский политехнический институт) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

Аннотация. Рассмотрены возможности применения топокомпозитов в аддитивных технологиях при листовой вытяжке деталей кузовов автомобилей в замен, применяемых жидких, пластичных, пастообразные смазочных материалов.

Ключевые слова: топокомпозит, многопереходная вытяжка, кузов, микролегированная сталь, смазочный материал, аддитивная технология

Abstract. The possibilites of topocomposites application in additive manufacturing in sheet-metal stretching of automobile bodies instead of applied liquid, plastic, pasty lubricants have been considered.

Keywords: topocomposite, multitransient, stretching, body, microalloy steel, lubricant, additive manufacturing

Современные аддитивные технологии в машиностроении представляют собой «выращивание» изделия (AF-AdditiveFabrication или AM-AdditiveManufacturing) и означают изготовление его путем «добавления» и предполагают формирование деталей путем последовательного «наращивания» материала слой за слоем [1]. Цифровое описание многослойных технологических покрытий–CAD (ComputerAktedDesign), прямое нанесение порошковых материалов для получения таких покрытий с использованием аддитивной технологии послойного синтеза позволят радикально изменить существующие технологии в высокотехнологичных отраслях.

В связи с массовым выпуском легковых и грузовых автомобилей, постоянным совершенствованием их дизайна конструкторы, стремясь уменьшить количество штампуемых деталей, создают конструкции частей кузовов, позволяющие изготавливать их, используя глубокую многопереходную вытяжку.

Кузовные детали автомобилей с равномерной толщиной стенки из листовых сталей могут быть получены прямой и обратной глубокой вытяжкой, реверсивной штамповкой-вытяжкой, фрикционно-реверсивный вытяжкой и другими способами. Глубокая вытяжка частей кузовов автомобилей из листовых сталей представляет сложную задачу, так как листовые стали обладают

повышенной склонностью к адгезионному взаимодействию со штамповым инструментом [2, 3], а также должны обладать пластическими свойствами, обеспечивая значительное относительное линейное удлинение и заданную точность получаемого изделия.

Вследствие появления налипания частиц металла, задиров, рисок, царапин и других дефектов снижается качество изготавливаемых изделий, а также стойкость штампового инструмента. Кроме того при выполнении формообразующих операций не должно происходить разрушения заготовки, потери устойчивости, приводящей к искажению заданной формы детали, изменения толщины стенки заготовки.

Специальным требованиям к пластичности при производстве кузовов легковых автомобилей отвечают тонкие листы стали толщиной 0,55 – 1,5 мм с содержанием углерода менее 1% и с суммарным содержанием фосфора и серы 0,07 %. Для снижения подверженности стальных листов коррозии применяются листы с оцинкованным слоем около 10-30 мкм. С целью снижения массы автомобилей стальные кузова заменяют сплавами из алюминия и магния.

На ОАО «АВТОВАЗ» разработана сортовая микролегированная сталь АЦ40ХГАФБ взамен хром, никель-молибденовых сталей 30ХМ, 35ХМ, 38ХГМ, 40ХМ, 40ХГНМ, требующих дорогостоящей, энергозатратной термообработки. Разработан проект кузова с применением новых марок сталей повышенной прочности, в том числе двухфазных сталей с пределом прочности до 500-700 МПа.

Среди различных современных материалов широко используются в кузовах автомобилей высокопрочные, сверхнизкоуглеродистые стали с пределом текучести равным 340 МПа, а также двухфазные стали с пределом текучести 780-980 МПа.

Для устранения адгезионного взаимодействия, вызывающего появление канавок пропахивания на штамповом инструменте и деформируемом изделии используются жидкие, пластичные, пастообразные смазочные материалы, наносимые на деформируемое изделие.

В России в автомобильной промышленности при штамповке и глубокой вытяжке кузовных деталей легковых автомобилей применяют технологические смазочные материалы технопарка «Хозрасчетного творческого центра Уфимского авиационного института»: «Росойл-222» – композицию синтетических, растительных и минеральных масел с присадками, загустителями и наполнителями; «Росойл-223» - пластичную композицию минерального масла, не содержащую наполнителей, с функциональными присадками; «Росойл-555»– пластичную композицию на водной и масляной основах с добавлением поверхностно-активных веществ (ПАВ) и функциональных присадок.

Концерн «CarlBechemGmbH» (Германия) производит: пасту BeruformSTP 50 CA для глубокой вытяжки сложных деталей кузова автомобиля из углеродистых и легированных сталей толщиной до 8 мм; масла BeruformSTO 2557, BeruformSTO 3446 для штамповки и глубокой вытяжки

оцинкованной и коррозионно-стойкой стали, алюминия соответственно толщиной не более 5мм и 6... 8 мм.

Компания IRMCO (США) производит экологически чистые смазочные материалы IRMCOFLUIDS, IRMCOGEL на безмасляной полимерной основе, образующих защитный слой на поверхностях деталей при обработке сталей повышенной прочности. Данные смазочные материалы содержат «теплоактивирующий компонент» – «сверхтемпературные высокопрочные полимеры», которые повышают вязкость жидкости с увеличением нагрева и давления. Компания IRMCO производит смазочные материалы КМ 30 323 для холодной штамповки, глубокой вытяжки углеродистых и коррозионно-стойких сталей; КМ 30 146, КМ30 156 для обработки крупногабаритных деталей из оцинкованных и высокопрочных сталей.

Недостатком технологических смазочных материалов, отмеченных выше, является удаление остатков смазочных материалов с полученных изделий с использованием очистительных составов или отжига, невозможность регулирования в трибосопряжении толщины пленок, в зависимости от природы обрабатываемого листового материала триботехнические и адгезионные свойства пленок в зоне контакта.

В ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова разработан состав топокомпозит ТК-2, содержащего фрактальные нанокластеры, включающего полимерное водорастворимое под смазочное покрытие ПВ-4 и водорастворимое смазочное покрытие ПСМ-2М, которое наносят на под смазочные покрытие ПВ-4 [4, 5]. Дисперсии покрытий ПВ-4 и ПСМ-2М представляют композиции твердых порошковых материалов, которые могут формировать покрытия на поверхности заготовок прямым нанесением порошковых материалов с использованием аддитивной технологии послойного синтеза. Отличительной особенность топокомпозит Т-2 является возможность изменять его толщину и адгезионные свойства в трибосопряжении, а также антифрикционные и противоизносные свойства его поверхностного слоя, что позволит повысить долговечность штампового инструмента, технологической оснастки, качество и точность получаемых изделий.

Топокомпозит ТК-2 может применяться при штамповке, многопереходной вытяжке, гибки, вырубке листовых сталей. После проведения технологических операций топокомпозит ТК-2 легко смывается водой или слабощелочным раствором, который может быть использован в качестве добавки в строительные растворы.

Библиографический список

1. Локотков Е. Безотходное производство, на котором можно выполнять прежде невероятные задачи,–скорое будущее российских аддитивных технологий: http: /www.kommtrsant. ru/doc/2678720.

2. Грудев А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справочник / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик – М.: Металлургия –1982. – 312 с.

3. Уиксов Е.П. Теория пластических деформаций металлов / Е.П.Уиксов, У.Джонсон, В.Л. Колмогоров и др. Под ред. Е.П. Уиксова, А.Г.Овчинникова – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.

4. Шульга Г.И. Улучшение качества поверхности применением функциональных водорастворимых покрытий, содержащих фрактальные нанокластеры // Качество и жизнь 2014. – №1.–С.56-61.

5. Шульга Г.И., Астахов А.В., Скринников Е.В., Васильев М.А., Васильев Б.Н. Исследование состава технологического твердого порошкового смазочного материала ПСМ-2 // Новые материалы и технологии их получения: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. г. Новочеркасск, 15 октября 2014 г./Южа.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ),2014 – С.13-18.

УДК 621.9 + 621.2.082.18

Выбор оптимальных режимов изнашивания при лезвийной обработке по термодинамическим характеристикам

Климов М.М., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Рыжкин А.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Моисеенко С.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Рассмотрены результаты практической реализации разработанного термодинамического критерия оптимизации режима резания. Приведена структурная схема устройства для регистрации и цифровой обработки сигнала термоЭДС зоны резания согласно алгоритму критерия оптимизации.

Ключевые слова: резание металлов, оптимизация режима резания, термоЭДС зоны резания, термодинамический критерий оптимизации

Abstract. The results of the practical implementation of the developed cutting mode thermodynamic optimization criterion are reviewed in this article. The equipment block diagram for recording and digital signal processing of cutting zone thermo EMF, according to the algorithm optimization criterion is presented.

Keywords: metal cutting, cutting mode optimization, cutting zone thermo EMF, thermodynamic optimization criterion

В металлообработке по-прежнему остается актуальной проблема определения оптимальных по износостойкости инструмента элементов режима резания, соответствующих условиям конкретного технологического процесса, особенно при использовании новых конструкционных или инструментальных материалов.

В этом аспекте интересен подход к данной проблеме с помощью простых и надежных в практической реализации способов оптимизации, основанных на анализе изменения экспериментальных характеристик контактного взаимодействия, регистрируемых в процессе резания.

Ранее разработанные авторами данной статьи критерии оптимизации, основанные на термодинамическом подходе к трению и изнашиванию, позволяют достаточно надежно определять оптимальную по износостойкости скорость резания, при этом сокращается трудоемкость экспериментальных работ и снижается расход инструментальных и обрабатываемых материалов по сравнению с традиционными способами определения оптимальных режимов резания. Термодинамические критерии оптимизации процесса изнашивания основаны на условии термодинамической устойчивости системы трения и по своей физической сущности являются аналогами производства избыточной энтропии, обусловленного флуктуациями параметров термодинамического описания системы трения. Так как при резании основным каналом диссипации

энергии является тепловой, производство избыточной энтропии, в основном, обусловлено температурными флуктуациями.

По определению производства избыточной энтропии имеем

$$P[\delta S] = \frac{d}{dt}(\delta S) \quad (1)$$

В свою очередь, приращение энтропии δS, обусловленное тепловыми процессами, можно выразить как $\delta S = dQ/T$. Тогда

$$P[\delta S] = \frac{d}{dt}\left(\frac{\delta Q}{T}\right) \quad (2)$$

При постоянной температуре поверхности T величина δQ в выражении (2) соответствует мощности тепловых флуктуаций на контакте.

В качестве экспериментальных аналогов температурных характеристик могут быть приняты параметры сигнала термоЭДС естественной термопары «инструмент – деталь». Таким образом, электрическим аналогом температуры резания является постоянная составляющая термоЭДС (E), а переменная составляющая термоЭДС (ε) является характеристикой диссипативных флуктуационных процессов, сопровождающихся температурным эффектом в виде температурных вспышек, которым соответствуют флуктуации термоЭДС.

Тогда мощность переменной составляющей термоЭДС зоны резания (ω), в общем случае равная произведению величины переменной термоЭДС (ε) на ток, может быть выражена как

$$\omega = K\varepsilon^2, \quad (3)$$

где K - коэффициент пропорциональности с размерностью электрической проводимости, а в качестве экспериментального аналога производства избыточной тепловой энтропии можно принять критерий:

$$K_\omega = \frac{\omega}{E} \quad (4)$$

или, учитывая (3), можно получить другой критерий, проще реализуемый на практике и равный отношению среднеквадратического значения переменной составляющей к постоянной составляющей термоЭДС естественной термопары, образуемой контактом инструментального и обрабатываемого материалов:

$$K_\varepsilon = \frac{\varepsilon}{E} \quad (5)$$

Результаты экспериментов показали, что при резании металлов кривая изменения критерия оптимизации от скорости Кε = f (V) для различных сочетаний инструментальных и обрабатываемых материалов имеет либо минимум, либо точку перегиба. Скорость резания, соответствующая этим точкам критерия оптимизации, является оптимальной скоростью резания, при которой интенсивность изнашивания (J) инструментального материала минимальна (рис. 1).

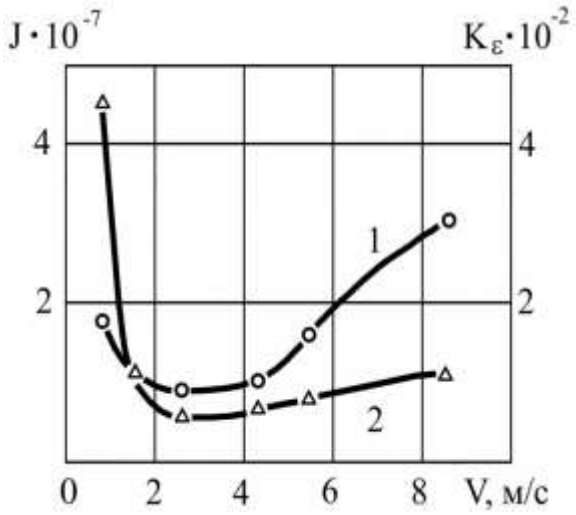


Рис.1. Влияние скорости резания V на интенсивность изнашивания J (1) и термодинамический критерий оптимизации Кε (2) при точении Стали 45 тв. сплавом Т15К6

В соответствии с предлагаемым алгоритмом определения оптимальной скорости резания заготовку из обрабатываемого материала разбивают на некоторое количество участков обработки так, что каждому участку соответствует своя скорость резания в пределах исследуемого диапазона. На этих скоростях осуществляется процесс резания с регистрацией термоЭДС при постоянных значениях глубины резания и подачи для всех участков обработки.

Для каждого выбранного значения скорости вычисляют математическое ожидание переменной (ε) и постоянной (Е) составляющих термоЭДС и рассчитывают их отношение, т.е. определяют величину критерия Кε (5), затем строят график Кε = f (V), откладывая по оси ординат значения Кε, а по оси абсцисс – скорости резания.

Для автоматизации изложенной методики определения оптимальной скорости резания было разработано устройство для регистрации и соответствующей цифровой обработки сигнала термоЭДС естественной термопары «инструмент – заготовка». Структура устройства и алгоритм обработки сигнала показан на рис.2.

Предварительно сигнал термоЭДС усиливается малошумящим усилителем постоянного тока (УПТ) с коэффициентом усиления 100. При нажатии кнопки «Пуск» в начале обработки каждого участка заготовки производится ввод сигнала в устройство. При этом происходит оцифровка сигнала термоЭДС в аналого-цифровом преобразователе (АЦП), после которого сигнал подается на вычислительную часть устройства. При нажатии кнопки «Стоп» заканчивается ввод аналогового сигнала термоЭДС и его оцифровка.

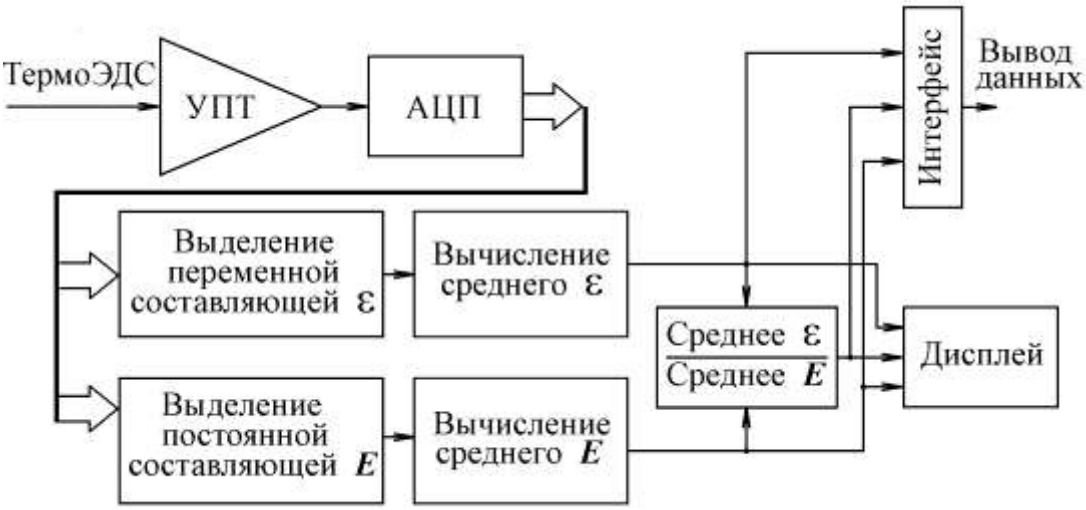


Рис.2. Структурно-логическая схема обработки сигнала термоЭДС в устройстве

Далее обработка оцифрованного сигнала осуществляется программно: вычисляется математическое ожидание переменной и постоянной составляющих термоЭДС, рассчитывается их отношение и выводится первая точка графика Кε = f (V) на экран устройства. Массив данных оцифровки сигнала на каждом участке обработки заносится в память и может быть выведен через интерфейс устройства на стационарный компьютер, либо на флэш-память. Это необходимо для возможных дальнейших операций над сигналами (статистическая обработка, спектральный анализ и др.).

Аналогичные операции выполняются на последующих участках обработки, и строится весь график, который отображается на дисплее и может быть выведен на печать. Число точек графика, выводимого на экран, соответствует количеству участков, на которые разбивается обрабатываемая деталь.

Экспериментальные исследования подтвердили возможность применения термодинамического критерия и устройства для его реализации при выборе оптимальных по износостойкости инструмента элементов режима резания.

УДК 539.538:621.789:621.373.826

Перспективы повышения износостойкости инструментальных материалов за счет cn-покрытий, наносимых методом лазерной абляции

Илясов В.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Хатламаджян Д.Ю., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Ашканов А.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Метод получения сверхтвердых тонких кристаллических пленок путем лазерной абляции углерода в камере с азотом анализируется. Описывается экспериментальная установка**.**

Ключевые слова: нитрид углерода, лазерная абляция, износостойкие поверхности, тонкие кристаллические пленки.

Abstract. Analyzed the method for obtaining super hard thin crystalline films by laser ablation of carbon in a chamber filled with nitrogen under pressure. Experimental installation is described

Keywords: carbon nitride, laser ablation, wear resistance surfaces, thin crystal films

Анализ проблем износостойкости поверхности инструментов и механизмов показал, что в машиностроении наиболее распространенным является механический износ поверхностей, участвующих в процессах трения, резания, абразивного износа и т.д. Для повышения эксплуатационного срока службы материалов проводятся огромное количество исследований, часть из которых направлена на рассмотрение способов повышения износостойкости методами нанесения сверхтвердых износостойких покрытий. В данном докладе рассматривается метод нанесения сверхтвердого покрытия на основе нитрида углерода методом лазерной абляции, основанном на практических работах по получению тонкой кристаллической пленки на металлических поверхностях [1]. Нами принята модель получения азото-углеродистой кристаллической пленки процессом лазерной абляции в камере, заполненной азотом под давлением. Процесс формирования пленки описывается механизмом роста Странского-Крастанова [2]. Он заключается в том, что сначала на поверхности исследуемых образцов идет рост по послойному механизму, затем после образования смачивающего слоя (толщиной в один или несколько моноатомных слоев) происходит переход к островковому механизму роста. Условием реализации такого механизма является значительное (в несколько процентов) рассогласование постоянных решетки осаждаемого материала и материала подложки.

Метод получения пленки процессом лазерной абляции основан на разработках «Института теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН» [3] структурным кинетическим методом формирования заданной структуры на атомарном уровне путем целенаправленного внешнего воздействия лазерным излучением. Как правило, синтезированные пленки β–C_3N_4 обладали частично

упорядоченной атомарной структурой и содержали незначительное количество микрокристаллических включений. Мы полагаем, что в рамках этой группы методов синтез твердых кристаллических фаз нитрида углерода в виде микровключений вполне вероятен. С учетом методологии авторов [3] и имеющегося у нас оборудования был проработана возможность синтеза пленок нитрида углерода. Нами разработана абляционная камера, в которой будут располагаться образцы материалов, на которые в процессе экспериментов будет наноситься нитрид углерода. Процесс синтеза основан на экспериментах В.Н. Варакина и Ю.Я. Кузякова [4], в которых был предложен метод получения исследуемых пленок путем импульсного лазерного осаждения (ИЛО), который заключается в лазерной абляции углерода в азоте при давлении до 100 Па с последующим осаждением продуктов газофазных химических реакций на подложку. Основная особенность ИЛО – создание импульсного потока частиц с большими плотностями и скоростями, при этом в его состав входят реакционно-активные атомы, молекулы и ионы испаряемого материала, в данном случае углерода. Это существенно повышает вероятность осуществления химических реакций с окружающим газом азотом. Процесс создания пленки методом ИЛО можно разделить на три этапа:

1. Абляция твердофазной мишени мощным лазерным излучением, приводящим к фрагментации вплоть до ионов, ионизации и формированию импульсного потока частиц (лазерный факел).
2. Физико-химические реакции частиц между собой и с окружающим газом, Азот и углерод, вступая во взаимодействие, подвергаются сильному энергетическому взаимодействию, вследствие чего находятся в ионизированном и атомизированном состоянии, что позволяет им образовать ковалентную связь.
3. Осаждение продуктов газофазного синтеза на подложку и формирование износостойкой кристаллической структуры пленки в ходе поверхностной диффузии (инициируемой подогревом образцов до температуры 300^0 С).

Как полагают авторы работы [4], методы изучения полученных поверхностей имеют ряд ограничений по возможности идентификации частиц, поэтому основным путем изучения синтеза пленок является сравнительный анализ готовых пленок, полученных при разных параметрах ИЛО.

Для проведения практических исследований нами была разработана оригинальная установка (рис. 1), состоящая из импульсно - периодического иттербиевого YAG:Yb лазера и вакуумной камеры (реактора) с манометром и электронным термометром для контроля температуры образцов. В камеру предварительно помещается мишень (таблетка графита) и образцы, создается вакуум, а затем закачивается азот под давлением. На мишень сквозь кварцевое стекло, помещенное в отверстие верхней крышки камеры, пропускается лазерный луч плотностью энергии до 10 Дж/см^2, для достижения в фокусе температуры образования плазмы углерода. Температура реакции $C+N_2=CN+N\uparrow$ составляет около 3000°С.

Таблица 1.

Равновесные объемы (V_o, A^3), относительное число связей C-N(n) и объемные модули упругости (B, ГПа) для кристаллической (компактной и дефектной) и аморфной (а) фаз нитрида углерода.

Фаза	Сверхячейка	V_o	N	B
C_3N_4	C_3N_4	40,15	1.50	422
C_3N_4	$C_3N_4V_n$	39,36	0,80	355
C_3N_4	$C_{24}N_{32}$	321,89	1,00	402
$C_3N_{3,875}$	$C_{24}N_{31}V_n$	323,15	0,95	394
C_3N_4 (а)	$C_{24}N_{32}$	432,33	0,52	113

*V_n – вакансия по азоту

Расчеты выполнены неэмпирическим методом псевдопотенциала [5].

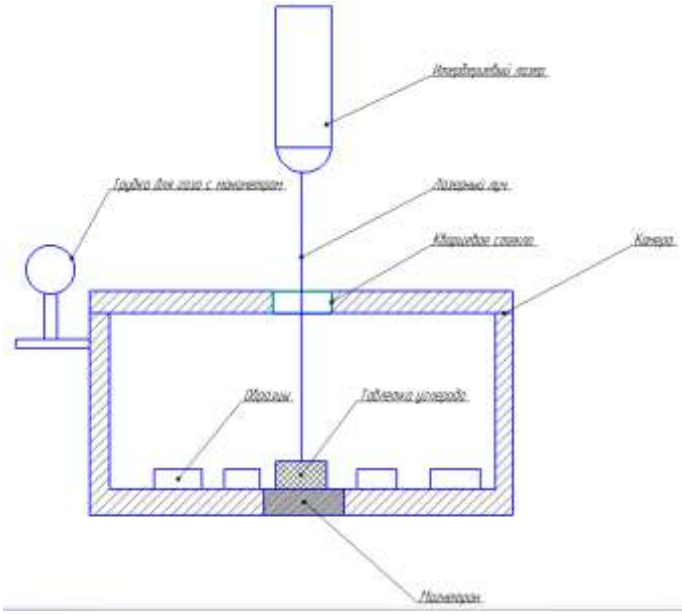


Рис.1. Вид экспериментального процесса в камере

Энергия и мощность лазерного излучения могут регулироваться в необходимых для эксперимента интервалах. Разогрев газа в камере проводится с помощью магнетрона, нагревающего керамические пластины (образцы) внутри камеры. На дне камеры обычно располагаться образцы материалов, на которых, предположительно, произойдет процесс осаждения нитрида углерода. По окончанию опыта азот выпускается из камеры через трубку, крышка снимается, образцы извлекаются и отправляются на исследования.

Проведение экспериментов позволит произвести собственные исследования в данной области, ориентированные на практическое использование. Необходимость подобных исследований обусловлена сложностью процесса лазерной абляции. Известные по опубликованной литературе теоретические исследования еще далеки от практики, что обусловлено комплексным воздействием

возможно ранее не учитываемых факторов, которые необходимо выявить. Следует отметить, что при получении нами положительных результатов, вполне возможно использование метода лазерной абляции для получения сверхтвердых покрытий на малых образцах, что существенно поможет исследованиям и экстраполяции полученных результатов вплоть до промышленных масштабов.

Таким образом, данное практическое исследование поможет лучше понять процессы лазерной абляции в образования сверхтонких азото-углеродных пленок.

Библиографический список

1. Сивков, А.А. Динамический синтез ультрадисперсных кристаллических фаз системы C-N / А.А. Сивков, Е.П. Найден, А.Я. Пак // Сверхтвердые материалы. – 2009. – Том 1, № 5. – С. 29 .

2. Оура, К. Введение в физику поверхности /К. Оура, В.Г. Лифшиц, А.А. Саранин и др. Под ред. В.И. Сергиенко. - М.: Наука, 2006. - 490 с.

3. Милявский, В.В. Кристаллический сверхтвердый нитрид углерода. От прогноза к синтезу / В.В. Милявский, А.З. Жук, Т.И. Бородина, А.С. Жарков, В.Е. Фортов // Институт теплофизики экстремальных состояний ОИВТ РАН, г. Москва, Россия / http://www.vniitf.ru/rig/konfer/6zst/dokl/sec5/27.pdf

4. Варакин, В.Н. Использование пироэлектрического приемника для изучения процесса синтеза пленок нитрида углерода методом импульсного лазерного осаждения / В.Н. Варакин, Ю.Я. Кузяков // Кафедра лазерной химии, Московский Университет. УДК 54.057: 544.536 Вестник Московского Университета, Сер.2 Химия 2011 т.52. №1

5. А. Л. Ивановский, Г.П. Шейкин. Квантовая химия в материаловедении. Екатеринбург, Изд-во "Екатеринбург", 2000, ISBN 5-88464-028-5, 181 с.

УДК 621.9 +621.2.082.18

Структурно-термодинамические аспекты повышения работоспособности ИРМ

Рыжкин А.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Фоминов Е.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Сигиденко К.Е., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Представлены современные подходы к оценке износостойкости инструментальных режущих материалов (ИРМ) с учётом влияния их энтропий и термо – ЭДС, между которыми установлена функциональная связь; обосновано улучшение трибологических характеристик сложнолегированных быстрорежущих сталей (БРС) как высокоэнтропийных материалов, приведены результаты исследования их износостойкости

Ключевые слова: режущие материалы, износостойкость, термо-ЭДС, энтропия, высокоэнтропийные ИРМ.

Abstract. Modern approaches to the estimation of the durability of the cutting tool materials taking into account the impact of their entropy, Thermo-EMF and functional relationship between them are presented; improving of the tribological properties of complex alloyed high-speed steels as high entropy materials is confirmed; the results of the study of wear resistance high-speed steels are presented.

Key words: cutting tool materials, wear resistance, Thermo-EMF, entropy, high entropy cutting tool materials.

Важную роль в обеспечении эффективности металлообработки и надежности инструментальных наладок играет лезвийный режущий инструмент (РИ).В настоящее время эксплуатационные свойства не только ТС, но и БРС оцениваются на основе экспериментальных данных, а при разработке их новых составов учитываются, в основном, металлургические, технологические и экономические факторы. В этой связи целесообразно уметь априори прогнозировать свойства существующих и вновь разрабатываемых составов ИРМ на базе изучения комплекса термодинамических процессов в зоне трения при резании и получения аналитических зависимостей для оценки характеристик трения и износа.

В результате проведённой работы были установлены теоретические зависимости между изменением энтропии материала ΔS и его термо-ЭДС,

$$E = -\frac{\Delta H - T\Delta S}{Fn} \qquad (1),$$

где F- постоянная Фарадея, n – число электронов, T - абсолютная температура.

И между износостойкостью ИРМ и его термо-ЭДС:

$$\text{И} = b\left\{\left(A + W_F e^{-\frac{\varepsilon W_F}{K_\varepsilon T}} + K_c + \text{К}_{\text{Н1}}\right)\right\}^2 + \text{К}_{\text{Н2}} \qquad (2).$$

где W_F - энергия Ферми, K_{H1}и K_{H2}- варьируемые кинетические коэффициенты, ГПа, K_c -энергия атомов в свободном состоянии, ε - термо-ЭДС материала, k –постоянная Больцмана.

Из (1) видно, что большему значению энтропии материала соответствует меньшее значение его ЭДС при допущении, что процесс совершается при неизменных энтальпии ΔHи температуре Т. Полученные расчетные данные (2)по износостойкости согласуются с экспериментальными результатами стойкостных испытаний сверл из быстрорежущих сталей разных марок и интенсивного изнашивания этих сталей при трении. Из рис.1 следует, что гарантийная стойкость Т(0,9) партии сверл диаметром 13,0мм (кривая 1) и интенсивность изнашивания (кривая 2) коррелирует с величиной абсолютной термо-ЭДС сталей: наиболее эффективны стали, имеющие минимальные значения термо-ЭДС.

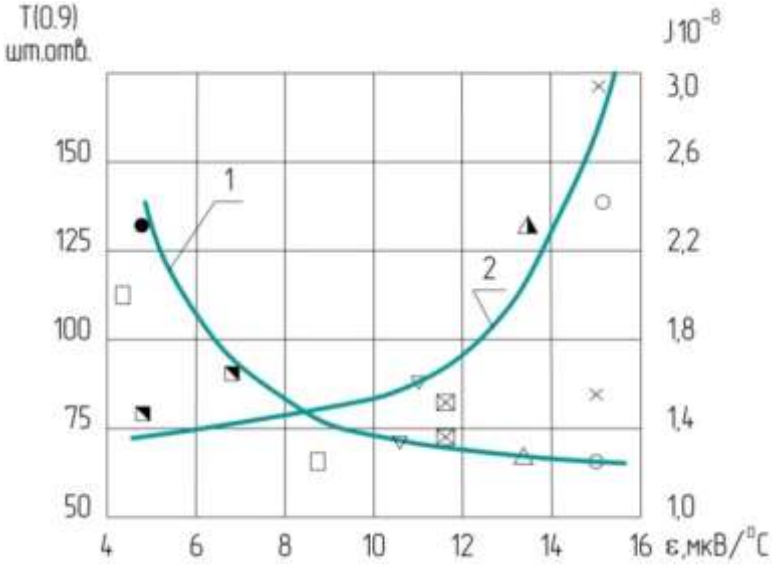


Рис.1. Взаимосвязь абсолютной термо-ЭДС и интенсивности изнашивания БРС при трении (кривая 2) и гарантийной стойкости сверл при резании (кривая 1) для разных марок быстрорежущих сталей.
Кривые: ◥ - Р6Ф2К8М5, ● -Р12Ф2К8М3, ○ -Р18, □ -Р4М4Ф4, △ - Р6М4Ф4, ✕ -Р6М5, ◭ - Р6М5К5, ▽ - Р8М3Ф4, ☒- Р9Ф5

Теоретическая зависимость (1) и вытекающие из нее выводы были проверены на инструментальных режущих материалах. На рис.2 представлены результаты расчетных значений энтропий для разный марок быстрорежущих сталей и сравнение с величинами их относительных ЭДС по отношению к платине. Из рис. 2 видно, что существует связь между энтропией ИРМ как термодинамической характеристикой и относительной (абсолютной) термо-ЭДС, которая в первом приближении отображается кривой гиперболического вида.

В качестве параметра, характеризующего работоспособность ИРМ в условиях резания, в дальнейшем целесообразно будет использовать его энтропию, так как этот параметр поддается расчету при известном химическом составе материала; поэтому при «конструировании» ИРМ следует стремиться создавать высокоэнтропийные режущие материалы (ВЭРМ).

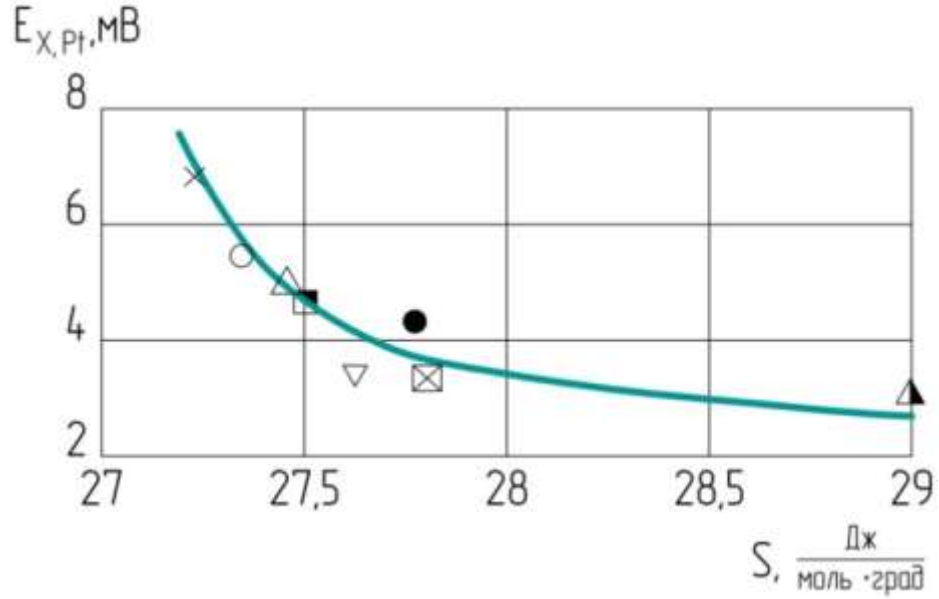


Рис. 2. Связь между энтропией и термо-ЭДС для быстрорежущих сталей разных марок (ГОСТ 19265-73): ▽- Р6Ф2К8М5, ◭ -Р12Ф2К8М3, ○-Р18, △ -Р6М4Ф4, × -Р6М5, ☒ - Р6М5К5, ◥ - Р8М3Ф4, ● - Р9Ф5

Заключение

Теоретическая оценка интенсивности изнашивания ИРМ как гетерогенных структур, показала, что для снижения износа при трении и резании необходимо увеличение их энтропии или уменьшение абсолютной термо-ЭДС. Для быстрорежущих сталей обнаружена функциональная взаимосвязь между структурной характеристикой материалов термо-ЭДС и энтропией.

Библиографический список.

1. Рыжкин, А.А. Синергетика изнашивания инструментальных режущих материалов (трибоэлектрический аспект). /А.А. Рыжкин Ростов н/Д: Изд. центр ДГТУ, 2004.- 322 с.

2. Рыжкин, А.А. Термодинамический подход к расчету интенсивности окислительного изнашивания твердых сплавов / А.А. Рыжкин, Ф.А. Висторопская, К.Г. Шучев и др. // Механика и трибология транспортных систем: Сб. докл. Междунар. науч. конф., 9-11 ноября. / РГУПС. - Ростов н/Д, 2011.- с 195-203.

3. Соляков, В.К. Введение в химическую термодинамику / В.К. Соляков. // М: Химия, 1974. – 222 с.

4. Карапетьянц, М.Х. Введение в теорию химических процессов / М.Х. Карапетьянц. – М: Высшая школа, 1975.- 330 с.

5. Блатт, Ф.Дж. Термоэлектродвижущая сила металлов / Ф.Дж. Блатт, П.А. Шредер, К.Л. Фойлз и др.: пер. с англ. под ред. Д.К. Белащенко. - М: Материал, 1980. - 248 с.

6. Рыжкин, А.А. О связи между износостойкостью и физическими свойствами инструментальных материалов / А.А.Рыжкин, В.В.Илясов // Вестник машиностроения.-2000.-№12.-с.32-40.

УДК 621.793

Повышение эксплуатационных характеристик газотермических покрытий воздействием непрерывного излучения CO_2 – лазера

Митрофанов А.А., Ковровская государственная технологическая академия им. В.А.Дегтярева, г. Ковров. Россия
Чащин Е.А., Ковровская государственная технологическая академия им. В.А.Дегтярева, г. Ковров. Россия
Балашова С.А., Ковровская государственная технологическая академия им. В.А.Дегтярева, г. Ковров. Россия
Харахашев А.Х., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Климов М.М., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты исследований по установлению зависимости пористости газотермических покрытий от параметров лазерного излучения; описано воздействие лазерного излучения на поверхностные слои газотермического покрытия при учете его несплошности, вызванной наличием открытых и закрытых пор; показано, что для уменьшения пористости покрытия под воздействием лазерного излучения необходимо создавать на покрытии температуру в интервале «температура плавления – температура кипения». Экспериментально установлено, что воздействие лазерным излучением приводит к снижению средней пористости газотермических покрытий.

Ключевые слова: Лазерное излучение, газотермическое покрытие, пористость газотермического покрытия.

Abstract. The results of the researches which determine the dependence ofgas-thermal coating porosity on the laser radiation parameters are given in this work; It determines such operational characteristics as thermocyclic and corrosion stability. In order to solve the problem, at the first stage the based on analytic dependences effect of a laser radiation to surface layers of gas-coating is described. The discontinuity of coating was taken into account, what was explained by presence of open and closes pores. It was shown that it’s necessary to produce the temperature range of “point of fusion – boiling point” on the surface of coating for the decrease of coating porosity as the action of laser radiation.. It has been established that the action of laser radiation leads to reduction of average porosity of gas-thermal coating.

Key words: mathematical model, laser radiation, gas-thermal coverings, porosity of a gas-thermal covering.

Одним из перспективных способов получения защитных и износостойких покрытий повышенной прочности являются плазменные методы их нанесения. Эффективность применения газотермических покрытий определяется не только свойствами напыляемого материала, но и характеристиками покрытия. Например, теплозащитная способность, сопротивляемость растрескиванию при термоциклических нагрузках и коррозионная стойкость покрытия во многом определяется его пористостью. С увеличением наружной и внутренней пористости облегчается возможность проникновения атмосферных газов или агрессивных сред через покрытие к поверхности металлической основы, что приводит к образованию на границе раздела оксидных пленок, снижению прочности адгезионного сцепления и отслаиванию покрытия. Снижение пористости поверхностных покрытий возможно выполнением оплавления некоторого объема частиц в составе покрытия, исключая объемный нагрев до температуры плавления покрытий, т.к. это может

приводить к отслаиванию покрытий вследствие как подплавления, так и значительной термодеформации подложки. Известно, что воздействие лазерного излучения на материал обеспечивает его высокотемпературный нагрев, отличающийся малой зоной термического влияния.

В работе представлены результаты исследований по установлению зависимости пористости газотермических покрытий от параметров лазерного излучения. Для решения задачи, на первом этапе, на основании аналитических зависимостей описано воздействие лазерного излучения на поверхностные слои газотермического покрытия при учете его несплошности, вызванной наличием открытых и закрытых пор. Использование данных зависимостей позволило определить энергетический интервал воздействия на поверхность лазерным излучением для уменьшения пористости покрытия. Условием определения параметров непрерывного лазерного излучения применяемого для обработки газотермических покрытий является формирование на поверхности температур в интервале «температура плавления – температура кипения»

Увеличение температуры, вызванное повышением интенсивности излучения выше указанного диапазона, приводит к испарению поверхностных слоев покрытия вплоть до его полного удаления в зоне термического воздействия.

На втором этапе проводились экспериментальные исследования, заключающиеся в обработке излучением CO_2–лазера двух типов предварительно напыленных газотермических покрытий. Исследованию подвергались покрытия на основе металлических (ПН 85-Ю-15) и неметаллических (Al_2O_3) компонентов, напыленные на образцы из конструкционной стали 10. Дисперсность частиц напыляемого порошка в обоих случаях составляла 40 - 60 мкм. Количественная оценка изменения пористости выполнялась с помощью, разработанной в среде Visual Studio 2008 программы обработки изображений, путем попиксельного сравнения на изображении микроструктуры площадей, занимаемых порами и материалом покрытия. Установлено, что воздействие лазерным излучением приводит к снижению средней пористости газотермических покрытий не зависимо от напыляемого материала. Для покрытия на основе сплава ПН 85-Ю-15 происходит снижение пористости с 17% в исходном состоянии до 5 - 8% после лазерной обработки (в 2,1 – 3,4 раза), для керамического покрытия Al_2O_3- 24,5 % в исходном состоянии до 15 – 18 % после лазерной обработки (в 1,4 – 1,6 раза). Очевидно, что интенсивность уменьшения пористости в результате воздействия лазерным излучением керамического покрытия Al_2O_3 значительно ниже чем у покрытия на основе сплава ПН 85-Ю-15. Это можно объяснить более высокими температурами плавления и кипения и более узким интервалом между ними для Al_2O_3 по сравнению со сплавом ПН 85-Ю-15, что приводит к сужению энергетического интервала воздействия лазерным излучением и усложняет практическую реализацию лазерной обработки керамического покрытия Al_2O_3. Кроме того, установлено, что наибольшее снижение пористости всех типов покрытий происходит в верхних

слоях с толщиной до 50 мкм. Наличие данного слоя с высокой плотностью препятствует проникновению агрессивных сред к металлической подложке.

Таким образом, получение в результате лазерного воздействия поверхностного слоя с более высокой плотностью позволяет сформировать покрытие с пористостью, изменяющейся по глубине, что обеспечит сочетание теплозащитных свойств покрытия и снижение вероятности проникновения агрессивных сред к металлической подложке.

Библиографический список

1. Кудинов В.В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977.- 184 с.

2. Пузряков, А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учебное пособие по курсу “Технология конструкций из металлокомпозитов” / А.Ф. Пузряков. – М.: Изд–во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 360 с.

3. Григорьянц, А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. Пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. Под ред. А.Г. Григорьянца.–М.: Изд–во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.–664 с.

4. Митрофанов, А.А. Обработка газотермических покрытий непрерывным излучением CO_2-лазера / А.А. Митрофанов, Е.А. Чащин / Вестник машиностроения №4, 2013.-С. 25-27.

УДК 621.891

Триботехнические возможности водных растворов оксикислот в паре трения бронза – сталь

Бурлакова В.Э., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, vburlakova@donstu.ru

Дроган Е.Г., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация: исследованы триботехнические возможности пары трения бронза – сталь в водных растворах оксикислот. Обнаружено, что при трении бронзы по стали в водных растворах молочной и гликолевой кислот образуются продукты износа, которые затрудняют процесс формированию на поверхности стального образца сервовитной пленки, в результате чего коэффициент трения снижается незначительно. С помощью сканирующей электронной микроскопии определен элементный состав пленки, формирующейся на поверхности стального диска при фрикционном контакте.

Ключевые слова: нанотрибология, продукты износа, сервовитная пленка, эволюция коэффициента трения, оксикислоты

Abstract: the tribological possibility of the friction pair bronze – steel in aqueous solutions of hydroxy acids were investigated. It has been found, that during friction of bronze on steel in aqueous solutions of lactic and glycolic acids are formed wear debris, which complicate the process of forming on the surface of the steel sample of the servovite film, resulting in friction coefficient decreases slightly. Using scanning electron microscopy determined the elemental composition of the film formed on the surface of the steel disc during the friction contact.

Keywords: nanotribology, products wear, servovite film, the evolution of coefficient of friction, hydroxy acids

Изучение длительной эволюции трибологических свойств классической трибосистемы «сплав меди - водный раствор глицерина - сталь» позволило установить в составе смазочной среды наличие продуктов окисления, содержащих различные функциональные группы, а также продукты неполного окисления глицерина [1-3].

В связи с этим представлялось интересным рассмотреть возможность использования оксикислот, содержащих одновременно в составе молекулы гидроксильную и карбоксильную функциональные группы, в качестве компонентов смазочных материалов, реализующих избирательный перенос при трении в паре бронза-сталь.

Целью настоящей работы является изучение триботехнических характеристик простейших представителей гомологического ряда оксикислот - молочной и гликолевой.

Трибологические исследования эволюции коэффициента трения проводили на машине трения торцевого типа АЕ – 5. В качестве смазочной среды выступали водные растворы гликолевой и молочной кислот различной концентрации.

Размеры частиц продуктов износа определяли с помощью седиментационного анализа на дисковой центрифуге марки CPSDiskCentrifugeDC24000 в водных растворах кислот.

Для установления элементного состава медной пленки использовали сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) TESCANMIRA 3 XMU. Определение элементов проводили с помощью программного обеспечения «AZtec 2.1», количественный расчет содержания элементов осуществляли с использованием опции нормализации элементов.

Изучение длительной эволюции коэффициентатрения, рис.1, в водных растворах молочной и гликолевой кислот в паре трения бронза-сталь обнаруживает его снижение, при этом коэффициенты трения не достигают значений, характерных для избирательного переноса,однако на поверхности фрикционного контакта образуетсясервовитная пленка.

Причиной обнаруженных в результате длительной эволюции достаточно высоких коэффициентов трения в водных растворах гликолевой и молочной кислот являются, по-видимому,специфические свойства оксикислот.Наличие в молекуле оксикислоты одновременно двухфункциональныхгрупп приводит к усилению их кислотных свойств, а также способствует образованию в зоне фрикционного контактав присутствии частиц износа (меди и железа)и кислорода воздухамуравьиной и щавелевой кислот, значительно повышающих pH смазочной среды, рис.1. Кроме того, наличие дополнительной электроноакцепторной группы вблизи кислотного центра в молекуле кислоты влечет за собой повышение кислотности соединения, в связи с чемгликолевая кислота проявляет в большей степени кислотные свойства.

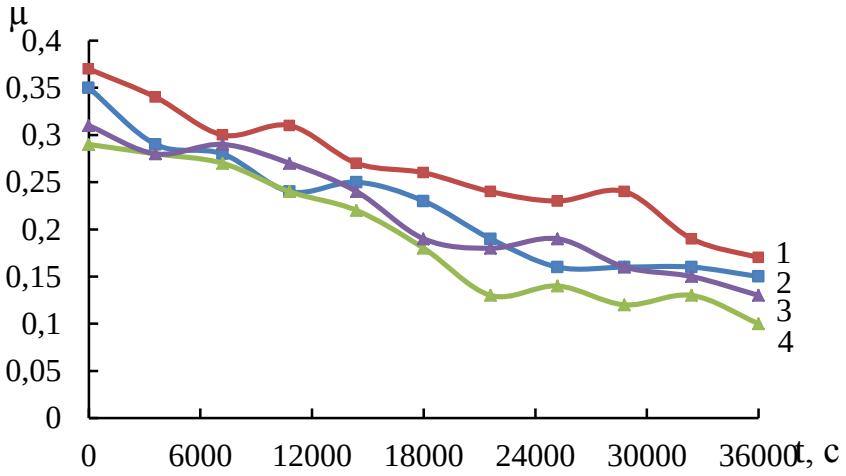
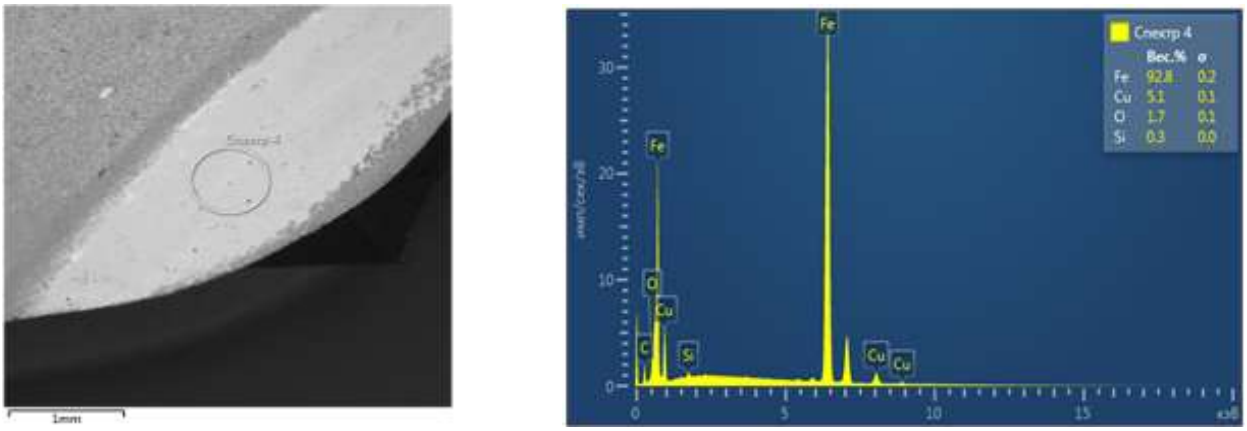


Рис.1 Эволюция коэффициента трения в системе «бронза – водный раствор оксикислоты – сталь» с концентрацией 0,1 моль/л – 1,2 и 0,2 моль/л – 3,4. 1, 3 – молочная кислота; 2,4 – гликолевая кислота

Поэтому исследование взаимосвязи природы органической компоненты в составе смазочной среды и коэффициента трения в системе «бронза – водный раствор оксикислоты – сталь» обнаруживает, в отличие от водных растворов многоатомных спиртов[1], увеличение коэффициента трения при увеличении количества атомов углерода в основной цепи молекулы оксикислоты.

Результаты седиментационного анализа представляют собой моно-и бимодальные кривые распределения по размерам частиц продуктов износа с явно выраженными максимумами, обусловленные наличием достаточно крупных и незначительного количества мелких частиц износа.

Исследование влияния концентрации молочной кислоты в составе смазочной композиции при трении бронзы по стали на размер частиц продуктов износа обнаруживает увеличение размера частиц продуктов износа при увеличении концентрации кислоты. Полученные результаты обусловлены тем, что увеличение концентрации кислоты в водном растворе при трении бронзы по стали, приводящее к увеличению pH раствора, способствует растворению мелкодисперсных частиц. Учитывая также, что α-оксикислоты склонны к образованию комплексных соединений при взаимодействии с Cu^{2+} в зоне фрикционного контакта, можно предположитьих участие в формировании сервовитной пленки [1].

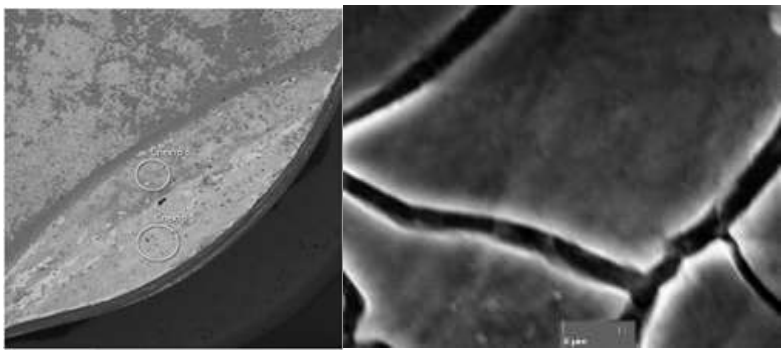


а б

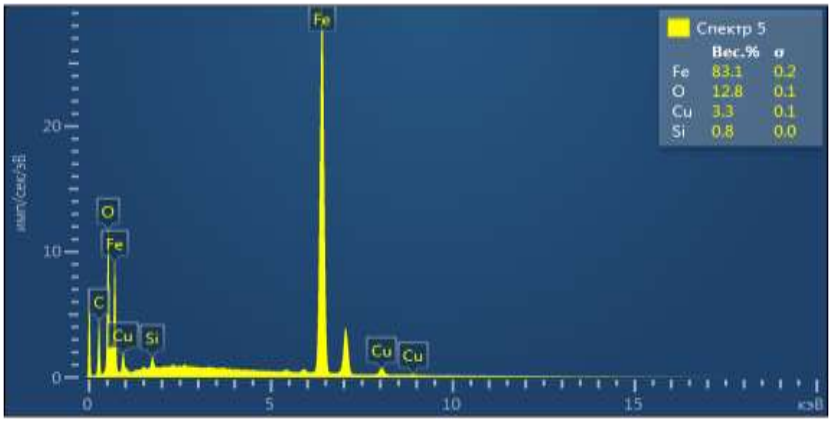
Рис. 2. Результаты СЭМ сервовитной пленки, полученной при фрикционном взаимодействии в системе бронза – водный раствор гликолевой кислоты - сталь». а – изображение сервовитной пленки на поверхности стального образца; б – EDS-спектр

Исследование с использованием СЭМ элементного состава медной пленки, образующейся при фрикционном взаимодействии пары трения бронза – сталь в водном растворе гликолевой кислоты, рис 2, обнаруживает достаточно плотную, гладкую медную поверхность, содержащую 5,1 % меди, и незначительное содержание кислорода, по-видимому, являющееся следствием его адсорбции на поверхности трения в водном растворе кислоты.

В то же время, при трении в водном растворе молочной кислоты, рис.3, дорожка трения представляет собой медную пленку, не покрывающую полностью поверхность стального образца, с визуально обнаруживаемой на меди растрескивающейся, полупрозрачной, по-видимому, полимерной пленкой полиэфиров, образующихся в результате полимеризации лактидов молочной кислоты. При этом содержание меди на поверхности стального образца незначительно, в то время как содержание кислорода достаточно высокое.



а



б

Рис. 3. Результаты СЭМ сервовитной пленки, образующейся в трибосистеме «бронза – водный раствор молочной кислоты - сталь» а – изображение сервовитной пленки на поверхности стального образца; б – EDS спектр

Таким образом, при трении бронзы по стали в водном растворе гликолевой кислоты, в отличие от молочной,формируется однородная медная пленка, образование которой приводит к большему снижению коэффициента трения, однако реализация избирательного переноса при трении пары бронза-сталь в водных растворах ни гликолевой, ни молочной кислот не обеспечивается.

Благодарности и признательности.

Часть исследований была выполнена на оборудовании РЦКП ДГТУ (nano.donstu.ru)

Библиографический список.

1. Бурлакова, В.Э. Трибоэлектрохимия эффекта безызносности/ В.Э. Бурлакова. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2005. – 209с.

2. Беликова М.А.: Электрохимические свойства поверхности трения при самоорганизации в условиях избирательного переноса: автореф. канд. техн. наук/ М.А.Беликова. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007. – 19 с.

3. Косогова, Ю.П. Нанотрибоэлектрохимические технологии при реализации эффекта безызносности в водно-спиртовых средах: автореф. канд. техн. наук/ Ю.П. Косогова. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2009. – 23 с.

УДК546.55/.59.546.04.544.169

Исследование взаимодействия атома меди и ее ионов с кислородсодержащими молекулами

Дроган Е.Г., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, c-si-ge@mail.ru
Кочергин Е. С., Воронежский педагогический университет, г. Воронеж, Россия, ev10011994@gmail.com
Милов А.А., Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону, Россия, aleksei_milov@list.ru

Аннотация. При помощи DFT расчетов методом pbepbe/lanl2dz были проанализированы комплексы атома и ионов меди со слабыми и средними по силе кислородсодержащими органическими и неорганическими кислотами и некоторыми основаниями (например, $Al(OH)_3$). Показано, что органические кислоты, независимо от ближайших заместителей, образуют контакт Cu-O исключительно карбонильным фрагментом. Образование хелатного комплекса с двумя заместителями приводит к более слабым структурам, что связано с близостью заместителей и невозможности обеспечения оптимальной геометрии для донирования электронной плотности с орбитали на орбиталь. В случае неорганических кислот наиболее прочное связывание идет с мета-фосфорной кислотой. Ортофосфорная кислота с медью образует менее стабильные комплексы по сравнению с кремниевой кислотой. Борная кислота дает наименее стабильные структуры из всех неорганических кислот. Гидроксид алюминия дает связи как Cu-O так и связь Al-Cu.

Ключевые слова: поверхность, нанокластер, медь, кислоты, механизм роста, теория функционала плотности, комплексообразование.

Abstract. Using DFT calculations by pbepbe/lanl2dz level analyzed complexes of atoms and ions of copper with weak to medium strength of oxygen-containing organic and inorganic acids and some bases (eg, $Al(OH)_3$). It is shown that irrespective of the organic acid substituents make Cu-O contact by the carbonyl oxigen. Formation of chelate complex with two substituents leads to a weak structure due to the proximity of deputies and the impossibility of ensuring the optimum geometry for the orbital-orbital of electron density donation. In the case of inorganic acids the most durable binding comes with metaphosphoric acid. Ortho-phosphoric acid with copper atom form less stable structure than with the cupper with silicon acid. Boric acid gives the least stable structures of all inorganic acids. Aluminum hydroxide gives the connection as a Cu-O bond and Al-Cu.

Keywords: surface, nanocluster, copper, acids, growth mechanism, density functional theory, complex.

Ранее было показано, что кислородсодержащие структуры эффективно взаимодействуют с поверхностью медных кластеров, при этом в ряде случаев именно кислородсодержащие молекулы используются для получения нанокластеров меди[1-2].

Для определения влияния электронного строения кислородного центра на стабилизацию комплексов с медью при помощи квантовохимических методов были исследованы структуры с реализацией межмолекулярного Cu···O контакта. Были исследованы следующие кислородсодержащие молекулы неорганических и органических кислот: уксусная кислота CH_3COOH, ее производные глицин и гликолевая кислоты NH_2-CH_2-COOHи HO-CH_2-COOH соответственно, а также неорганические кислоты борная H_3BO_3, угольная H_2CO_3, H_2SiO_3, фосфорные

кислоты HPO_3, H_3PO_4и гидроксид алюминия $Al(OH)_3$ Для сравнения, для некоторых кластеров меди рассчитаны комплексы с молекулярным кислородом.

Результаты расчетов методом функционала плотности PBEPBE с использованием псевдопотенциального базиса Lanl2DZ и программы Gaussian03 приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Данные расчета методом PBEPBE/Lanl2DZдля комплексов с контактом $Cu^{\bullet}\cdots O$.Приведены энергии комплексообразования (разность полных энергий комплекса и суммы полных энергий его компонентов) M-Xконтактов (в ккал/моль).

Молекула	Комплекс Cu¨молекула
CH_3COOH	12.50
NH_2-CH_2-COOH	11.92
HO-CH_2-COOH	12.40
H_3BO_3	12,39
$Al(OH)_3$	20.09
H_2SiO_3	35.54
HPO_3	56.26
H_3PO_4	28.92

Как показывают расчеты, органические кислоты реагируют с атомом меди только одним кислородным центром, при этом наиболее прочные структуры дает кислородный центр связанный двойной связью. При этом, органические кислоты образуют наименее стабильные комплексы с атомом и ионом меди. Также, следует отметить, что взаимодействие органических кислот с медью происходит только по одному кислородному атому карбонильной группы и не приводит к существенному изменению структуры растущих кластеров.

Переход к неорганическим кислотам приводит к хелатным структурам, где две функциональные группы кислоты взаимодействуют с атомом меди или ее ионом, при этом существенно увеличивается стабильность получаемых структур и существенно деформируется структура растущего кластера меди. Тенденции обнаруженные для комплексов нейтральной меди с молекулами содержащими азот полностью повторяются и при переходе к ионам.

Выводы

Исследование взаимодействие органических и неорганических кислот, а также амфотерных гидроксидов с поверхностью растущих кластеров меди показало, что изменяя добавки мы можем варьировать как механизм роста кластера, так и его структуру. При этом, неорганические

соединения, помимо изменения механизма роста кластера, прочно встраиваются в его структуру, изменяя его состав и свойства.

Библиографический список

1. Герасина Ю.С., Милов А.А., Кужаров А.А. Вестник ЮНЦ РАН, 2015, Т.11, № 2, с.23-29

2. Герасина Ю.С., Милов А.А., Кужаров А.А., Кужаров А.С. Инновации, экология и ресурсосберегающие технологии (ИНЭРТ-2014). Материалы XI Международного научно-технического форума. 2014. С. 718-722.

УДК 614.8.084:656.13:621.89.012.2-02

Влияние размера нанокластеров меди на триботехнические характеристики фрикционного контакта

*Кужаров А.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,*aakuzharov@donstu.ru

Герасина Ю.С., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Тищенко А.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Ломаченко[2] К.А., Южный федеральный университет г. Ростов-на-Дону, Россия

Солдатов А.В., Южный федеральный университет г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются возможность синтеза нанокластеров меди и использования их в качестве присадок к смазочным материалам. Звук электрохимическим методом получены нано частицы меди размером менее 100 нам. Методами динамического рассеяния света и атомно-силовой микроскопии определены размер и форма полученных нано частиц. Выявлено, что добавки нано частиц меди повышают триботехнические свойства базовых смазок.

Ключевые слова: нанокластеры меди**,** смазочные композиции, динамическое рассеяние света, атомно-силовая микроскопия, триботехнические свойства

Abstract. In article discusses the possibility of synthesis of nanoclusters of copper and application as additives to lubricants. By sonoelectrochemical methods nanoparticles of copper, smaller than 100 nm, have been obtained. By dynamic light scattering and atomic-force microscopy have been determined size and shape of nanoparticles. It was found that the addition of copper nanoparticles increase the tribological properties of the base greases.

Keywords: copper nanoclusters, lubricant compositions, dynamic light scattering, atomic force microscopy, tribological properties

В современной науке существует множество методов синтеза нанообъектов, которые разделены на два принципа под условными названиями: «сверху-вниз» и «снизу-вверх». По принципу «сверху-вниз» получение наночастиц происходит путем измельчения крупных объектов [1], а принцип «снизу-вверх» предполагает сборку нанокластеров за счет укрупнения атомов [2]. Именно последний путь обеспечивает получение наночастиц с малым распределением частиц по размерам, что само по себе представляет достаточно сложную технологическую задачу. Дальнейшее применение наночастиц зависит от того уникального набора свойств [3], которыми обладают частицы именно этого размера. Одной из областей их использования является нанотрибология, которая, используя особые физико-химические свойства нанокластеров металлов [4,5], позволяет реализовать различные эффекты, например, избирательного переноса [6] и металлоплакирования [7], для повышения долговечности трущихся деталей и механизмов за счёт использования функциональных наноматериалов триботехнического назначения [8]. Наиболее часто для этих целей

используется медь, обладающая рядом особенных свойств, что делает её крайне привлекательной для использования в качестве присадки к смазочным материалам.

Наночастицы меди были синтезированы по совмещенной звукоэлектрохимической технологии [9]. В качестве электролитов использовали водные растворы с добавкой стабилизатора – желатина. Выбор желатина обоснован его высокой каталитической активностью и превосходными стабилизирующими свойствами, что очень важно при синтезе наноматериалов. Электроды были выполнены из высококачественного металла с минимальными концентрациями примесей. Нанопорошки меди получали при различных значениях плотности тока (j= 6, 9, 12 мА/см^2) и количества стабилизатора (0,5, 1,0, 1,5 % по массе). Образование наночастиц меди в растворе определялось по изменению цвета раствора от бесцветного до темно-коричневого. В полученных коллоидных растворах наблюдали эффект Тиндаля, характерный для коллоидных систем, что подтверждает наличие в исследуемых дисперсиях наночастиц размером меньше длины волны лазерного излучения, т.е. меньше 650 нм, что также подтверждено результатами динамического рассеяния света. Было выявлено, что исследуемые коллоидные растворы имеют распределение частиц по размерам от 90 до 140 нм в зависимости от условий проведения синтеза (рис. 1). Исходя из объемного распределения частиц (МА) определено, что при одинаковом значении плотности тока увеличение размера частиц прямо пропорционально увеличению количества стабилизатора.

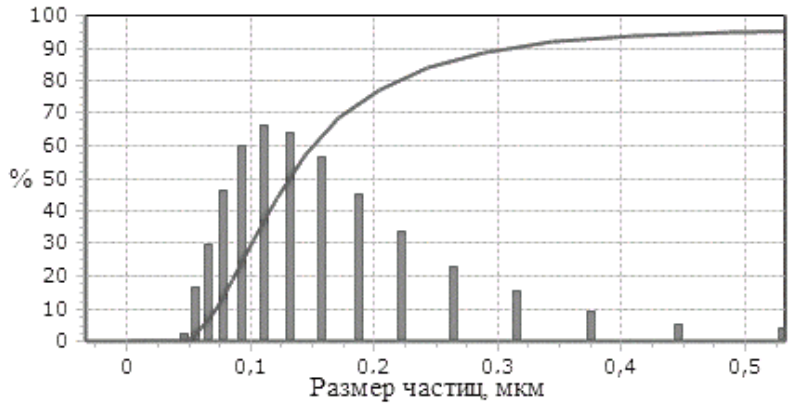


Рис. 1. Распределения по размерам наночастиц меди

В сериях экспериментов с разной концентрацией желатина наименьшие размеры частиц имели образцы, полученные при средних значениях плотности тока j= 9 мА/см^2. Наименьший средний размер частиц 93 нм был получен для образца, с минимальной концентрации стабилизатора и среднем значении плотности тока. Возможно, это связано с невысокой скоростью растворения анода, т.е. невысокой скоростью образования кластеров, и достаточным количеством стабилизатора. Наибольший средний размер частиц 138 нм был отмечен для образца, полученного при максимальных значениях плотности тока и концентрации желатина. Крупный размер наночастиц

меди можно объяснить тем, что при увеличении плотности тока, пропускаемого через раствор электролита, количества желатина не оптимально для стабилизации наноразмерных кластеров, что приводит к их агрегации и агломерации, а, соответственно, и к увеличению линейных размеров.

Для подтверждения результатов, полученных методом динамического рассеяния света, использовали атомно-силовую микроскопию (АСМ). Исследования проводились в полуконтактном режиме сканирования. Было выявлено, что синтезированные нанокластеры меди размером несколько сотен нанометров представляют собой агрегаты более мелких частиц размерами от 30 до 70 нм (рис. 2) сферической и эллипсоидной формы.

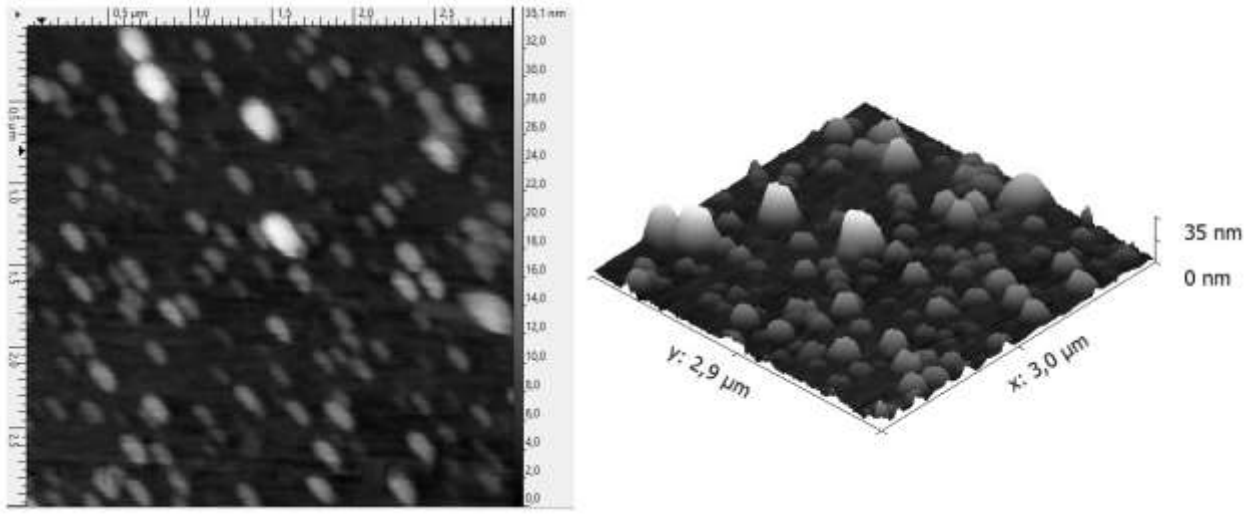


Рис. 2. АСМ-изображение нанокластеров меди

Для оценки триботехнических возможностей нанокластеров меди в составе смазочной композиции проводили испытания на четырехшариковой машине трения в соответствии с ГОСТ 9490-75. В качестве основы для смазочных материалов был использован глицерин, т.к. он имеет невысокие триботехнические характеристики. Полученные образцы нанопорошков меди использовались, как присадка, в концентрациях 2,5, 5 и 10% по массе.

Результаты трибоиспытаний выявили, что практически все образцы наномеди положительно влияют на антифрикционные свойства базового смазочного материала. Так, наибольшее снижение износа на 33% характерно для наночастиц меди с максимальным размером и концентрацией присадки 5 и 10%. Для большинства образцов был отмечен интересный эффект – одинаковый процент снижения износа для всех значений концентрации присадки. Возможно, это связано с достаточным количеством металлоплакирующего компонента, т.е. в определенный момент трения, после насыщения трущихся поверхностей медными частицами, происходит формирование защитной медной (сервовитной) пленки, что позволяет поддерживать значение износа на постоянном уровне без его увеличения. В некоторых случаях для достижения положительного эффекта достаточно добавить медных наночастиц в концентрации 2,5% по массе.

Кроме этого, выявлена зависимость триботехнических параметров смазочного материала от размера наночастиц: изменение диаметра частиц даже на 2 нм оказывает существенное влияние на диаметр пятна износа.

Отдельного рассмотрения заслуживают присадки с размерами структурных элементов 114 и 120 нм. Так, для наночастиц меди размером 114 нм в составе смазочной композиции положительный эффект наблюдается для всех концентраций. Однако, для 10%-ой концентрации значения ниже, чем для остальных. Возможно, это связано с избыточным количеством нанокластеров. В то же время, для нанокластеров размером 120 нм худшие показатели были отмечены для 2,5%-ой концентрации. Это может быть связано, наоборот, с недостаточной концентрацией металлоплакирующего компонента в составе смазочной композиции. Тем не менее, в большинстве случаев использование наночастиц меди в качестве присадки к смазочным материалам оказывает положительное влияние на триботехнические характеристики трибосистем.

Благодарности и признательности.

Часть исследований была выполнена на оборудовании РЦКП ДГТУ (nano.donstu.ru)

Библиографический список

1. C. Suryanarayana. Prog. Mater. Sci, 46, 1 (2001).
2. Кужаров А.С., Кужаров А.А., Державец Ю.С., Рыжов С.И. Синтез и определение размеров нанокластеров цинка триботехнического назначения// Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2011. № 4 (117). С. 231-233.
3. Wu Z., Jin R., nano Lett., 2010, 10, 2568-2573.
4. Кужаров А.С., Кужаров А.А., Нгуен Х., Шучев К.Г., Рыжкин А.А. Молекулярные механизмы самоорганизации при трении. Часть VIII. Физико-химические и функциональные свойства некоторых реметаллизантов современного рынка автохимии// Трение и износ. 2015. Т. 36. № 1. С. 62-69.
5. Кужаров А.С., Кужаров А.А., Нгуен Х., Лукьянов Б.С., Рыжкин А.А., Шучев К.Г., Солдатов А.В., Гуда А.А. Физико-химические и триботехнические свойства металлоплакирующих присадок "Nano doctor" и "Restore"// Наноинженерия. 2014. № 9 (39). С. 19-25.
6. Кужаров А.С., Кужаров А.А. Избирательный перенос: мифы и реалии// Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2011. № 4 (44). С. 43-51.
7. Кужаров А.С., Кужаров А.А. Еще раз и несколько иначе о металлоплакировании, ФАБО и безызносности// Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4. С. 742.
8. Кужаров А.С., Липкин М.С., Кужаров А.А., Липкин В.М., Нгуен Х., Шишка В.Г., Рыбалко Е.А., Лыткин Н.А., Мишарев А.С., Тулаева Ф.Р., Гайдар А.И. Зеленая трибология:

утилизация и переработка отработанных Ni-Cd аккумуляторов в функциональные наноматериалы триботехнического назначения// Трение и износ.2015. Т.36. №4. С. 400-407

9. Кужаров А.А. Триботехнические свойства нанометрических кластеров меди: Дис. … канд. техн. наук. Трение и износ в машинах. – ДГТУ – Ростов-на-Дону, 2004. – 173 с.

УДК 614.8.084:656.13:621.89.012.2-02

Синтез и триботехнические свойства нанокластеров серебра

*Кужаров А.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,*aakuzharov@donstu.ru
Герасина Ю.С., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Тищенко А.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. В статье рассматривается возможность синтеза нанокластеров серебра химическими и звукоэлектрохимическими методами. Изучены триботехнические характеристики смазочных композиций, содержащих наноразмерные частицы серебра. Выявлено положительное влияние, которое оказывают данные композиции на триботехнические свойства смазочных основ.

Ключевые слова: нанокластеры серебра, смазочные композиции, триботехнические свойства, трибология.

Abstract. Iin article discusses the possibility of synthesis of nanoclusters of silver by chemical and electrochemical methods at the ultrasonic field. Tribotechnical characteristics of lubricating compositions with nanoparticles of silver have been researched. The positive impact of these compositions on the tribological properties of lubricating bases have been revealed.

Keywords: nanoclusters of silver, lubricating composition, tribotechnical properties, tribology.

Пристальное внимание к наночастицам серебра связано с высокой перспективностью использования таких их свойств, как высокая каталитическая [1]и биохимическая активности [2], уникальные магнитные [3] и оптические свойства [4]. Всё это, в совокупности с физическими и химическими свойствами [5] делает наночастицы серебра очень привлекательным материалом для создания, в том числе и функциональных наноматериалов триботехнического назначения [6,7]. Это связано с тем, что серебро, находясь в одной подгруппе с медью, может оказаться неплохим плакирующим агентом в смазочной среде, что приведёт к повышению триботехнических свойств трибосистемы за счёт реализации эффекта избирательного переноса [8], приводящего к формированию на поверхностях трения сложных металлических и металлорганических плёнок из содержащегося в смазке металла [9].В данной работе были синтезированы нанокластеры серебра звукоэлектрохимическим и химическими методами, а также изучена их триботехническая эффективность.

1. Звукоэлектрохимический метод

Синтез заключается в электрохимическом растворении материала анода и восстановлении наночастиц серебра на катоде в растворе электролита в присутствии ультразвукового воздействия**.** В качестве электролитов при электролизе использовали водные растворы с добавкой стабилизатора – желатина.

По данным метода динамического рассеяния света было определено, что варьированием технологических параметров синтеза(плотность тока электролиза, количество стабилизатора) были получены наночастицы металлов в диапазоне от 40 до 750 нм.

Триботехническая эффективность нанокластеров серебра в составе смазочного материала (основа – глицерин) оценивалась в соответствии с ГОСТ 9490–75. Исследуемые образцы добавлялись в концентрациях 2,5, 5 и 10% по массе. Исследования показали, что практически во всех случаях наблюдались улучшения триботехнических свойств основы. Наилучший показатель снижения износа (21%) был зарегистрирован для образца, полученного при средних значениях плотности тока и концентрации стабилизатора. Интересные результаты были получены для нанокластеров серебра, содержащие частицы порядка 50 и 750 нм, для которых результаты трибологических исследований показали одинаковые значения для всех исследованных концентраций добавок. Возможно это связано с тем, что наночастицы серебра малого размера активно заполняют нанонеровности поверхности трущихся тел, а крупные частицы ускоряют процесс формирования защитной сервовитной пленки на поверхности трения, что приводит к снижению коэффициента трения и уменьшению износа.

2. Цитратный метод

Цитратной метод является химическим методом получения наночастиц серебра, в котором восстановителем и стабилизатором является цитрат-ион. Стоит отметить, что важную роль при синтезе играет температура реакции и скорость перемешивания раствора. Химизм реакций представлен ниже:

$3Na_3C_6H_5O_7 + 6AgNO_3 \rightarrow 6Ag + 3Na_2C_5H_4O_5 + 3CO_2 + 3NaNO_3 + 3HNO_3$.

По данной реакции, варьируя концентрации цитрат-ионов, были получены нанодисперсии с различными размерами структурных единиц. Образование нанокластеров металла определялось по изменению окраски растворов: с бесцветного на желтый.

Для исследования триботехнических параметров синтезированные нанодисперсии серебра добавлялись в концентрациях 2,5, 5 и 10% по объему. Было отмечены повышение триботехнических характеристик до 40%.

3. Борогидридный метод

В случае борогидридного синтеза нанокластеров серебра в роли восстановителя-стабилизатора выступает борогидрид натрия. В этом методе синтеза важно проводить эксперимент без нагревания. В данной работе осуществлялся синтез нанокластеров серебра по реакции:

$AgNO_3 + NaBH_4 \rightarrow Ag + H_2 + B_2H_6 + NaNO_3$.

Цвета растворов в процессе синтеза изменялись с бесцветного на желтый. По результатам седиментационного анализа было выявлено, что в полученных дисперсиях металлов содержатся

частицы от нескольких нм до 1 мкм. Выявлена обратно пропорциональная зависимость между размерами синтезированных нанокластеров серебра и количеством восстановителя-стабилизатора: чем выше концентрация борогидрида натрия, тем меньше размер наночастиц. Триботехнические испытания показывают улучшение противоизносных свойств для нанокластеров серебра до 49%.

4. Совмещенная цитрат-борогидридная технология

Восстановление наночастиц металла до элементного состава происходило борогидридом натрия, а стабилизация имеющимися в растворе цитрат-ионами. Синтез осуществлялся при комнатной температуре.

В результате варьирования концентрациями борогидрида и цитрата натрия были получены коллоидные растворы серебра с размерами частиц от 60 до 100 нм.

Триботехнические испытания полученных наночастиц отмечают положительный эффект для 10% концентрации нанокластеров серебра в составе смазочной композиции, что проявляется в уменьшении износа на 36%. Однако, в ряде случаев наблюдалось и ухудшение триботехнических характеристик смазочной основы.

Таким образом, практически для всех образцов, полученных различными методами, наблюдалось повышение триботехнических характеристик смазочных материалов. Определено, что одним из важнейших факторов, влияющим на триботехнические свойства, является количество добавляемых наночастиц. Варьированием концентрации нанокластеров можно, как и улучшить, так и ухудшить триботехнические свойства основы.

Благодарности и признательности.

Часть исследований была выполнена на оборудовании РЦКП ДГТУ (nano.donstu.ru)

Библиографический список.

1. Сергеев Г.Б. Нанохимия. 2-е изд. - 2007. - 336 с.
2. Wu Z., Jin R., nano Lett., 2010, 10, 2568-2573.
3. Баранов Д. А., Губин С. П. Магнитные наночастицы: достижения и проблемы химического синтеза. Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии, №1-2, Т.1, 2009.
4. Крутяков Ю. Ф., Кудринский А.А., Оленин А.Ю., Лисичкин Г.В.. Успехи химии, 77 242 (2008).
5. Кужаров А.С., Кужаров А.А., Нгуен Х., Агеев О.А., Коноплев Б.Г., Рыжкин А.А., Шучев К.Г., Нгуен В.Т. Исследование физико-химических свойств и триботехнической эффективности наночастиц мягких металлов и их смесей в вазелиновом масле//Наноинженерия. 2013. № 5 (23). С. 43-48.
6. Кужаров А.С., Кужаров А.А., Нгуен Х., Шучев К.Г., Рыжкин А.А. Молекулярные механизмы самоорганизации при трении. Часть VIII. Физико-химические и функциональные

свойства некоторых реметаллизантов современного рынка автохимии// Трение и износ. 2015. Т. 36. № 1. С. 62-69.

7. Кужаров А.С., Кужаров А.А., Нгуен Х., Лукьянов Б.С., Рыжкин А.А., Шучев К.Г., Солдатов А.В., Гуда А.А. Физико-химические и триботехнические свойства металлоплакирующих присадок "Nano doctor" и "Restore". Наноинженерия. 2014. № 9 (39). С. 19-25.

8. Кужаров А.С., Кужаров А.А. Избирательный перенос: мифы и реалии// Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2011. № 4 (44). С. 43-51.

9. Кужаров А.С., Кужаров А.А. Еще раз и несколько иначе о металлоплакировании, ФАБО и безызносности// Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4. С. 742.

УДК 621.893

Трибологические свойства магнитной жидкости

Задошенко Е.Г., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, zadoshenkoq@rambler.ru

Бурлакова В.Э., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Аннотация. Целью данной работы является конструирование магнитных жидкостей на основе наночастиц магнетита и изучение их триботехнических характеристик. Для магнитных жидкостей использовали базовые основы глицерин, олеиновую кислоту и вазелиновое масло, а в качестве добавки 0,5 % масс. стабилизированный наночастиц, полученных методом химической конденсации. Трибологические исследования проводили на четырехшариковой машине трения. Экспериментально установлено, что наночастицы магнетита в исследумых магнитных жидкостях способствуют улучшению противоизносных и противозадирных свойств по сравнению с базовыми основами. Различие триботехнические характеристики магнитной жидкости определяются не только наличием наночастиц магнетита, но природой базовой основы. Наилучшими противоизносными и противозадирными характеристиками обладает магнитная жидкость на основе олеиновой кислоты и 0,5 % масс. магнетита.

Ключевые слова: трение, износ, магнитные наночастицы, смазка, противоизносные и противозадирные свойства.

Abstract. The purpose of this work are construction of magnetic fluid on basis of nanoparticles of the magnetite and study theirs tribotechnical behaviors. For lubricating composition used as basics glycerin, oleic acid, petrolatum oil and as additives 0.5 % mass stabilized magnetite nanoparticles were obtained by the method of chemical condensation. Tribological research of this lubricates conducted to four-ball machine. It has been found experimentally that presence of the magnetite nanoparticles in the studied magnetic fluid advantages improvement antiwear and antiwelding properties as compared with basics liquid. The difference of a tribotechnical characteristics of the magnetic fluid are determined not only availability magnetite nanoparticles but also nature of the basics liquid. Optimal of antiwear and antiwelding behaviors have magnetic fluid on basis of oleic acid with 0,5% mass. magnetite.

Keywords: friction, wear, ferromagnetic nanoparticles, lubricant, antiwear and antiwelding properties.

Магнитные жидкости представляют собой многокомпонентную систему, включающую магнитные наночастицы (от 2 до 100 нм), стабилизатор и жидкость-носитель [1, 2]. Они находят широкое применение в технических устройствах в качестве герметизирующих и смазочных материалов [3-5]. Эксплуатационные свойства магнитных жидкостей зависят от состава дисперсионной среды, типа стабилизатора, концентрации и природы магнитных частиц, особенностей технологии их получения. Конструирование магнитных жидкостей, работающих в режиме граничной смазки, и изучение особенностей их поведения в зоне трибоконтакта является актуальным.

В связи с этим целью данной работы является конструирование магнитных жидкостей на основе наночастиц магнетита и изучение их триботехнических характеристик.

В исследуемых магнитных жидкостях в качестве базовых основ использовали: глицерин (хч), вазелиновое масло (ГОСТ 3164-78), олеиновую кислоту (хч), а в качестве добавки - 0,5% масс. стабилизированных наночастиц магнетита.

Наночастицы магнетита синтезировали методом химической конденсации [6, 7], в основе которого лежит процесс осаждения солей двух – и трехвалентного железа концентрированным водным раствором аммиака:

$2FeCl_3 + FeCl_2 + 8NH_4OH = Fe_3O_4 + 8NH_4Cl + 4H_2O$

Реакцию проводили при соотношении солей Fe^{+3}/Fe^{+2} 2:1, при 1,5 кратном избытке гидроксида аммония. Полученный осадок магнетита промывали декантацией до нейтральной реакции (pH от 6 до 7). Стабилизацию проводили с помощью добавления смеси олеиновой кислоты и гексана.

Трибологические исследования смазочных композиций проводили по ГОСТу 9490–75 [8].

Проведенные трибологические испытания на четырехшариковой машине трения (ЧШМ) в течение 60 минут позволили определить значение диаметра пятна износа $D_и$, характеризующее противоизносные свойства смазки (таблица 1).

Таблица 1.

Результаты 60 минутных испытаний на четырехшариковой машине трения

ссследуемая смазк	состав смазки	иаметра пятна износа $D_и$ мм
смазка 1	Глицерин + 0,5% наночастиц магнетита	0,18
смазка 2	Чистый глицерин	0,35
смазка 3	Вазелин +0,5% наночастиц магнетита	0,266
смазка 4	Чистый вазелин	0,47
смазка 5	Олеиновая кислота+0,5% наночастиц магнетита	0,23
смазка 6	Чистая олеиновая кислота	0,43

Анализ полученных данных показывает, что при наличии наночастиц магнетита $D_и$ характеризуется более низкими значениями, чем значения $D_и$в чистых базовых основах. Этот факт свидетельствут о том, что добавка магнетита способствует улучшению противоизностных свойств базовых смазок.

Проведенные трибологические испытания сконструированных магнитных жидкостей в течение 10 с на четырехшариковой машине трения, позволили определить критическую нагрузку $P_к$ и установить предельную работоспособность смазки по нагрузке сваривания $P_с$ (рис.2). Как видно из представленной гистограммы, различия триботехнических характеристик обусловлены не только наличием магнетита в магнитных жидкостях, но и природой базовой основы. Так, наибольшие значения $P_к$ и $P_с$ характерны для магнитной жидкости на основе олеиновой кислоты и наночастиц магнетита, что указывает на повышение ее работоспособности.

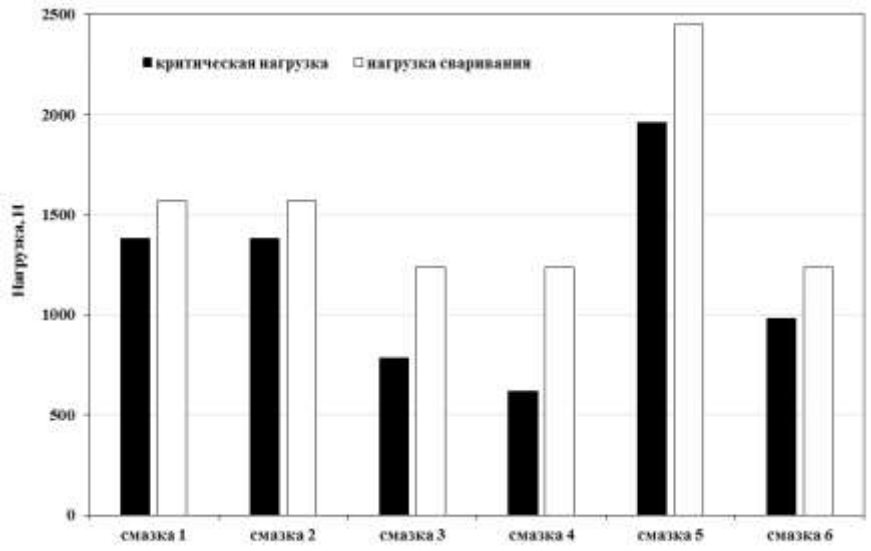


Рис. 2. Гистограмма значений критической нагрузки и значений нагрузки сваривания для исследуемых магнитных жидкостей

В случае глицерина данные триботехнические характеристики остаются неизменными. При использовании в качестве основы вазелинового масла критическая нагрузка магнитной жидкости увеличилась, а нагрузка сваривания не изменилась. Такие различия в триботехнических характеристиках можно объяснить силами межмолекулярного взаимодействия дисперсионная среда-стабилизатор, которые наиболее ярко проявляются между глицерином и олеиновой кислотой [1, 2].

Таким образом, результаты трибологических испытаний показали, что наночастицы магнетита в исследумых магнитных жидкостях способствуют улучшению противоизносных и противозадирных свойств по сравнению с базовыми основами. Установлено, что наилучшие триботехнические характеристики имеет магнитная жидкость на основе олеиновый кислоты и наночастиц магнетита.

Библиографический список.

1. Фертман, В.Е. Магнитные жидкости: справочное пособие /В.Е. Фертман. - Минск: Высшая школа, 1988. - 184 с.

2. Такетоми, С., Тикадзуми, С. Магнитные жидкости: пер. с японск. М.: Мир, 1993. – 272 с.

3. Tang, Z., Sheng, P. Nano science and technology: Novel structures and phenomena.- New York: Taylor and Francis, 2003. - 272 p.

4. Задошенко, Е.Г., Бурлакова, В.Э. Изучение влияние ферромагнитных наночастиц на триботехнические характеристики смазок. /Е.Г. Задошенко, В.Э.Бурлакова // Вестник Донского государственного технического университета. - 2015. – Т.15. - № 1. - С. 85-92.

5. Burcan, J. Recent trends in use of magnetic fluids. / J. Burcan // Indian journal of engineering and materials sciences. – 1998.- vol. 5. - iss. 6. - pp. 390-395.

6. Elmore, W. C. Ferromagnetic Colloid for Studying Magnetic Structures. / W. C. Elmore //Physical Reviw. – 1938. - vol. 54. - no.5. - pp. 309-310.

7. Martinez-Mera, I., Espinoza-Peaqueira, M.E., Perez-Hernandez, R., Arenas-Alatorre, J. Synthesis of magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles without surfactants at room temperature. /I. Martinez-Mera, M.E. Espinoza-Peaqueira, R. Perez-Hernandez, J. Arenas-Alatorre // Materials Letters. – 2007.-vol. 61. - iss. 23-24. - pp. 4447-4451.

8. ГОСТ 9490-75. Метод определения трибологических характеристик на четырехшариковой машине. – Введ. 1987-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 5 с.

УДК 621.893

Исследование противоизносных свойств смазки ЦИАТИМ-201, модифицированной наночастицами никеля

Задошенко Е.Г., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, zadoshenkoq@rambler.ru

Бурлакова В.Э., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Аннотация. В работе изучены противоизносные и противозадирные свойства смазки ЦИАТИМ-201 с наночастицами никеля, полученные пиролизом соли формиата никеля. Характеристики полученных наночастицы никеля анализировались с помощью рентгенофазного, седиментационного анализов и сканирующей туннельной микроскопии. На основе синтезированных наночастиц никеля и базовой смазки ЦИАТИМ-201 создавали смазочные композиции с содержанием в них никеля от 0,1; 0,5; 1; 5; 16 % масс. Трибологические исследования смазочных композиций проводили на четырехшариковой машине трения. Установлено, что введение синтезированные наночастицы никеля в базовую смазку ЦИАТИМ-201 приводит к повышению ее противоизносных и противозадирных характеристик. Увеличение концентрации наночастиц никеля в пластической смазке ЦИАТИМ-201 способствует росту ее несущей способности и позволяет использовать в области сверхвысоких давлений.

Ключевые слова: трение, износ, наночастица, никель, пластическая смазка, присадка, противоизносные и противозадирные свойства.

Abstract. Antiwear and antiwelding properties of general-purpose lubricant “ZIATIM-201”with the obtained nanoparticles of nickel by decompose of formate nickel were study in the work. A behavior of the obtained nanoparticles of nickel are analyze by X-ray diffraction, sedimentation analysis and scanning tunnel microscopy.A lubricates for tribological research are made on basis of lubricate ZIATIM-201 with synthesized nanoparticle nickel 0,1; 0,5; 1; 5; 16% mass. Tribological research of this lubricates conducted to four-ball machine. It has been found experimentally that introduction of asynthesized nanoparticle nickel in the basis of lubricate ZIATIM-201 is sending up increase its antiwear and antiwelding behaviors. The increase concentration of nanoparticles of nickel in general-purpose lubricant “ZIATIM-201” conduce to development its load-carrying capacity and allow to employ in extreme pressure conditions.

Keywords: friction, wear, nanoparticles, nickel, general-purpose lubricant, additive antiwear and antiwelding properties.

Для обеспечения оптимального функционирования узлов трения используются смазочные материалы, модифицированные наночастицами металлов и их оксидами. Экспериментальные исследования [1-3] показывают, что смазки с добавками наночастиц в значительной степени повышают противоизносные свойства смазок и их несущую способность. Как установлено в работах [2, 3], противоизносный механизм действия наночастиц связан с упрочнением и сглаживанием поверхностных слоев, а также с формированием устойчивых разделительных слоев, обладающих высокой смазочной способностью и реологическими характеристиками. Анализ литературных

данных [4-9] показывает, что в основном исследования ориентированы на изучение трибологических свойств смазок в зависимости от природы, вида, размеров и концентрации наночастиц в смазках.

Целью данной работы является изучение противоизносных и противозадирных свойств смазки ЦИАТИМ-201 с наномодификаторами частиц никеля, полученных пиролизом формиата никеля.

Наночастицы никеля получали термическим разложением прекурсора при температуре 260°С в атмосферных условиях. В качестве прекурсора использовали формиат никеля, синтезированный на основе реакцией обмена между сульфатом никеля $NiSO_4$ (х.ч. ГОСТ 4465-61) и карбонатом натрияNa_2CO_3 (х.ч. ГОСТ 83-79), а затем между карбонатом никеля и муравьиной кислотой (HCOOH-85% ГОСТ 5848-73). Для уточнения состава прекурсора и наночастиц металла проводили рентгенофазовый анализ с помощью прибора ARLX´TRA. Идентификацию фаз осуществляли с использованием баз данных PDF-2.Для определения размеров и формы частиц никеля применяли седиментационный анализ и сканирующую туннельную микроскопию. На основе синтезированных наночастиц никеля и базовой смазки ЦИАТИМ-201 создавали смазочные композиции с содержанием в них никеля от 0,1; 0,5; 1; 5; 16 % масс. Трибологические исследования полученных смазочных композиций проводили на четырехшариковой машине трения по ГОСТу 9490-75, где были установлены их противозадирные свойства на основе критической нагрузке заедания $P_к$, нагрузки сваривания $P_с$ и индексу задира $И_з$.

Используемый способ получения и разложения формиата никеля является простым, универсальным методом получения наночастиц никеля:

$NiSO_4 + Na_2CO_3 = NiCO_3 + Na_2SO_4$(1)

$NiCO_3 + 2HCOOH = Ni\ (HCOO)_2 + H_2O + CO_2$(2)

$Ni(HCOO)_2 = Ni + 2CO_2 + H_2$(3)

Проведенные результаты рентгенофазового анализа показали, что в процессе синтеза были получены прекурсор состава $(HCOO)_2Ni{\cdot}2H_2O$, а при его разложении образуется порошок никеля.

Размер и форма частиц является важной характеристикой кристаллических порошков и определяет их физические характеристики. Результаты седиментационного анализа и сканирующей туннельной микроскопии позволили установить, что основная масса синтезированных наночастиц никеля имеет эллипсообразную форму (рис.1) и размер от 20-30 нм.

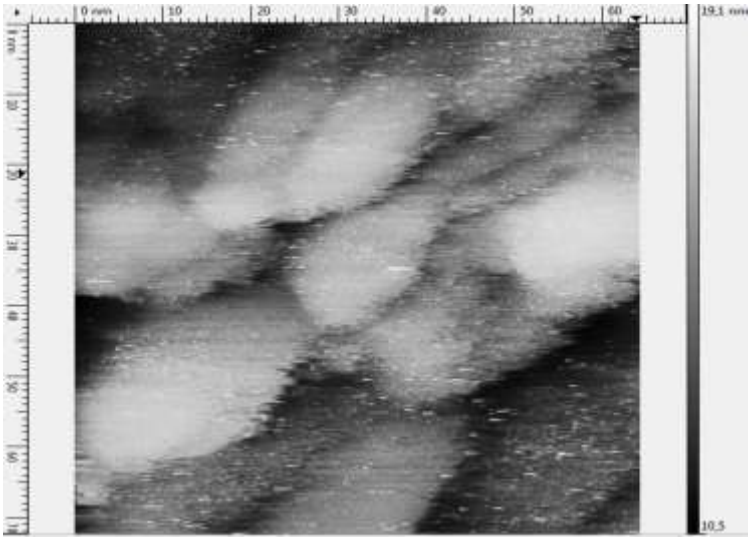


Рис.1. Топография поверхности частиц никеля, полученных пиролизом формиата никеля, размером 64 нм × 72 нм

Результаты серий 10 секундных испытаний представлены при нагрузках от 392 Н до нагрузки сваривания на рис.2. Как видно из данных (рис.2) кривые заедания смазок при наличие наночастиц никеля имеют вырожденный характер по сравнению со смазкой ЦИАТИМ-201. Это свидетельствует о том, что присутствие частиц никеля в смазках расширяет диапазон нагрузок, при которых не наблюдается процесс задира. С ростом концентрации никеля этот диапазон нагрузок увеличивается.

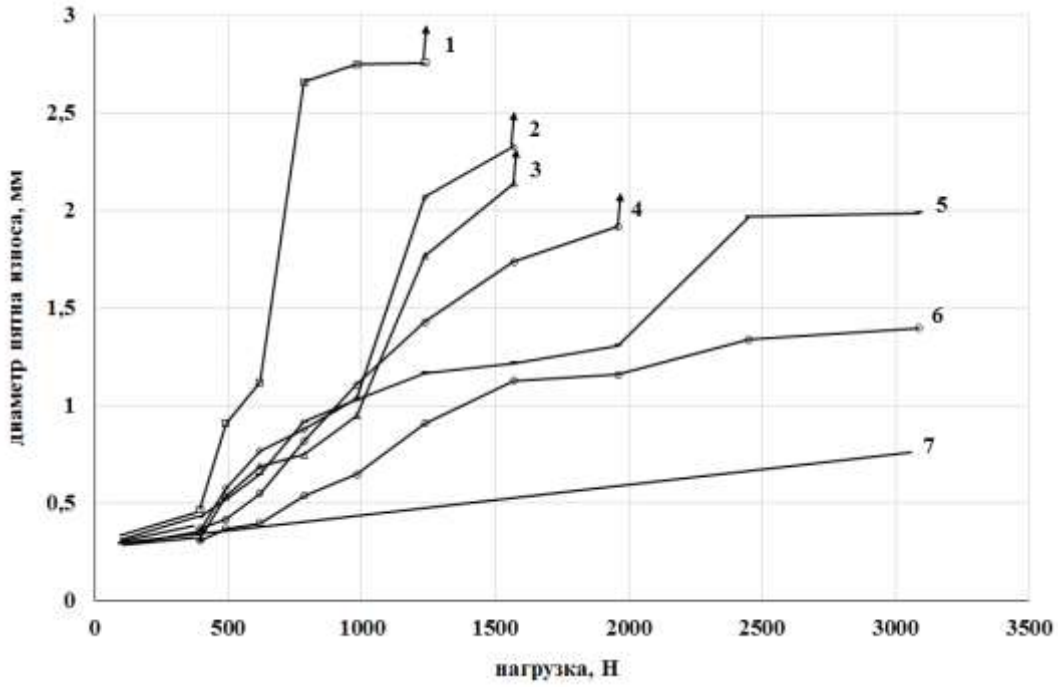


Рис. 2. Зависимость диаметра пятна износа от нагрузки для смазок:
1 – ЦИАТИМ-201, 2 – ЦИАТИМ-201 с добавкой никеля 0,1% мас.,3 – ЦИАТИМ-201 с добавкой никеля 0,5% мас., 4 – ЦИАТИМ-201 с добавкой никеля 1% мас., 5 – ЦИАТИМ-201 с добавкой никеля 5% мас., 6 – ЦИАТИМ-201 с добавкой никеля 16 % мас., 7 – расчетная линия Герца.

Другие триботехнические характеристики смазок (диаметр пятная износа $D_и$, критическая нагрузка $P_к$, нагрузка сваривания $P_с$ и расчет индекса задира $И_з$ (таблица1)) также подтверждают, что присутствие наночастиц никеля в смазках приводит к повышению противоизносных свойств смазки ЦИАТИМ-201 и ее несущей способности.

Таблица 1. Триботехнические показатели исследуемых смазок

Триботехнические характеристики	ЦИАТИМ-201	ЦИАТИМ-201 с добавками наночастиц никеля, мас. %				
		0,1	0,5	1	5	16
$D_и$, мм	0,74	0,67	0,60	0,570	0,55	0,50
$P_к$, Н	490	500	540	660	784	980
$P_с$, Н	1250	1960	1960	2450	-	-
$И_з$	17,25	23,81	24,65	28,09	40,84	69,42

Улучшение триботехнических характеристик смазок с синтезированным никелем связано с тем, что наночастицы никеля, обладающие высокой поверхностной энергией, формируют с компонентами смазки устойчивые разделительные слои, которые обладают высокой стойкостью к разрушению под действием контактных давлений, температуры снижают износ и препятствуют задиру [3].

Таким образом, введение синтезированных наночастиц никеля в базовую смазку ЦИАТИМ-201 приводит к повышению ее противоизносных и противозадирных характеристик. Увеличение концентрации наночастиц никеля в пластической смазке ЦИАТИМ-201 способствует росту ее несущей способности и позволяет использовать в области сверхвысоких давлений.

Благодарности и признательности.

Часть исследований была выполнена на оборудовании РЦКП ДГТУ (nano.donstu.ru)

Библиографический список.

1. Patil, Sangram J., Patil, D. P., Shrotri, A. P., Patil, V P. A review on effect of addition of nanoparticles on tribological properties of lubricants. / Sangram J. Patil, D. P. Patil, A. P. Shrotri, V.P. Patil. //International Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2014.- vol. 5.- iss. 11. -pp. 120-129.

2. Chou,R., Hernández Battez, A., Cabello, J.J., Viesca, J.L.' Osorio, A., Sagastume, A. Tribological behavior of polyalphaolefin with the addition of nickel nanoparticles. / R. Chou, Battez A. Hernández, J.J. Cabello,J.L. Viesca,A. Osorio,A.Sagastume. //Tribology International. – 2010. - vol. 43. - iss.12. - pp. 2327–2332.

3. Люты, М., Методология создания смазочных материалов с наномодификаторами / М. Люты, Г.А. Костюкович, А.А. Скаскевич // Трение и износ. - 2002. – Т.25.- №4.- С.411-424.

4. Задошенко, Е.Г., Бурлакова, В.Э. Влияние нанопорошков никеля на триботехнические характеристики пластичной смазки /Е.Г. Задошенко, В.Э. Бурлакова //

Материалы XII международной научно-практической конференции «Проблемы синергетики в трибологии, трибоэлектрохимии, материаловедении и мехатроники, Новочеркасск: ЮРГРУ(НПИ).- 2013 – С.28-30.

5. Y.Y. Wu, W.C. Tsuia, T.C. Liub. Experimental analysis of tribological properties oflubricating oils with nanoparticle additives. / WuY.Y., TsuiaW.C., LiubT.C. //Wear - 2007.- vol.262. - iss. 7–8. – pp. 819–825.

6. H.L. Yu, Y. Xu, P.J. Shi, B.S. Xu, X.L. Wang, Q. Liu, H.M. Wang. Characterization and nanomechanical properties of tribofilms using Cu nanoparticles as additives./Yu H.L., XuY., ShiP.J., XuB.S., WangX.L., LiuQ., WangH.M. //Surface and Coating Technology - 2008. – vol. 203. – iss.- 1–2.- pp. 28–34.

7. Y. Choi, C. Lee, Y. Hwang, M. Park, J. Lee, C. Choi, M. Jung. Tribological behavior of copper nanoparticles as additives in oil /ChoiY., LeeC., HwangY., ParkM., LeeJ., ChoiC., JungM. //Current Applied Physics – 2009. - vol. 9.- iss. 2. – pp. 124–127.

8. Y.Zhao, Z. Zhang, Z. Wu, H. Dang. Tribological properties of Pb nanoparticle in oil./ Zhao Y., Zhang Z., Wu Z., Dang H.// Chinese Journal of Chemical Physics – 2004. – vol.17. – pp. 171–174.

9. B. Li, X. Wang, W. Liu, Q. Xue. Tribochemistry and antiwear mechanism of organic–inorganic nanoparticles as lubricant additives. / Li B., Wang X., Liu W., Xue Q.//Tribology Letters – 2006. – vol. 22. – pp.79–84.

УДК 621.893

Использование комплексов f-металлов для регулирования триботехнических свойств металлоплакирующих смазок

*Хохлов А.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,*hohlov.an@yandex.ru

Любченко С.Н., Южный федеральный университет г. Ростов-на-Дону, Россия

Кравченко В.В., Южный федеральный университет г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Исследована возможность использования хелатных соединений f-металлов как металл-содержащие присадки к смазочным материалам. Проведены сравнительные испытания триботехнических свойств смазочных композиций, основанных на минеральном масле с добавлением синтезированной систематической серии внутрикомплексных соединений лантаноидов. Обнаружен положительный эффект. Анализ полученных результатов позволяет лишь отметить тот факт, что лучше всего себя проявил комплекс Ho (f^{10}), а самые худшие результаты (Gd, Lu) соответствуют ионам Ln^{+3}, у которых или наполовину, или полностью заполнена f-оболочка.

Ключевые слова: трение, износ, смазочные материалы, комплекс, лиганд, лантаноид, f-металлы.

Abstract. Investigated the possibility of using chelate compounds f-metals as metal-containing lubricating oil additives. Comparative tests of tribological properties of lubricating compositions based on mineral oil with the addition of a systematic series of complexes of the lanthanides. Found a positive effect. It is noted that the worst variant showed additive Ln+3, which is half or completely filled f-sublevel

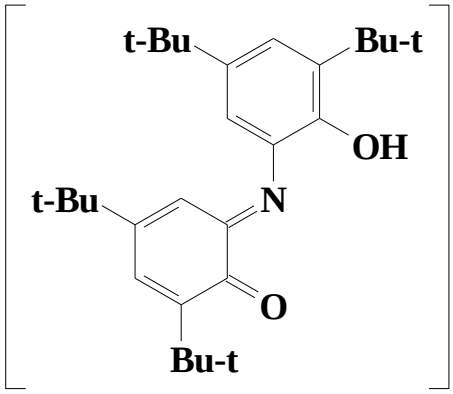
Keywords: friction, wear, lubricants, complex, ligand, lanthanide, f-metal

Исследование механизма избирательного переноса, его закономерностей и областей применения, привело к некоторому изменению устоявшихся ранее взглядов на ряд вопросов триботехники: структуру и свойства тонких поверхностных слоев трущихся деталей, механизм изнашивания и смазочного действия, пути создания смазочных материалов и присадок к ним, оптимальную структуру и свойства износостойких и антифрикционных материалов и приработочных покрытий и т. д. Один из способов решения этой проблемы — разработка и использование металлоплакирующих смазочных материалов, реализующих эффект безызносности. Целью настоящей работы является исследование возможности применения комплексных соединенийf-металлов для улучшения триботехнических свойств смазок.

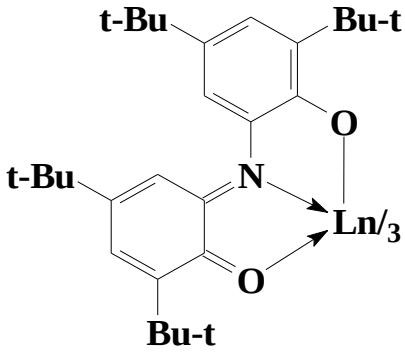
Анализ литературных данных по изучению возможностей применения внутрикомплексных соединений (ВКС) лантаноидов (f–металлов) в смазочных материалах показывает практически полное отсутствие информации по данному вопросу.

В качестве металлосодержащих добавок использовался представительный ряд координационных соединений ML_3 на основе хелатирующего лиганда (HL).

В качестве основы использовали вазелиновое масло. Вазелиновое масло является чистым по своему составу, не содержащим других компонентов, смазочным материалом и обладает слабыми триботехническими свойствами, благодаря которым можно с достаточной точностью выявлять влияние вводимых компонентов (комплексов).



HL



ML_3

где M=Ln(III) = Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu.

Для подбора оптимальной концентрации ВКС в качестве добавки в вазелиновое масло использовался комплекс европия (III) (EuL_3), при которой оценочными параметрами были выбраны нагрузка сваривания и средний диаметр пятна износа (ГОСТ 9490-75**).**

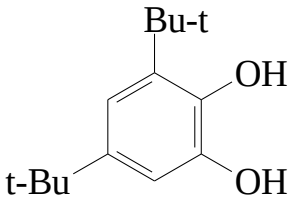
Было установлено, что нагрузка сваривания увеличивается при возрастании концентрации комплекса нелинейно: сначала от 0 до 0.5 %резко возрастает, затем в диапазоне 0.5–1 % не изменяется, а на последнем участке рост P_C замедляется.

Ввиду того, что диаметры износа (d) для концентрации 1 % оказались меньшими, в дальнейшем она и использовалась во всех триботехнических экспериментах.

Часовые испытания на комплексе тербия (TbL_3) подтверждают правильность выбора 1 % концентрации.

Результаты проведенных исследований показывают, что дальнейшее увеличение (выше 1 %) концентрации ВКС в вазелиновом масле приводит к непропорциональному улучшению свойств смазки.

Корректный анализ результатов десятисекундных испытаний предусматривает сравнение характеристик систем, включающих не только чистую основу, но и содержащую добавки, в том числе и лиганд, на базе которого получены комплексы. Ввиду того, что лиганд HL невозможно выделить в свободном состоянии, вместо него использовался *трет*-бутилированный пирокатехин, который применяется при синтезе комплексов:



Нагрузка сваривания у всех СМ, содержащих лантаноидные ВКС, одинаковая и превосходит таковую на 412 Н, в отличие от вазелинового масла с добавкой органического компонента, для которой прирост составляет только 255 Н. Этот факт косвенно свидетельствует о том, комплексные соединения вносят дополнительный вклад в увеличение предельной нагрузки.

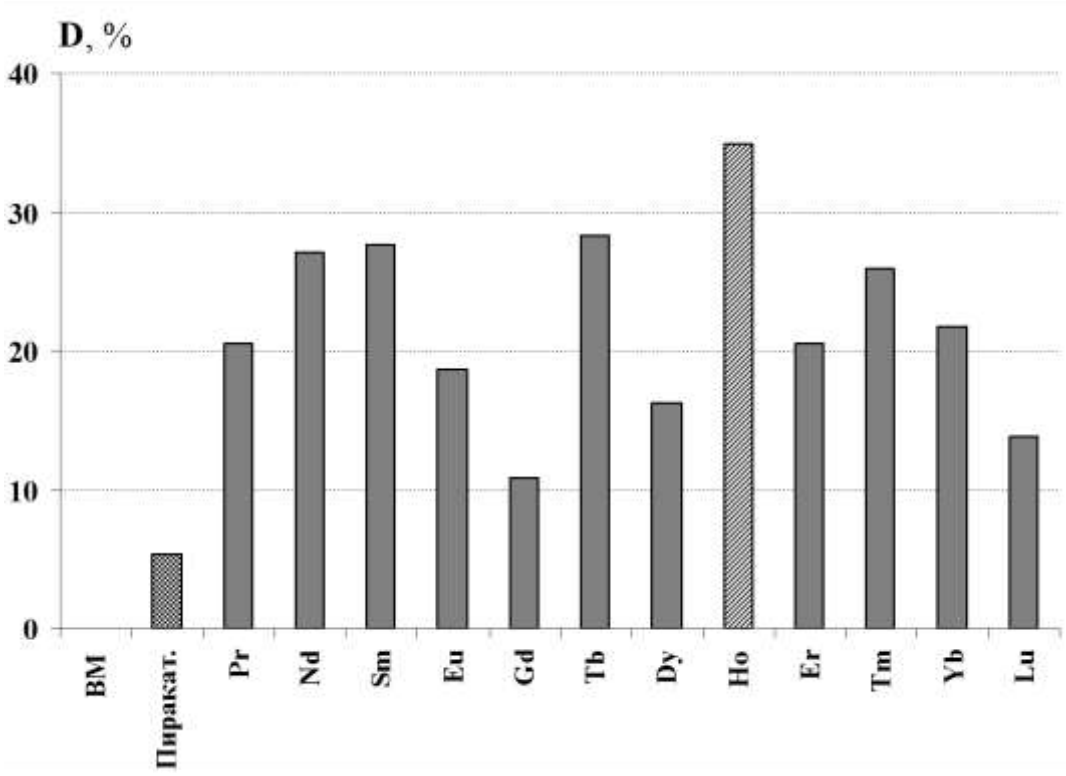


Рисунок 1. Относительное изменение диаметра пятна износа для часовых испытаний при нагрузке 0,8 кг (196 Н) (ГОСТ 9490-75**)**

Результаты расчетов индексов задира показывают, что лучшими — проявили себя комплексы диспрозия и эрбия, а добавка пирокатехина, наоборот, ухудшила данную характеристику. При добавлении в вазелиновое масло 1 % диспрозиевого комплекса критическая нагрузка (P_K) возрастает от 617 до 784 Н.

Результаты часовых испытаний при одинаковой нагрузке (ГОСТ 9490-75**)** позволяют достаточно корректно выявить зависимость пятен износа от вводимого ВКС при постоянной концентрации (1 %). На данном этапе работы варьировался только металл, что дает возможность сравнения величин износа при использовании, как чистого ВМ, так и в композициях, содержащих различные металлы. В качестве параметра, позволяющего оценить относительное изменение размера

пятна, была использована величину **D**, выраженную в процентах, значение которой для чистого вазелинового масла равно нулю.

На гистограмме, показанной на рисунке 1, приведены результаты расчетов относительного изменения среднего диаметра пятен износа для всей серии изученных координационных соединений — LnL_3, усредненное значение для которых составляет 22 %.

Из рисунка 1 видно, что композиция с добавкой органического компонента (пирокатехин) показало незначительное понижение диаметра пятна — 5.4 %, по сравнению с ВКС. Последние, по степени уменьшения $d_{ср.}$ условно можно разделить на несколько групп по понижению противоизносных свойств (повышению значения D): лучше всего себя проявил комплекс Ho (f^{10}) — 35 %, далее за ним следуют комплексы – Nd (f^3), Sm (f^5), Tb (f^8) и Tm (f^{12}).

Следующая группа это ВКС — Pr (f^2), Er (f^{11}), Yb (f^{13}), а наихудшие результаты показали соединения с металлами Eu (f^6), Dy (f^9), Lu (f^{14}), Gd (f^7) — 11 %. Анализ полученных результатов позволяет лишь отметить тот факт, что самые худшие результаты (Gd, Lu) соответствуют ионам Ln^{+3}, у которых или наполовину, или полностью заполнена f-оболочка.

Библиографический список.

1. Кужаров, А.С. Металлоплакирующие смазочные материалы [Текст]: Долговечность трущихся деталей машин / А.С. Кужаров, Н.Ю. Онищук. Вып. 3. М.: Машиностроение, 1988.– С. 96-143.

2. Кужаров А.С., Кужаров А.А. Прямые экспериментальные доказательства наноструктуры сервовитной пленки при трении в режиме безызносности.//Труды научно-технической конференции с участием иностранных специалистов "Проблемы машиноведения: Трибология-машиностроению". 2012 г.

УДК544.35

Синтез фотокаталитически активных наночастиц оксида меди (II) методом соосаждения

Новикова А.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, anastasianovik@mail.ru

Петросова Н.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Аннотация. Создание фотокаталитически активных материалов является перспективным направлением развития нанотехнологии. Изучена возможность применения наночастиц оксида меди (II) в качестве эффективных фотокатализаторов. Показано, что синтезированные методом термического разложения прекурсора – основного сульфата меди (II), наночастицы CuO обладают выраженными фотокаталитическими свойствами, даже в отсутствие пероксида водорода.

Ключевые слова: фотокатализ, наночастицы, оксид меди (II), метиловый оранжевый, спектрофотометрический анализ

Abstract. Creating photocatalytically active material is a promising direction in the development of nanotechnology. The opportunity of application the copper oxide (II) nanoparticles as an effective photocatalysts is discussed. It is shown that the CuO nanoparticles synthesized by thermal decomposition of the precursor basic copper sulfate (II) have strong photocatalytic properties, even in the absence of hydrogen peroxide.

Keywords: photocatalytic nanoparticles, copper oxide (II), methyl orange, spectrophotometric analysis

Создание материалов для катализа является одним из актуальных направлений развития нанотехнологии. Применение полупроводниковых фотокаталитически активных материалов для систем очистки воды и воздуха от органических загрязнителей является перспективным по причине их высокой экологической и экономической эффективности, что необходимо для решения проблемы ресурсосбережения. Фотокаталитически активные материалы инициируют реакции полного разложения органических загрязнителей (до углекислого газа и воды) под действием ультрафиолетового излучения или даже видимого света, не требуя применения дополнительных реагентов[1]. По этой причине данный подход к очистке воды и воздуха представляется крайне перспективным.

В настоящее время наиболее изученным полупроводниковым материалом для фотокатализа является диоксид титана. Однако основным недостатком его является большая ширина запрещенной зоны (около 3,0 – 3,2 эВ), что приводит к поглощению только 5 % солнечного света, требует применение дополнительных источников ультрафиолетового излучения и понижает экономическую эффективность[2]. Помимо этого, производство нанопорошков диоксида титана требует значительных энергетических затрат, связано с большими экологическими рисками.

Подходящей альтернативой наночастицам диоксида титана могут стать нанокомпозиты на основе оксида меди (II). Конкурентными преимуществами наночастиц оксида меди как эффективного фотокатализатора являются важные функциональные свойства: высокая активность и селективность в окислительно-восстановительных реакциях, не токсичность и относительная низкая стоимость. Кроме того, по сравнению с TiO_2 основным преимуществом является то, что CuO может поглотить всю видимую область, что расширяет область работоспособности данного материала[3].

На фотокаталитическую активность значительное влияние оказывает морфология наночастиц, и фотокаталитические свойства сильнее всего проявляются у наночастиц CuO пластинчатой формы [3]. В данном работе рассматриваются фотокаталитические возможности наночастиц CuO указанной морфологии, полученные методом термического разложения прекурсора – гидроксосульфата меди (II), брошантита. Преимуществами предлагаемого подхода являются отсутствие трудоемких и малоэффективных операций промывки и фильтрования конечных продуктов, регулируемая дисперсность и высокая чистота получаемых порошков. А также: относительная простота получения прекурсора (в отличие от известных дорогостоящих гидротермальных методов), сокращение времени синтеза, контролируемая морфология и дисперсность нанопорошков оксида, меди высокая чистота получаемых нанопорошков.

Для оценки фотокаталитической активности применяли метод фотокаталитического разложения красителя метилового оранжевого (МО) в водном растворе [4]. В качестве источника ультрафиолетового излучения использовали солнечный свет. Характерный пик поглощения для МО в 464 нм был использован в качестве контролируемого параметра во время каталитического процесса деградации.

Полученные спектры поглощения дисперсий, содержащих частицы CuO представлены на рисунке 1.Из данных видно, что спектры различаются положением пика максимума поглощения, в течении 120 минут под действием наночастиц оксида меди (без добавления перекиси водорода) происходит выцветание красителя.

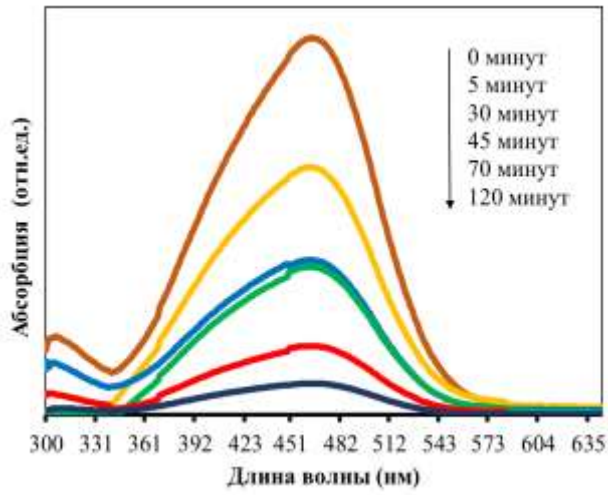


Рисунок 1 – Спектры оптического поглощения МО в присутствии наночастиц CuO

Из литературных данных известно, что увеличение фотокаталитической способность CuO для ухудшения органических загрязнителей, возможно только в присутствие H_2O_2[5].Однако, под действием ультрафиолетового излучения в присутствии полученных наночастиц CuO происходит выцветание красителя и уменьшение оптической плотности растворов в отсутствии перекиси водорода. Таким образом, под освещением CuO может создать •OH радикалы и имеет сумму окислительных действий достаточных для разрушения органических загрязнителей.

Библиографический список.

1. Chong MN, Jin B, Chow CWK, Saint C. Recent developments in photocatalytic water treatment technology: a review. Water Res 2010;44:2997–3027.

2. Bahnemann D. Photocatalytic water treatment: solar energy applications. Sol Energy 2004;77:445–59

3. Zhang Q, Zhang K, Xu D, Yang G, Huang H, Nie F, et al. CuO nanostructures: Synthesis, characterization, growth mechanisms, fundamental properties, and applications. Prog Mater Sci 2014;60:208–37.

4. Saravanan R, Karthikeyan S, Gupta VK, Sekaran G, Narayanan V, Stephena. Enhanced photocatalytic activity of ZnO/CuO nanocomposite for the degradation of textile dye on visible light illumination. Mater Sci Eng C 2013;33:91–8.

5. Li J, Sun F, Gu K, Wu T, Zhai W, Li W, et al. Preparation of spindly CuO micro-particles for photodegradation of dye pollutants under a halogen tungsten lamp. Appl Catal A Gen 2011;406:51–8.

УДК544.35

Получение наночастиц восстановленного оксида графита

Новикова А.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, anastasianovik@mail.ru

Илюхин Н.Д., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Аннотация. Изучена возможность синтеза наночастиц оксида графита, основанная на модифицированном методе Хаммерса, ультразвуковой обработкой водных дисперсий и восстановлением боргидридом натрия. Морфология синтезированных частиц изучена с помощью атомно-силовой микроскопии. Средний размер частиц оксида графита до ультразвуковой обработки составляет около 20 мкм, в то время как после УЗ-диспергирования в течение 45 минут размер частиц уменьшается до 4 мкм.

Ключевые слова: графит, графен, наноматериалы, модифицированный метод Хаммерса, атомно-силовая микроскопия

Abstract. The possibility of synthesizing nanoparticles of graphite oxide, based on the modified method Hammers, sonication of aqueous dispersions and reduction with sodium borohydride is discussed. The morphology of the synthesized particles is studied by atomic force microscopy. The average particle size of graphite oxide before ultrasonic treatment is about 20 microns, while after ultrasonic dispersion for 45 minutes, the particle size is reduced to 4 microns.

Keywords: graphite, graphite, nanomaterials, modified Hammers method, atomic force microscopy

Графен – материал, обладающий уникальными электрическими, оптическими, механическими и другими свойствами. К настоящему времени основными методами получения графена являются: механическое отщепление слоев графена от высокоориентированного пиролитического графита; выращивание на подложке (химическое осаждение из газовой фазы с разложением углеводородов на поверхности металлов и карбидов металлов); органический синтез; химический метод с использованием коллоидных дисперсий на основе соединений, содержащих графеновые слои[1]. Каждый метод имеет свои достоинства и недостатки, например, метод механического отщепления – «скотч-метод» дает образцы наивысшего качества, но очень трудоемок и не пригоден для масштабного производства графена. Наиболее перспективным для коммерческого производства представляются именно химические методы. Кроме того, продукт такого синтеза – коллоидные дисперсии графена необходимы для различных технологических операций – пропитки, смешения, нанесения, функционализации и т.д.

В химических методах получения коллоидных дисперсий графена в качестве предшественников используют вещества, содержащие графеновые слои: природный и высокоориентированный пиролитический графит, фторид графита, интеркалированные соединения графита, углеродные нанотрубки, оксид графита [1]. Среди перечисленных веществ, наиболее перспективным предшественником для получения дисперсий графена в жидкой фазе представляется оксид графита по причине относительной простоты его синтеза.

В данной работе представлены результаты синтеза оксида графена модифицированным методом Хаммерса [2].

Оксид графена получали смешением 1 г высокодисперсного порошка графита и 7 г нитрата натрия в 60 мл 96 % серной кислоты. Составляющие тщательно перемешивались в эксикаторе при внешнем охлаждении льдом. При этом в состав смеси постепенно вводили 35 г перманганата калия. Процесс проходил при температуре ниже 20º С. Затем поднимали температуру до 35º С и перемешивали в течении 30 минут, в процессе смесь постепенно загустевала. Через еще 30 минут 100 мл воды медленно смешивали с пастой, в результате его произошла бурная реакция, и температура поднялась до 98º С. Суспензия приобрела коричневый оттенок. Далее суспензию разбавили до 200 мл теплой водой и 3% перекисью водорода для восстановления перманганата и диоксида марганца до сульфата марганца. При обработке пероксидом, суспензия становилась желтой. Затем раствор отфильтровывали. Полученный продукт представляет собой остаток желто-коричневого цвета. Суспензию оксида графита с концентрацией 2 мг/л подвергали УЗ-обработке в течение 45 минут, после чего проводили восстановление водным раствором боргидрида натрия.

Размерные характеристики синтезированных частиц изучали с помощью атомно-силовой микроскопии. На рисунке 1 приведены топографии поверхности синтезированных частиц оксида графита.

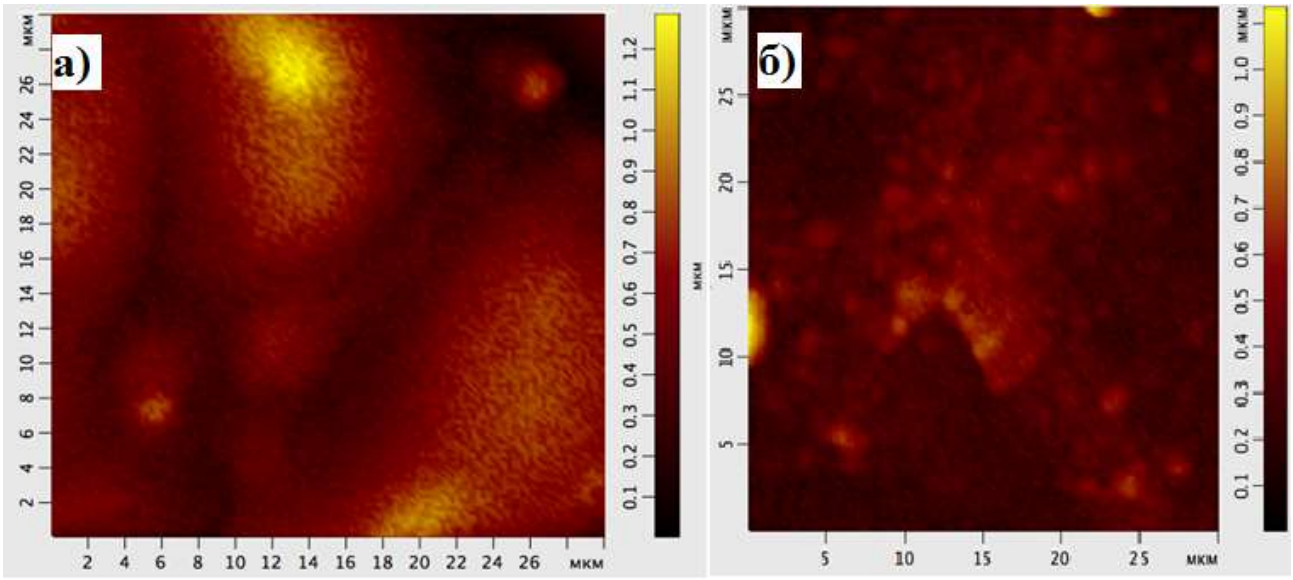


Рисунок 1 – АСМ изображение оксида графита: (а) - до УЗ-обработки, (б) – после УЗ-обработки

На рисунке 1а заметны массивные гранулы оксида графита, размеры которых составляют около 20 мкм. После ультразвуковой обработки размерные характеристики частиц значительно уменьшаются: на рисунке 1б можно наблюдать множество отдельных частиц, представляющих собой расслоившийся на отдельные чешуйки оксид графита, размером 4 мкм. Согласно данным АСМ восстановление водной дисперсии оксида графена боргидридом натрия не приводит к

существенному увеличению размеров частиц (рисунок 2). Таким образом, можно заключить, что данный метод синтеза эффективен для получения наночастиц восстановленного оксида графита.

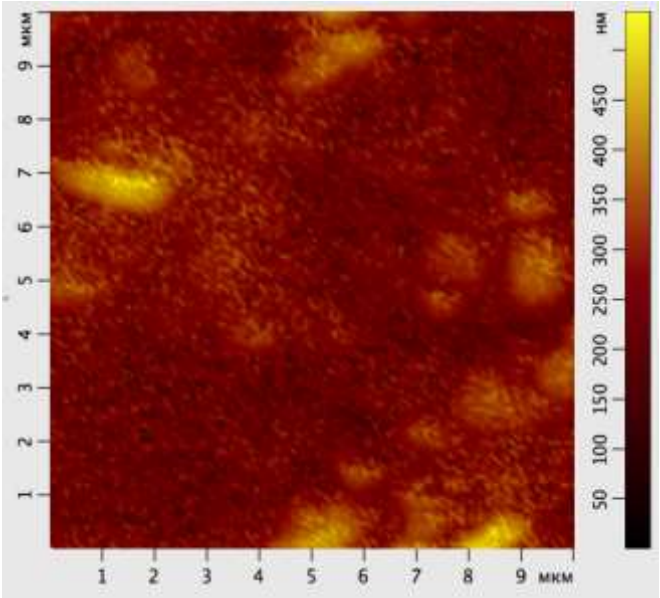


Рисунок 2 – АСМ изображение восстановленного оксида графена

Благодарности и признательности

Часть исследований была выполнена на оборудовании РЦКП ДГТУ (nano.donstu.ru)

Библиографический список.

1. Грайфер Е. Д. и др. Графен: химические подходы к синтезу и модифицированию //Успехи химии. – 2011. – Т. 80. – №. 8. – С. 784-804.

2. Chua C. K., Pumera M. Chemical reduction of graphene oxide: a synthetic chemistry viewpoint //Chemical Society Reviews. – 2014. – Т. 43. – №. 1. – С. 291-312.

УДК 620.22:622.81

Гидрофобизованные модифицированные лигносульфонаты для брикетного производства

Евстифеев Е.Н., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, doc220649@mail.ru

Попов Е.М., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Аннотация. В статье приводятся результаты разработки малотоксичных гидрофобных связующих материалов для создания экологически безопасной технологии производства бездымных брикетов из антрацитовых штыбов, превосходящих известные связующие на нефтяной основе по техническим, санитарно-гигиеническим и экономическим требованиям. В качестве основы для разработки гидрофобных связующих материалов использовали природный полимерный материал– технические лигносульфонаты, которые модифицировали для повышения их связующих свойств. Поиск модификаторов проводили среди кубовых остатков органического синтеза различных химических производств. При этом круг исследуемых модификаторов ограничивался тем, что они должны содержать двух- и более функциональные вещества, способные давать поперечные химические связи между макромолекулами лигносульфонатов с образованием сетчатого полимера в условиях тепловой обработки угольных брикетов. Сцельюгидрофобизациимодифицированныхлигносульфонатовиспользовалиталловыйпек.

Ключевые слова: антрацитовые штыбы, связующие, технические лигносульфонаты, модификаторы, талловый пек, скипидар, гидрофобизация, солюбилизация, брикеты, водостойкость, прочность на сжатие, термообработка, прессование.

Abstract. The article presents the results of the development of low-toxic hydrophobic binder materials to create environmentally safe technology of production of smokeless briquettes from culm, exceeding the known binders are petroleum-based by technical, hygienic and economic requirements. As a basis for the development of hydrophobic binders used the natural polymer material – technical lignosulfonates, which are modified to enhance their binding properties. Search modifiers conducted among bottoms of organic synthesis of various chemical industries. The range of studied modifiers was limited by the fact that they must contain two or more functional substances capable of cross chemical bonds between macromolecules of the lignosulfonate with the formation of reticulate polymer under conditions of thermal processing coal briquettes. For the purpose of hydrophobization of modified lignosulfonates used Tallo first pitch.

Keywords: anthracite stiby, binders, technical lignosulphonates, modifiers, tall pitch, turpentine, hydrophobicity, solubilization, briquettes, water resistance, compressive strength, termoorebank, pressing.

Антрацитовые штыбы, представляющие собой мелкие и пылевидные фракции угля размером от 0 до 6 мм, не пользуются спросом у потребителей из-за низкой тепловой отдачи. Кроме того, этот тип топлива имеет низкую эффективность применения в коммунально-бытовой сфере по причине его просыпа через колосниковую решетку в отопительных печах, которые часто затухают, так как пылевидные частицы угля перекрывают доступ кислорода.

Брикетирование антрацитовых штыбов является одним из способов их переработки, так как угольные брикеты являются наиболее экономичным, калорийным и удобным для использования в быту твердым топливом.

В качестве связующих для брикетирования антрацитов используют нефтебитумы и каменноугольные пеки [1]. Имеются также сведения о применении в качестве связующего технических лигносульфонатов (ТЛС) и различных неорганических веществ [2].

Особого внимания заслуживают ТЛС – природный многотоннажный полимерный продукт, образующийся на целлюлозно-бумажных комбинатах при производстве сульфитной целлюлозы. Основным недостатком брикетов на основе ТЛС является их невысокая механическая прочность и низкая влагостойкость. В последнее время предпринимались попытки повышения влагостойкости лигносульфонатов путем их сочетания с портландцементом [3], омыленным талловым пеком (ТП)[4]. Однако добавка цемента снижает калорийность брикетов, а растворимый в воде омыленный ТП не обеспечивает им необходимую влагостойкость.

В настоящей работе для изготовления бездымных брикетов из антрацитовых штыбов впервые использовали комплексное связующее на основе модифицированных лигносульфонатов (связующее МЛС).Для успешного развития этого направления необходим поиск модификаторов технических лигносульфонатов. Их отсутствие существенно сдерживает разработку новых связующих материалов на основе ТЛС для брикетного производства. На пути создания таких связующих имеется немало трудностей, обусловленных физико-химическими особенностями ТЛС. Однако наличие большого числа активных функциональных групп делает их способными к многочисленным химическим превращениям. Последнее даёт возможность модифицировать ТЛС и тем самым повысить их связующие свойства.

Поиск модификаторов ТЛС проводили среди неорганических и органических веществ, а также среди отходов различных химических производств. В качестве неорганических модификаторов ТЛС в настоящей работе исследованы вещества из класса солей: хлориды, нитраты, сульфаты натрия, калия и аммония.

Неорганические соли, выполняя роль коагуляторов, вызывают повышение вязкости ТЛС. Это происходит за счет укрупнения коллоидных агрегатов ТЛС, которые ещё более увеличиваются при термической обработке лигносульфонового комплекса. В результате этого плёнка ТЛС после тепловой обработки разрушается и отслаивается. Кроме того, соли минеральных кислот, как правило, сообщают лигносульфонатам повышенную гигроскопичность. Из-за указанного недостатка эти модификаторы не могут быть использованы в технологии производства угольных брикетов.

В качестве органических модификаторов ТЛС использовали вещества, которые в своём составе имеют аминогруппу, или гидроксильную группу: мочевину, моноэтаноламин, триэтаноламин, формамид. Вязкость лигносульфонатов от их введения уменьшается в несколько раз.

Связующая способность ТЛС повышается за счет реакций поликонденсации между функциональными группами модификаторов и фенилпропановыми структурными единицами лигносульфонатов. Однако все модификаторы из класса аминоспиртов и амидов карбоновых кислот сообщают угольным брикетам неудовлетворительные показатели по гигроскопичности.

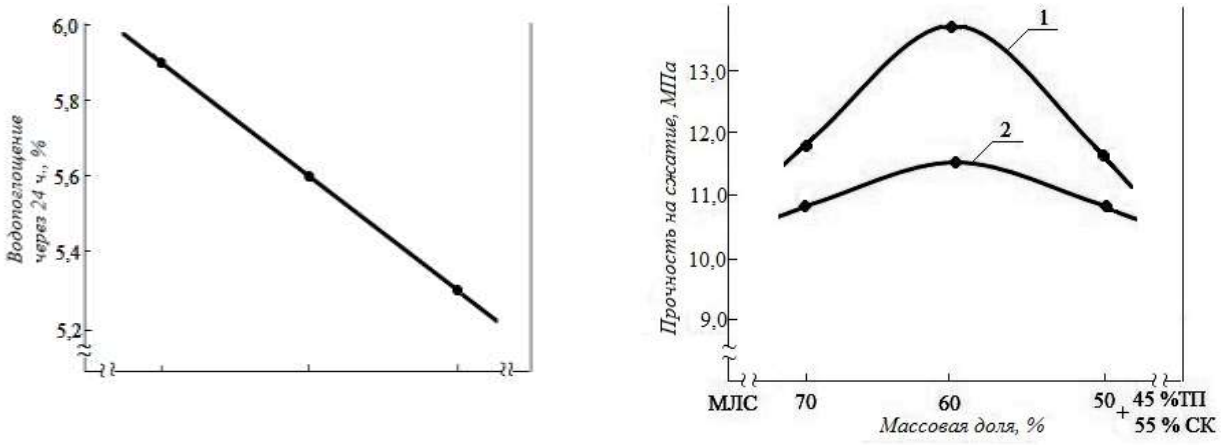
В качестве модификаторов ТЛС среди отходов органического синтеза были отобраны: кубовый остаток периодической дистилляции капролактама Дзержинского ОАО «Капролактам» и кубовые остатки органического синтеза Новочеркасского завода синтетических продуктов. Перечисленные выше кубовые остатки содержат в своем составе двух- и более функциональные вещества, способные давать поперечные химические связи между макромолекулами лигносульфонатов с образованием сетчатого полимера в условиях тепловой обработки угольных брикетов. Эти отходы химических производств были использованы для разработки модифицированных ТЛС.

Для гидрофобизации модифицированных ТЛС (связующего МЛС) использовали второй компонент комплексного связующего – раствор ТП в скипидаре (СК). Талловый пек– многотоннажный побочный продукт сульфат-целлюлозного производства, образуется от перегонки сырого таллового масла. В настоящее время значительная часть ТП сжигается в смеси с мазутом непосредственно на сульфат-целлюлозных предприятиях. Раствор ТП в скипидаре можно производить централизованно на Котласском ЦБК и как новый эффективный продукт поставляться для углебрикетного производства.

Перемешивание угольной шихты со связующим 60 % МЛС + 40 % (45 % ТП + 55 % СК)осуществлялось в лабораторном лопастном смесителе марки LM-R2 польской фирмы «Центрозап». Время перемешивания — 5–6 мин. Содержание связующего от массы угля составляло 8–12 %.Прессование подготовленной шихты осуществляли на универсальной испытательной машине ГРМ-1 при удельном давлении от 15 до 75 МПа.

Отформованные брикеты подвергались термообработке в сушильном лабораторном электрошкафу СНОЛ-3,5.3,5.3,5/3-М2 при температуре 210±10 ^{o}С в течение 120 мин.

На рисунке представлены результаты исследования влияния на свойства брикетов количества 45 %-го раствора ТП в составе комплексного связующего МЛС – раствор ТП.



а б

Рисунок. Зависимость прочности (а) и водопоглощения (б) брикетов от соотношения между МЛС и 45 %-м раствором ТП в скипидаре

1 –отвечает прочности брикетов после их пребывания на воздухе в течение 24 ч; 2 – отвечает прочности брикетов после их пребывания в воде в течение 2 ч

Из рисунка видно, что для разработанного комплексного связующего соотношение60 % МЛС к 40 % раствора ТП является оптимальным: у брикетов достигнута наибольшая прочность 13,7 МПа. Брикеты после 2-х часового пребывания в воде (кривая 2) теряют прочность всего на 11–20 %. Это свидетельствует о высокой степени водостойкости разработанного комплексного связующего.

Изготовленные брикеты по показателям механической прочности и атмосферо-водоустойчивости значительно превышают требования потребительских стандартов на бытовое брикетное топливо, предъявляемые на отечественном и зарубежном рынках.

Комплексное связующее сообщает брикетам небольшую прочность в сыром состоянии даже при высоком удельном давлении – 60 МПа. Для разработанной технологии холодного прессования важно, чтобы отформованные брикеты имели в сыром состоянии прочность, достаточную, чтобы выдержать различные технологические манипуляции. К тому же для приготовления предложенного связующего используется органический растворитель, что также можно отнести к его недостаткам.

С целью гидрофобизации связующего МЛС разработан способ ввода в него таллового пека без органического растворителя. Составы гидрофобизованного связующего готовили в лопастной мешалке при интенсивном перемешивании. В связующее МЛС загружали ТП (таблица), затем эту смесь нагревали до температуры 70–90 ^{o}C и выдерживали до полного расплавления таллового пека. После перемешивания в течение 10–15 мин связующее необходимо выдержать до исчезновения образующейся при этом пены.

Растворимость неполярного ТП в полярном связующем МЛС объясняется явлением солюбилизации. Талловый пек поглощается мицеллами лигносульфонатов, размещаясь между их углеводородными звеньями. Это увеличивает размеры мицелл, что приводит к возрастанию вязкости связующего. Вязкость связующих составов № 1–5 приведена в таблице.

Таблица

Составы и условная вязкость гидрофобизованного связующего МЛС

Наименование ингредиентов и вязкость гидрофобизованного связующего	Составы и показатели вязкости связующих				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Модифицированные лигносульфонаты	99,9	99,8	99,4	99,0	98,0
Талловый пек	0,1	0,2	0,6	1,0	2,0
Условная вязкость при 20 ^{o}C, с, по ВЗ-1	1880	860	605	422	390

Как видно из таблицы, от содержания таллового пека зависит вязкость связующего. Значения этого свойства резко уменьшаются при увеличении количества ТП в связующем. Поэтому для повышения вязкости МЛС эффективны лишь небольшие добавки таллового пека, который играет роль дополнительного модификатора лигносульфонатов. Гидрофобизация мицелл лигносульфонатов талловым пеком понижает гигроскопичность брикетов. Высокая вязкость гидрофобизованного МЛС позволяет повысить прочность брикетов в сыром состоянии, необходимую для различных технологических манипуляций.

Благодарности и признательности

Работа выполнена на оборудовании НОЦ "Материалы" Донского государственного технического университета (ДГТУ)

Библиографический список

1. Крохин В.Н. Брикетирование углей. – М.: Недра, 1984. –216 с.
2. Елишевич А.Т. Брикетирование полезных ископаемых. – М.: Недра, 1989. – 300 с.
3. Воробьев В.Н., Лещенко П.С., Климова Л.К. и др. Экологически чистые связующие для получения бытового топлива из углей мелких классов //Химия твердого тела. – 1997. – №2. – С. 45–51.
4. Пат. 2078120 Российская Федерация, МПКС10L5/00.Топливный брикет и способ его получения / В.Г. Лурий; опубл. 27.04.97.

УДК: 547.816.8

Спироциклические системы как активные элементы молекулярной фотоники

Лукьянов Б.С., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, bluk@ipoc.sfedu.ru
Лукьянова М.Б., Южный федеральный университет г. Ростов-на-Дону, Россия
Комиссарова О.А., Южный федеральный университет г. Ростов-на-Дону, Россия
Щёкина Ю.А., Южный федеральный университет г. Ростов-на-Дону, Россия
Муханов Е.Л., Южный федеральный университет г. Ростов-на-Дону, Россия
Панина А.П., Южный федеральный университет г. Ростов-на-Дону, Россия

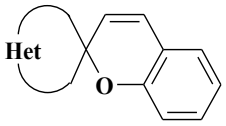
Аннотация: работа посвящена изучению фотохромных свойств спиропиранов с различными реакционноспособными заместителями, функционализация которых позволяет получить новые гибридные материалы, обладающие одновременно несколькими свойствами: оптическими, люминесцентными, магнитными, а также координационно-активными.

Ключевые слова: спиропираны, фотохромизм, мультифункциональные заместители.

Abstract:thepaperisdedicatedtheinvestigationofphotochromicpropertiesofspiropyranscontainingvariousreactivitysubstitutes. Their functionalization allows to obtain new hybrid materials having multiple properties at the same time: optical, magnetic, luminescent as well as coordination-active.

Keywords: spiropyrans, photochromism, multifunctional substitutes.

Фотохромные материалы типа спиропиранов **1** [1] показывают фотохромные свойства как в растворах, так и в твердых матрицах и часто используются в качестве элементов молекулярной электроники и фотоники. Спироциклические соединения могут быть использованы в

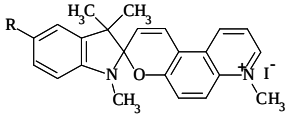


1

качестве элементов оптической памяти, светоуправляемых молекулярных переключателей, а также химических сенсоров для определения следов металлов в окружающей [2,3].

Наибольший интерес в этом отношении представляет прежде всего, спироциклические структура, содержащие заместители, способные к дальнейшей функционализации. Получение спироциклических соединений, содержащих в [2H] бензопирановом фрагменте конденсированные гетероциклические элементы особенно актуально, так как многие гетероциклы проявляют флуоресцентные свойства, и такие "гибридные" молекулы сочетают изменение окраски и флуоресцентных характеристик под действием активирующего излучения. Эти системы могут быть позиционированы в качестве активных элементов молекулярной фотоники.

Производные таких систем типа **2**, содержащих четвертичный атом азота, представляют особый интерес в качестве так называемых. фотоуправляемых магнетиков,



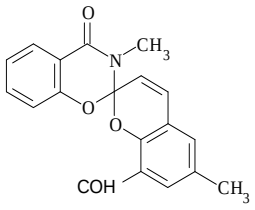
2

содержащих комплексные соли с магнитно-активными анионами,

где в качестве фотохромного компонента используется положительно заряженный спиропиран

Структурами, представляющими в этом отношении наибольший интерес, являются прежде всего, новые спироциклические системы, содержащие такие заместители как формильный, способный к дальнейшей функционализации. Спиропираны содержащие свободную формильную группу **3** обладают фотохромные свойства в твердой фазе - в тонких пленках, полученных путем вакуумного термического напыления на стеклянные или кварцевые пластины.

На рис. 1 изображены электронные спектры поглощения полидисперсной пленки спиропирана **3**,адсорбированнойна кварцевой поверхности, в зависимости от времени облучения:



3

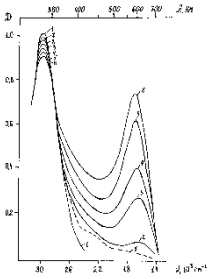


Рис.1

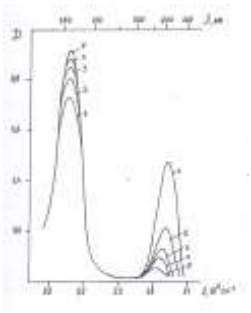
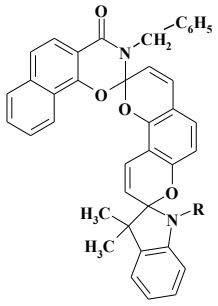


Рис.2

1,2.3,4,5,6 – 0,30,120,240,270,360 секунд соответственно, 7 – после нагревания пленки до 70°С –«стирание» информации», а на рис. 2 - электронные спектры поглощения облученной пленки спиропирана **3** (обратная темновая реакция): 1 – облученная форма; 2,3,4,5 – 5, 15, 30, 60 минут после облучения соответственно.

Используя спиропираны содержащие *орто*-расположенные формильную и гидроксильную группы в бензольном кольце 2Н-хромена фрагмента были синтезированы несимметричные бисспиропираны **3**. Возможность открытия той или иной или обоих 2Н-пирановых кольца при облучении активирующим излучением различного спектрального состава позволяют создать трехпозиционные фотопереключатели



3

Формирование новых материалов на основе бистабильных структур, состоящих из светочувствительных фрагментов, плотно связанных с комплексообразующим центром молекулы является одним из приоритетных направлений в функции органической и координационной химии, а также фотохимии.

Благодарности и признательности

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ НШ 274.2014.3

Библиографический список

1. B.S.Lukyanov, M.B.Lukyanova Chemistry of Heterocyclic compounds,**41**, 281 (2005).

2. V.I.Minkin Chem. Rev.,**104**, 2751 (2004).

3. V.I.Minkin Russian Chemical Bulletin, **57**, 687 (2008).

УДК: 547.816.8

Определение термодинамических параметров термоиндуцированной валентной изомеризации спиропиранов методом ЯМР ^{1}H

Лукьянова М.Б., Южный федеральный университет г. Ростов-на-Дону, Россия
Лукьянов Б.С., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, bluk@ipoc.sfedu.ru
Комиссарова О.А., Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Щёкина Ю.А., Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Панина А.П., Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Работа посвящена изучению реакции термоиндуцированной валентной изомеризации спиропиранов методом спектроскопии ЯМР 1Н и определение ее термодинамических параметров.

Ключевые слова: спиропираны, ЯМР ^{1}H, термоиндуцированная валентная изомеризация, термодинамические параметры.

Abstract. The paper is dedicated the investigation of photochromic properties of spiropyrans containing various reactivity substitutes. Their functionalization allows to obtain new hybrid materials having multiple properties at the same time: optical, magnetic, luminescent as well as coordination-active.

Keywords: spiropyrans, NMR^{1}H, thermal-induced valence isomerization, thermodynamic parameters.

Фото и термохромные спирпираны, содержащие диастереотопные группы могут быть объектом изучения процесса термоиндуцированной изомеризации методом Динамического ЯМР. В спиропиранах **1** такими группами являются *гем*–диметильные. в положении 3 индолинового фрагмента:

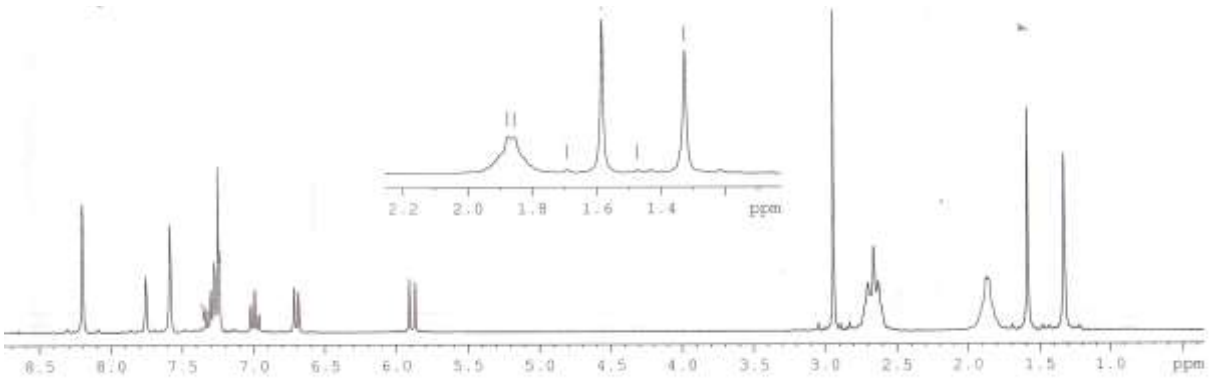
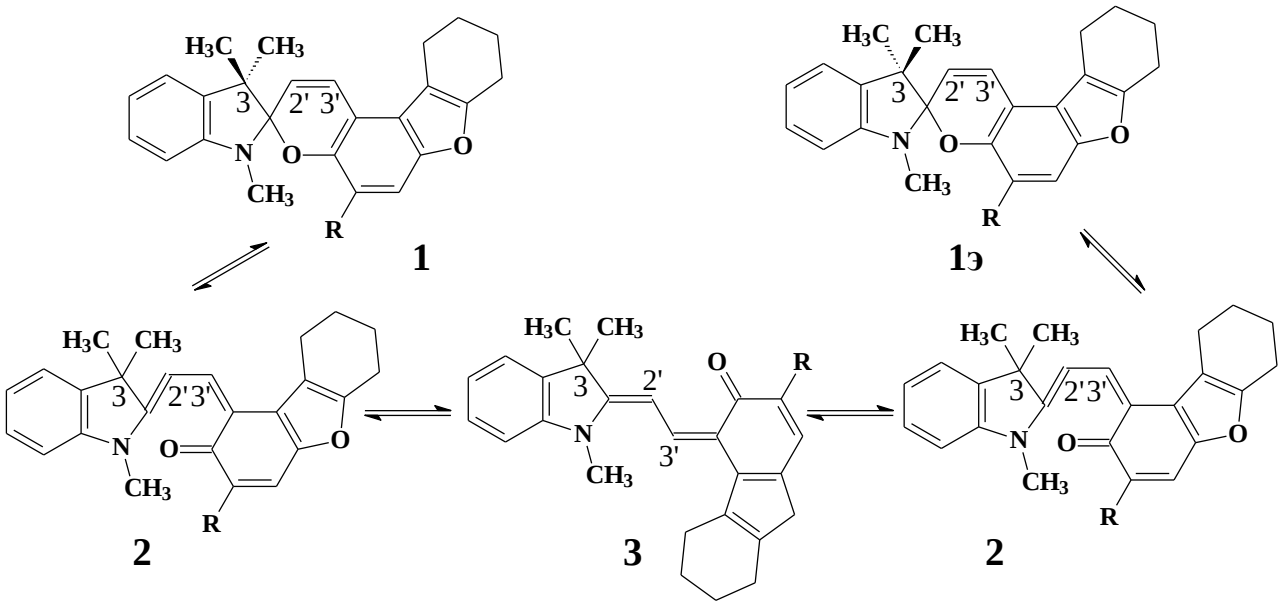


Рис. 1. Спектр ЯМР ^{1}H спиропирана **1 (R = Br)** в нитробензоле–D_5 (20 ^{0}C)

Метод динамического ЯМР позволяет определить свободную энергию активации фотоиндуцированного процесса конверсии закрытой формы спиропирана, включающего в себя разрыв $C_{спиро}$–О связи, поворот двух ортогональных частей



молекулы вокруг связи C(2')–C(3') и замыкание спиросвязи с образованием формы, энантиомерной исходной.

Для определения констант скоростей и активационных параметров существуют методы получения данных температурной зависимости спектров ЯМР обменивающихся диастереотопных групп.

В отсутствие обмена в спектрах проявляются два синглетных сигнала неэквивалентных метельных групп, находящихся в положении 3, которые уширяются с увеличением температуры (растет скорость обмена), достигая точки коалесценции. Выражение $K_{коал}=\pi\cdot\Delta\upsilon/2$ дает значения констант скоростей при температуре коалесценции для обмена между двумя положениями с равной заселенностью.

В таблице 1 приведены данные констант скоростей обмена спиропиранов **1** при различных температурах, а на рис. 2 изображены экспериментальные формы линий сигналов метильных групп спиропирана **1(R = Br)**.

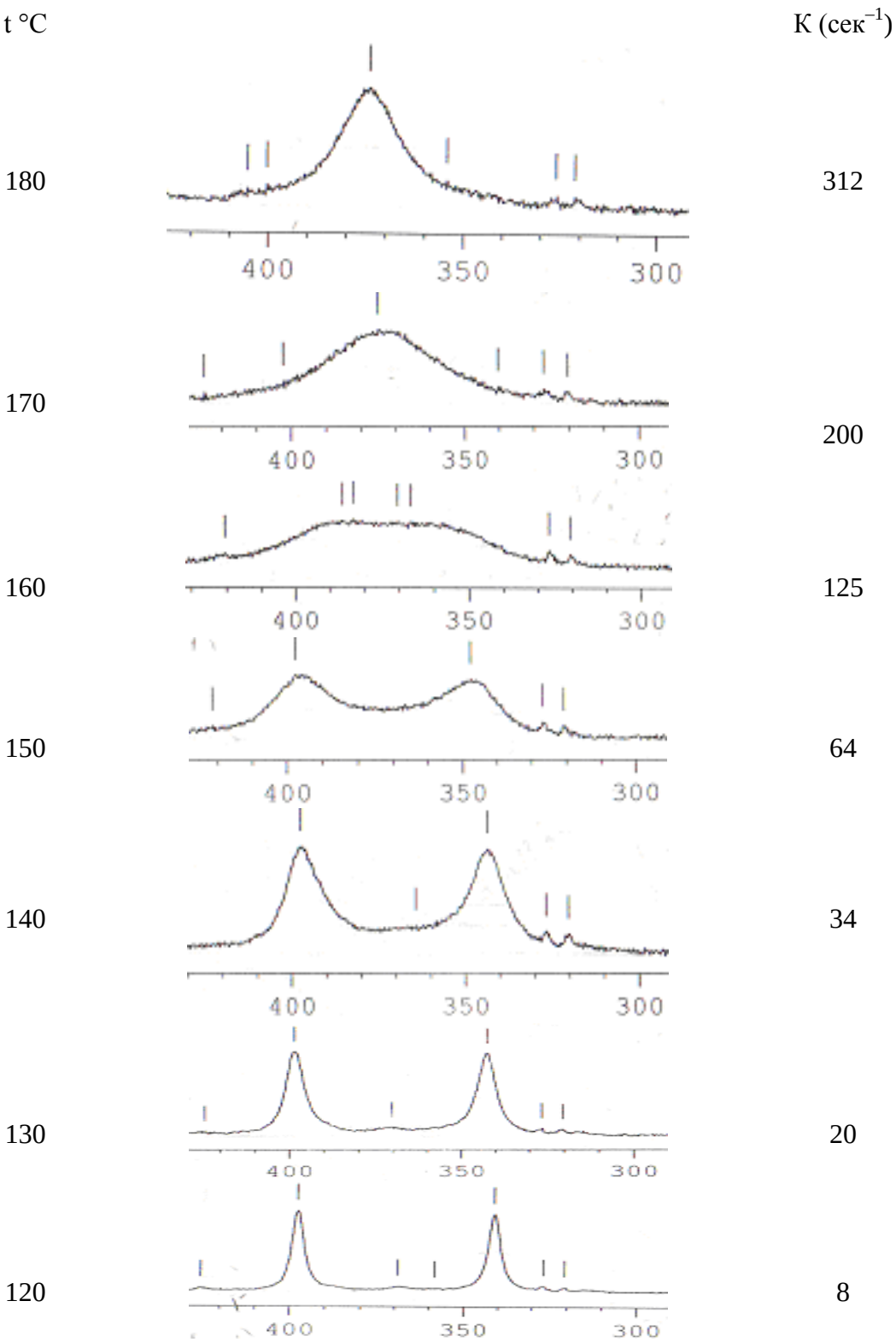


Рис. 2. Экспериментальные формы линий сигналов метильных групп спиропирана **1(R = Br)** при различных температурах в нитробензоле–D_5

Таблица 1

Констант скоростей обмена реакции термического раскрытия цикла спиропиранов **1** при различных температурах

R = H		R = Br		$R=NO_2$	
Т, К	К, $сек^{-1}$	Т, К	К, $сек^{-1}$	Т, К	К, $сек^{-1}$
403	4	393	8	383	8
413	8	403	20	393	18
423	18	413	34	403	40
433	42	423	64	413	70
443	80	433	125	423	120
453	152	443	200	133	204
463	300	453	312	443	371
–	–	–	–	453	620

В таблице 2 приведены рассчитанные кинетические и активационные параметры реакции термического раскрытия цикла спиропиранов **1.**

Таблица 2.

Кинетические и активационные параметры реакции термического раскрытия цикла спиропиранов **1**, рассчитанные по экспериментальным формам линий сигналов

гем–диметильных групп

R	$\Delta H^{\neq}$, Дж/моль	$\Delta S^{\neq}$, Дж/моль	$*\Delta G^{\neq}$, кДж/моль
H	–5,85	–236,09	66,17
Br	–4,82	–222,70	65,20
NO_2	–6,82	–216,94	64,63

*Свободная энергии конверсии закрытой формы спиропиранов $\Delta G^{\neq}$ рассчитана по уравнению Эйринга: $\Delta G^{\neq} = 4{,}576T(10{,}32 + \lg T - \lg k)$.

Благодарности и признательности

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ НШ 274.2014.3

УДК: 543.42:544.77.032.12

Количественная оценка показателей стабильности золей серебра

Пугачев А.Д., Южный федеральный университет г. Ростов-на-Дону, Россия, artem_d_pugachev@mail.ru
Лукьянова М.Б., Южный федеральный университет г. Ростов-на-Дону, Россия
Лукьянов Б.С., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,
Муханов Е.Л., Южный федеральный университет г. Ростов-на-Дону, Россия
Ожогин И.В., Южный федеральный университет г. Ростов-на-Дону, Россия
Комиссарова О.А., Южный федеральный университет г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация: работа посвящена изучению коллоидов серебра, полученных методом химического восстановления. Производится количественная оценка показателей стабильности золей методом оптической спектроскопии. Практически отработана высокоэффективная методика анализа устойчивости частиц серебра к агрегации и воздействию внешних факторов, влияющих на их концентрацию в золе. В рамках этой методики получены практически ценные и принципиально новые сведения о стабильности серебряных коллоидов.

Ключевые слова: серебро, коллоид, оптическая спектроскопия, стабильность.

Abstract: the paper describes the investigation of silver colloids synthesized by means of chemical reduction. Its aggregative and chemical stability is studied. The numerical evaluation of parameters is carried out using optical spectroscopy. The high efficiency technique to analyze the silver particle stability is elaborated thoroughly. Practically important new knowledge on silver colloid stability is obtained.

Keywords: silver colloid, optical spectroscopy, stability.

Для применения коллоидного серебра в большинстве случаев важно, чтобы эти объекты были химически стабильны и агрегативно устойчивы. Современные оценки стабильности золей носят качественный характер. Целью данной работы ставится строгая количественная оценка химической стабильности и агрегативной устойчивости для золей, полученных боргидридным методом.

Методическую основу определения характеристик стабильности коллоидов составляет эффект поверхностного плазмонного резонанса. Анализ спектров исследуемых систем позволяет оценить стабильность концентрации наночастиц в растворе и постоянство их размерных характеристик. Достоинством выбранной методики исследования является высокая надежность при сравнительно простой экспериментальной базе. В экспериментах фиксировались спектры поглощения коллоидов серебра, полученных в различных условиях. Образцы хранили в темноте при 10 ^{0}C. Анализ проводили сразу после получения золя, спустя 7 и 34 дня. Оптические измерения проводились с помощью спектрофотометра ПЭ 5400 ВИ/УФ.

Методика синтеза золя заключается в восстановлении соли серебра боргидридом натрия. Основным отличием этого метода является высокая скорость химической реакции. Для получения стабильных коллоидов в реакционную смесь необходимо добавлять стабилизатор.

На размер получаемых частиц и их стабильность главным образом влияют концентрация ионов серебра и концентрация стабилизатора. Косвенное влияние также оказывают pH среды, концентрация восстановителя и температура синтеза.

В работе [1] предлагается диаграмма (см. рис. 1) состояния для золя серебра, полученного таким методом (pH = 8, T = 293 K, стабилизатор - желатин). Авторы качественно оценивают стабильность, разделяя коллоиды на три группы: "относительно устойчивые дисперсные системы"(область A), " высокоустойчивые дисперсные системы" (область B), "неустойчивые дисперсные системы" (область C).

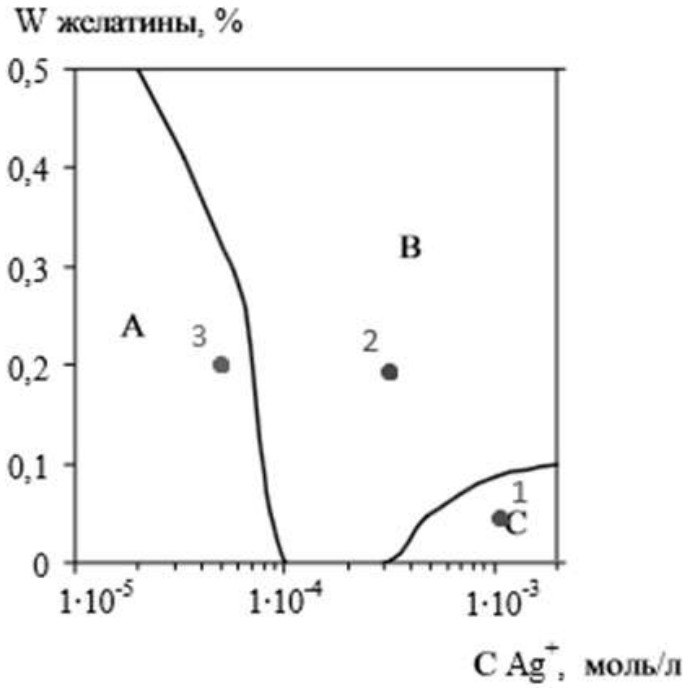


Рис. 1. Диаграмма состояния для золя серебра при T = 293 K и pH = 8.1, 2 и 3 -условия для синтеза соответствующих образцов, для которых дается количественная оценка химической стабильности.

В области A образуются неустойчивые наносистемы. Разрушение дисперсионных систем в данной области происходит в процессе металлических частиц под действием растворенного в дисперсионной среди кислорода. Область B – область устойчивых систем. В области C системы неустойчивые. Потеря устойчивости происходит за счет коагуляции и последующей седиментации образовавшихся агрегатов.

Для того, чтобы дать количественную оценку химической стабильности коллоидов были синтезированы три образца. 1 - из области "неустойчивые дисперсные системы", 2 - из области " высокоустойчивые дисперсные системы", 3 - из области "относительно устойчивые дисперсные

системы". Все образцы получены при температуре 293 К со строгим соблюдением водородного показателя (pH = 8). Последнее имеет принципиальное значение, поскольку в работе [2] авторами было замечено, что ионы различной природы могут влиять на выход продукта и на размеры получаемых частиц.

Т.к. величина поглощения линейно зависит от концентрации вещества, о химической стабильности коллоида позволяет судить изменение величины поглощения с течением времени. Ширина пика поглощения связана с шириной распределения частиц по размерам, что находит подтверждение во многих работах [3, 4, 5, 6]. Спектральный анализ проводился сразу после получения, затем через 7 дней и через 34 дня. Образцы хранились в темноте при T = 283 К. Результаты для образцов 1,2 и 3 представлены на рисунках 2,3 и 4 соответственно.

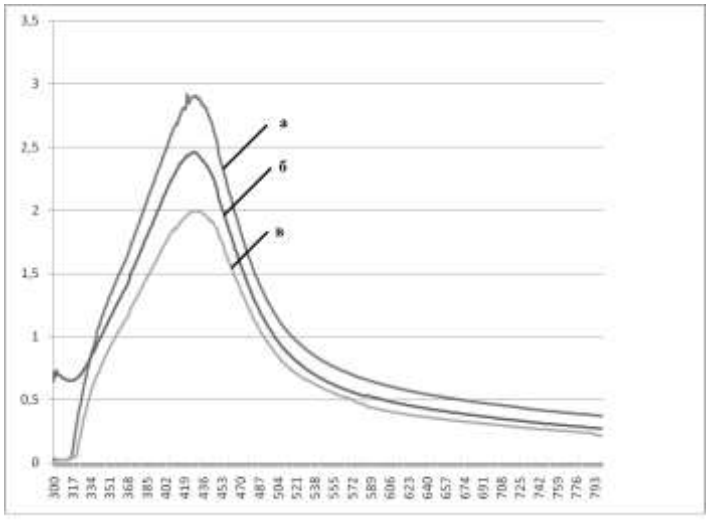


Рис. 2. Спектральный анализ образца 1 сразу после получения (а), через неделю (б)и через 34 дня (в).

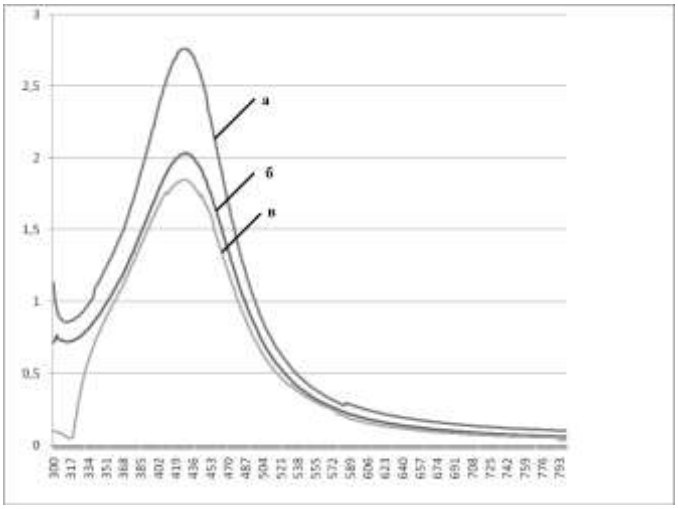


Рис. 3. Спектральный анализ образца 2 сразу после получения (а), через неделю (б)и через 34 дня (в).

.

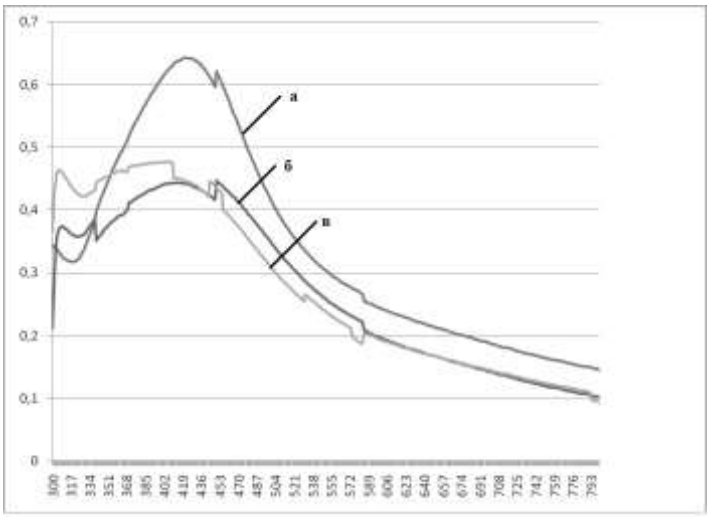


Рис. 4. Спектральный анализ образца 3 сразу после получения (а), через неделю (б)и через 34 дня (в).

Для количественной оценки полезной представляется таблица 1, в которой сведены основные результаты.

Табл. 1. Значения изменения (ΔA) и относительного изменения (δA) величины поглощения, ширины пика на 0,7 высоты ($\beta_{0,7}$) для образцов 1,2 и 3.

	после синтеза	через 7 дней	Через 34 дня
Образец 1			
ΔA	-	0,46	0,928
δA, %	-	15,75	31,78
$\beta_{0,7}$,нм	79,5	82,5	88
Образец 2			
ΔA	-	0,724	0,91
δA, %	-	26,25	32,99
$\beta_{0,7}$, нм	72,5	85	88
Образец 3			
ΔA	-	0,198	0,203
δA, %	-	30,79	31,57
$\beta_{0,7}$, нм	138	177	188

Показателем химической стабильности являются изменения величины поглощения в пике, ширина на полувысоте - показатель полидисперсности полученной коллоидной системы. Через 34 дня для всех образцов характерна примерно одинаковая величина относительного изменения поглощения в пике. Через 7 дней образец 1, который по мнению авторов [1] относится к области "неустойчивые дисперсные системы", проявил наибольшую химическую стабильность. Это позволяет судить о том, что отнюдь не о химической стабильности говорит составленная ими диаграмма. Хотя образец 3 испытал потерю концентрации наночастиц серебра быстрее других, как это и ожидалось в работе [1].Если же говорить о размерных характеристиках, то образцы 1 и 2 проявили приблизительно одинаковую агрегативную устойчивость относительно образца 3.

Главный результат проделанной работы – всесторонняя отработка высокоэффективной методики анализа устойчивости частиц серебра к агрегации и воздействию внешних факторов, влияющих на их концентрацию в золе.

Благодарности и признательности

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ НШ 274.2014.3

Библиографический список:

1. Вегера А.В., Зимон А.Д. Синтез и физико-химические свойства наночастиц серебра, стабилизированных желатином //Известия Томского политехнического университета. Т. 309. № 5.С. 60 – 64.2006.

2. Титов А.В., Варшавский М.С., Лопатько К.Г., Касьяненко Н.А. Изучение взаимодействия наночастиц серебра с молекулой ДНК в водно-солевом растворе // Вестник СПбГУ. Сер. 4. 2011. Вып. 4.С. 229 – 233.

3. Крутяков Ю.А., Кудринский А.А., Оленин А.Ю., Лисичкин Г.В. Синтез и свойства НЧ серебра: достижения и перспективы // Успехи химии. 2008. Т. 77. №3. С 242 – 269.

4. Шевцова В.И., Шайдук П.И. Положение полосы поверхностного плазмонного резонанса в коллоидных растворах наночастиц серебра и золота // Вестник БГУ. Сер. 1.2012.№ 2. С 15 – 18.

5. Desai R., Mankad V., Gupta S.K., Jha P.K. Size distribution of silver nanoparticles: UV-visible spectroscopy assessment // Nanoscience and nanotechnology letters.2012. Vol. 4. pp. 30 – 34.

6. Мацкевич Е.П., Прокопьев С.Л. Особенности агрегации наночастиц в коллоидных растворах, синтезированных боргидридным методом // Вестник БГУ. Сер. 1.2012.№ 2. С 52 – 56.

Изучение антифрикционных свойств металлополимерных покрытий, полученных методом электроосаждения

Соколенко А.И., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, asokolenko@rambler.ru

Скибина Л.М., Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Бурдина Е.И., Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Доказано, что механизм образования исследуемых металлополимерных покрытий сводится к образованию комплексных соединений катионов металлов с КПЛ в объеме электролита или на электродной поверхности с последующим их разрядом. Варьирование концентрации КПЛ в электролите оказывает влияние на состав покрытия и его триботехнические характеристики.

Ключевые слова: безызносность, метал-полимерные композиты, электроосаждение, антифрикционные свойства, покрытия.

Abstract. It is known that the process of wear of antifriction metal-polymer composites and coatings is accompanied by specific effects: the effect of antiwear and the phenomenon of tribromoimidazole . The implementation of such friction effects on the thin metal-polymer coatings obtained by the electrodeposition of metals and cyclic lactams cannot be excluded. However, the process of electrochemical formation of multilayer coatings is associated with a number of complex physico-chemical phenomena, which will predetermine further their tribotechnical descriptions.

Keywords: antiwear, metal-polymer composites, electrodeposition, antifriction properties, coating

Известно, что процесс трения металлополимерных материалов и композиционных антифрикционных покрытий на их основе сопровождается рядом специфических эффектов: эффектом безызносности [1, 2] и явлением трибополимеризации [3, 4]. В тонких металлополимерных покрытиях, полученных электроосаждением металлов и циклических лактамов [5, 6], реализация таких эффектов при трении не исключена. Однако процесс формирования электрохимических металлополимерных покрытий связан с рядом сложных физико-химических явлений, которые будут предопределять в дальнейшем их триботехнические характеристики.

Целью данной работы является изучение кинетики, механизма электроосаждения и антифрикционных свойств кадмийполимерных и медьполимерных покрытий.

Кадмийполимерные и медьполимерные покрытия наносились на стальные образцы методом стационарного электролиза из подготовленных электролитов. Кинетика процесса электроосаждения изучалась методами хронопотенциометрии и хроновольтамперометрии. Для исследования адсорбционных явлений, протекающих в объеме раствора и на осаждаемой поверхности, применялся метод импедансных измерений. Содержание ε-капролактама в покрытии определяли методом химического анализа [7]. Трибологические свойства металлополимерных покрытий в паре трения со сталью в вазелиновом масле исследовались на машине трения типа АЕ-5, при нагрузке P = 1 мПа, скорости относительного скольжения v= 0,5 м/с, температуре T = 298 К.

В результате электроосаждения получались плотные, матовые, мелкокристаллические металлополимерные покрытия с толщиной 20 мкм, обладающие хорошей адгезией к основе.

Исследование кинетики катодных процессов позволило установить, что введение КПЛ в состав электролита кадмирования мало влияет на характер зависимости тока обмена от мольной доли спирта в электролите, которая имеет немонотонную закономерность. Влияние КПЛ на скорость электродного процесса, оцениваемая по коэффициенту эффективности ($K_{эф}$): $K_{эф} = \frac{j_0^{б/д}}{j_0^{u}}$, где $j_0^{б/д}$ и j_0^{u} – токи обмена реакции электровосстановления ионов металла в чистом электролите и с добавкой КПЛ соответственно, показало что добавка капролактама приводит к росту тока обмена и к уменьшению коэффициента эффективности с ростом ее концентрации (рис.1.а.). Полученных данных свидетельствуют, что введение КПЛ в состав электролита приводит к ускорению процесса электровосстановления ионов кадмия. Характер влияния КПЛ на процесс электровосстановления меди иной. Здесь отмечается уменьшение тока обмена и увеличение коэффициента эффективности (рис.1.б.), что указывает на торможение процесса восстановления ионов меди.

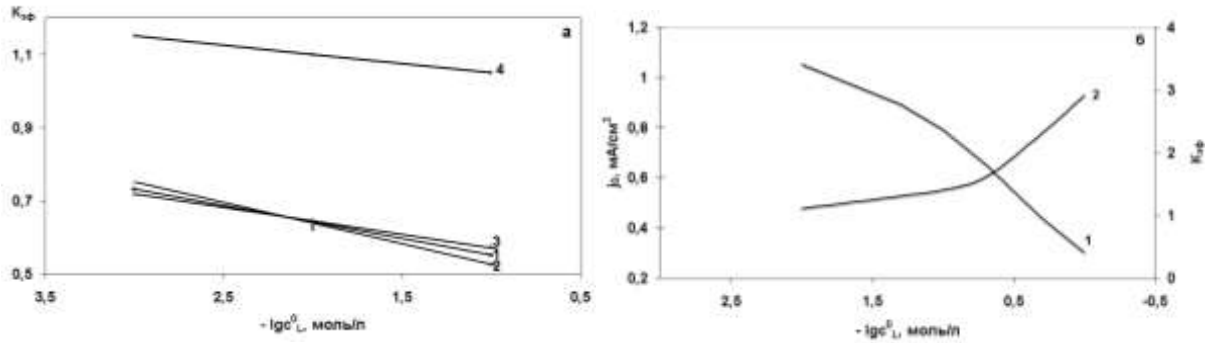
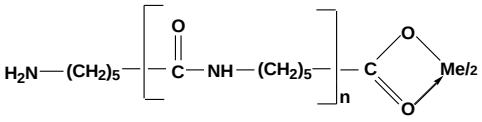


Рис.1. Зависимость коэффициента эффективности ε-капролактама ($К_{эф}$) и тока обмена (j_0) от логарифма концентрации ε-капролактама: а) в водном (1) и водно-этанольных электролитах кадмирования (2,3,4) при мольных долях спирта соответственно 0,17; 0,32; 0,94; б) в водном электролите меднения.

Механизм формирования покрытий протекает следующим образом. Первоначально, ионы кадмия и меди вступают в реакцию комплексообразования с молекулами КПЛ. Комплексные соединения меди формируются в адсорбционном слое, что подтверждается изменением величины адсорбции электроактивных комплексов (Γ) и степени заполнения поверхности медного катода (θ'). Комплексные соединения ионов кадмия образуются в объеме раствора, на что указывает антибатный характер зависимостей Γ и θ'от объемной концентрации КПЛ. Далее в процессе разряда участвуют образованные комплексные соединения металлов в условиях преимущественной адсорбции на поверхности молекул КПЛ.

Поскольку, катионы двухвалентных металлов с ε-капролактамом образуют соединения состава 1:2, простейшие из них, по-видимому, имеют структуру с координацией металла по концевым карбонильным группам олиго- и полимерных продуктов электрополимеризации КПЛ



В связи с тем, что состав осаждаемого слоя, а вместе с ним и его свойства зависят от состава электролита и условий электроосаждения, то варьирование его состава сказывается не только на кинетике осаждения, но и на свойствах металлополимерных покрытий. Данные химического анализа осадков показали, что капролактам включается в состав покрытий и его содержание увеличивается с ростом концентрации КПЛ в растворе электролита, что существенно сказывается на их трибологических свойствах. Результаты трибологических исследований показали, что введение КПЛ в состав металлополимерных покрытий способствует улучшению их антифрикционных свойств. Уже при малом содержании КПЛ (3%) коэффициент трения уменьшается в два раза по сравнению с покрытиями чистого металла. Снижением коэффициента трения металлополимерных покрытий обусловлено тем, что температурные и деформационные воздействия, возникающие в зоне трения, способствуют формированию на поверхности покрытия тонкой пленки, обладающей низким сопротивлением сдвигу. Недостатком тонких электрохимических покрытий является сравнительно малый ресурс.

Таким образом, можно утверждать, что механизм образования исследуемых металлополимерных покрытий сводится к образованию комплексных соединений катионов металлов с КПЛ в объеме электролита или на электродной поверхности с последующим их разрядом. Варьирование концентрации КПЛ в электролите оказывает влияние на состав покрытия и его триботехнические характеристики.

Библиографический список

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника.- М.: Машиностроение.- 1985.- 420с.

2. Кужаров А.С. Координационная трибохимия избирательного переноса. //Автореф. Дис… докт.техн.наук. - Ростов-на-Дону, 1991. - 42 с.

3. Заславский Ю.С., Заславский Р.Н. Образование полимеров трения – новый принцип действия смазочных материалов. – М.: ЦНИИТЭ Нефтехим. – 1976. – 44 с.

4. Белый В.А., Плескачевский Ю.М. Металлополимерные системы. – М.: Знание. – 1982. – 64 с.

5. Скибина Л.М., Бурдина Е.И., Кужаров А.А., Соколенко А.И. Влияние природы и строения органических компонентов сульфатного электролита меднения на кинетику электроосаждения, структуру и физико-механические свойства покрытий // Физикохимия поверхности и защита материалов”, Изд-во МАИК – 2014 - Т.50 - №3.- с. 325.

6. Соколенко А.И. Кинетика и свойства металлополимерных покрытий на основе меди и кадмия из водных и водно-этанольных электролитов. //Дис…канд.хим.наук. – Ростов-на-Дону, 2003. - 202 с.

7. Вячеславов П.М. Новые электрохимические покрытия. - Л.: Лениздат. - 1972.-142 с.

УДК546.55/.59.546.04.544.169

Исследование взаимодействия атома меди и ее ионов с азотсодержащими молекулами

Дроган Е.Г., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, c-si-ge@mail.ru
Кочергин Е. С., Воронежский педагогический университет, г. Воронеж, Россия, ev10011994@gmail.com
Милов А.А., Южный научный центр РАН, г . Ростов-на-Дону, Россия, aleksei_milov@list.ru

Аннотация. При помощи DFT расчетов были проанализированы комплексы атома и ионов меди с различными азотсодержащими молекулами в том числе и с теми которые используются для получения кластеров меди. Показано, что наиболее прочные комплексы восстановленной меди с азотным центром реализуются в системах где атом азота соединен двойной связью с другим гетероатомом (например, азот или кислород). Следующие по прочности комплексы получаются с молекулами где азот соединен тройной связью. Наименьшие значения комплексообразования с металлической медью дают структуры с ординарной связью азота (производные аммиака) и где атом азота включен в цепь сопряжения (пиридин, пиррол). В этом случае, сила контакта Cu-Nощутимо уступает силе взаимодействия Cu-O_2.

Ключевые слова: поверхность, нанокластер, медь, гибридизация азота, механизм роста, теория функционала плотности, комплексообразование.

Abstract. Using DFT calculations were analyzed atom and complexes of copper ions with various nitrogen-containing molecules, including those that are used for producing copper clusters. It is shown that the most stable complexes with the reduced copper nitrogen centers implemented in systems where a nitrogen atom connected by a double bond to another heteroatom (e.g., nitrogen or oxygen). The following complexes are obtained on the strength with molecules which nitrogen is connected triple bond. The lowest values of complexing with metallic copper provide a structure with a single bond nitrogen (ammonia derivatives) and where a nitrogen atom is included in the interface circuit (pyridine, pyrrole). In this case, the force of contact Cu-N significantly inferior to the strength of interaction Cu-O_2

Keywords: surface, nanocluster, copper, hybridization of nitrogen, growth mechanism, density functional theory, complex.

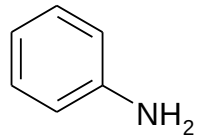
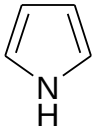
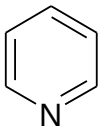
Для исследования процессов образования, роста и стабилизации кластеров металлов важно иметь точное представление о процессах, происходящих на границе раздела фаз: взаимодействие поверхности кластера металла с окружающей средой (растворами и газовыми смесями), переносы ионов металла, а также роль элементорганических соединений в этих процессах[1-2].

Для определения влияния электронного строения азотного центра на стабилизацию образуемых им комплексов с поверхностью меди исследованы комплексы с реализацией межмолекулярного Cu···N контакта. Были исследованы следующие азотсодержащие молекулы: карбамовая кислота H_2N-COOH и анилин H_2N-Ph; азотный центр в системе сопряжения - пиррол HNC_4H_4 и пиридин NC_5H_5; азот с двойной связью - HN=CH_2 (метанилин), HN=NH(диазен) и HN=O

(нитроксил); азот с тройной связью – роданид лития NCS···Li, цианид лития N≡C···Li и азот N_2. Для сравнения, для некоторых кластеров меди рассчитаны комплексы с молекулярным кислородом.

Результаты расчетов методом функционала плотности PBEPBE с использованием псевдопотенциального базиса Lanl2DZ и программы Gaussian03 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Данные расчета методом PBEPBE/Lanl2DZдля комплексов с контактом M•···N.Приведены энергии комплексообразования (разность полных энергий комплекса и суммы полных энергий его компонентов) M-Хконтактов (в ккал/моль).

Молекула	M=Cu		
	Газовая фаза	n-Гептан	Этиленгликоль
H_2N-COOH	7.29	7.33	
	13.76	13.97	14.61
	12.65	12.43	12.47
	21.37	19.64	21.44
$HN=CH_2$	24.40	17.42	23.50
HN=NH	31.02	28.82	32.75
HN=O	46.92	46.85	54.07
NCS···Li	16.82	10.92	12.82
N≡N	14.25	14.43	14.88
N≡C···Li	23.36	17.42	
O=O	29.36		

Как показывают расчеты, в условиях газовой фазы(вакуум) все производные аммиака существенно проигрывают по устойчивости своих комплексов с поверхностью кластеров меди как воде, так и молекуле кислорода. Переход к молекулам пиррола и пиридина, где азот включен в цепь сопряжения, ощутимо повышает устойчивость комплексов. Так, молекула пиридина прочнее связывается с поверхностью медного кластера чем молекулы воды и кислорода, и таким образом может препятствовать их контакту с металлом.

Наиболее стабильные комплексы с медью дают молекулы, в которых азотный центр связан двойной связью с гетероатомом, при этом сила взаимодействия Cu-N растет в ряду $HN=CH_2$<HN=NH<HN=O. Стабильность таких структур значительно превышает устойчивость комплексов с молекулами кислорода или воды.

Органические молекулы в которых азот связан тройной связью занимают промежуточное положение по силе стабилизации их комплексов с медью, при этом структуры $Cu_n{\cdots}N_2$ по всем пунктам проигрывает комплексам $Cu_n{\cdots}O_2$, а токсичные соли цианида и роданида лития, показывают результаты хоть и близкие к ранее рассмотренным молекулам HN=Y (Y=CH_2, NH, O), но более низкие по энергетике.

Тенденции обнаруженные для комплексов нейтральной меди с молекулами содержащими азот полностью повторяются при переходе к ионам. Учет влияния среды показывает, что стабилизация всех структур усиливается при переходе к полярной апротонной среде двухатомного спирта. Переход в неполярную среду по-разному влияет на устойчивость комплексов с контактом Cu-N.

Выводы

Результаты расчета показали перспективность использования азотсодержащих функциональных групп в качестве стабилизаторов нанопорошков меди, при этом, наиболее перспективные фрагменты синтетически доступны и имеют существенно большую эффективность и экологичность, чем ряд традиционно используемых систем.

Библиографический список.

1. Герасина Ю.С., Милов А.А., Кужаров А.А. Вестник ЮНЦ РАН, 2015, Т.11, № 2, с.23-29

2. Герасина Ю.С., Милов А.А., Кужаров А.А., Кужаров А.С. Инновации, экология и ресурсосберегающие технологии (ИНЭРТ-2014). Материалы XI Международного научно-технического форума. 2014. С. 718-722.

УДК 62-592.133

Оптимальный угол установки колодок в двухколодочном тормозе одностороннего действия

Петров А.М., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия. petrov_a_m@mail.ru

Аннотация. Целью настоящей работы является определение оптимального угла установки колодок в двухколодочном тормозе одностороннего действия, обеспечивающего минимальный износ антифрикционного материала колодок. Составлена и решена система уравнений равновесия сил, действующих на несимметричный башмак тормоза, с учетом распределенного характера сил давления и трения в контакте колодки и тормозного шкива. Определены условия соответствия полученного решения известной приближенной формуле расчета угла установки колодок. На примере тормоза ТТ200 показано, что различие результатов расчета по уточненной и приближенной формулам достигает 37%. Также показано, что применение несимметричных относительно оси подвеса башмаков целесообразно для колодок из материалов с большими значениями коэффициента трения.

Ключевые слова: двухколодочный тормоз, тормозная колодка, башмак, тормозной шкив, коэффициент трения, износ.

Abstract. The aim of this work is to determine the optimal angle of installation of brake pads in the double-block brake of unilateral action that ensures minimum wear of friction pad material. With taking into account the distributed nature of the forces of pressure and friction in the contact of pads and brake pulley, the system of equations of equilibrium of the forces acting on the asymmetrical brake shoe has been formulated and solved. The conditions of conformity of the obtained solution and the known approximate formula that calculates the angle of installation of the pads have been determined. It is shown in the case of TT200 brake that the difference of calculation results using precise and approximate formulas reaches 37%.It is also shown that the use of asymmetrical shoes relatively to the axis of their suspension is suitable for pad materials with large values of coefficient of friction.

Keywords: double-block brake, brake pad, shoe, brake pulley, friction coefficient, wear.

Введение

Двухколодочные тормоза находят широкое применение во многих отраслях машиностроения, в частности, в механизмах грузоподъемных и транспортирующих машин, где используют, главным образом, *нормально закрытые* тормоза, замыкание которых создается постоянно действующей упругой силой пружины, а размыкание происходит одновременно с началом передачи вращательного движения от привода на вал шкива. При выключении привода тормоз автоматически замыкается. Конструкция и описание действия двухколодочных тормозов различных типов представлены в [1 и 2].

В классической компоновке тормоз состоит из следующих основных элементов, изображенных на рис. 1: тормозного шкива 1, закрепленного на одном из валов механизма; рычагов

2, сжимаемых упругой силой пружины (на рисунке не показана); башмаков 3, шарнирно закрепленных на рычагах, и сменных тормозных колодок 4.

Размыкание тормоза производится путем силового разжимания пружины и может быть основано на электромагнитном, гидравлическом или ином действии, что в данном рассмотрении не имеет значения.

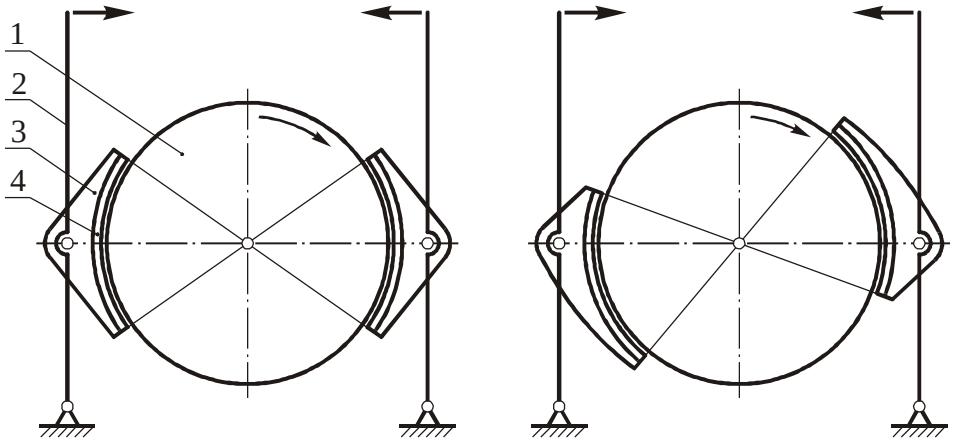


Рис. 1. Кинематическая схема тормоза: слева – с симметричными башмаками, справа – со смещенными

Одним из недостатков колодочных тормозов является действие на башмаки неуравновешенных моментов сил трения, стремящихся развернуть башмак относительно шарнира, на котором он подвешен к рычагу. Вследствие этого один из краев колодки (набегающий) сильнее прижимается к шкиву, нежели другой. В итоге различие в давлении на шкив для разных концов колодки может достигать значения в 1,8 раза [3, с. 60].

В механизмах, имеющих преимущественно одностороннее направление момента торможения, неравномерность давления приводит к неравномерности износа колодок и необходимости более частой их замены.

Известен патент [4] конструкции тормоза одностороннего действия (рис. 1, справа), в котором для выравнивания давления в зоне трения колодки и шкива предложено применять несимметричные башмаки со смещением центра поверхности трения колодок относительно осей подвеса башмаков на определенный угол γ, значение которого в описании патента определено как

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{f}{1 + R/l}, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения фрикционного материала колодки по шкиву; R – радиус шкива; l – расстояние от поверхности шкива до оси подвеса башмака (рис. 2).

Простота формулы (1) обусловлена использованием при ее выводе точечной модели контакта, не учитывающей распределенный характер сил давления и трения по поверхности колодки.

Целью настоящего исследования является уточнение зависимости (1) путем введения в рассмотрение распределенных силовых факторов в зоне контакта.

Постановка задачи

Рассмотрим плоскую систему сил, действующих на отдельно взятый башмак. Допустим, что башмак на рис. 2 расположен под оптимальным углом γ, при котором давление p на колодку постоянно по всей площади контакта. Если же предположить, что где-то в зоне контакта давление отклоняется от этого среднего значения, следует ожидать, что в результате последующей приработки выступающие места сотрутся в первую очередь и давление выровняется.

На башмак действуют:

- распределенная (погонная, Н/м) сила давления $q = pb$, где b – ширина колодки;

- распределенная сила трения fq, где f – коэффициент трения;

- реакции F_x и F_y со стороны шарнира.

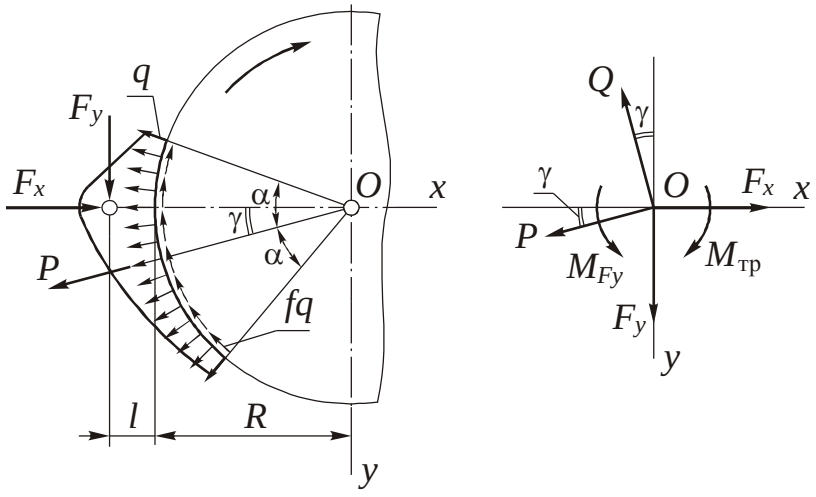


Рис. 2. Система сил, действующих на колодку тормоза,
и ее приведение к центру *O* (справа).

Требуется определить значение угла γ, при котором система перечисленных сил подчиняется условиям равновесия.

Определение связи между параметрами конструкции тормоза при оптимальной установке колодок

Систему действующих на башмак сил можно привести к любой точке пространства, не обязательно принадлежащей башмаку. В качестве такой точки удобно выбрать центр *O*. Вдоль линии

своего действия переносится сила F_x. Равномерно распределенная сила давления q имеет равнодействующую P, которая также может быть перенесена в точку *O* вдоль линии действия. Сила F_y переносится параллельно своей линии действия, поэтому перенос сопровождается добавлением момента $M_{Fy} = F_y(l + R)$. Распределенная сила трения fq приводится к главному вектору Q, очевидно перпендикулярному вектору P, и главному моменту $M_{\text{тр}}$.

Интегральные эквиваленты распределенных сил определяются формулами:

$$P = \int_{-\alpha}^{\alpha} q\cos\varphi \cdot Rd\varphi = 2pbR\sin\alpha \quad ;$$

$$Q = \int_{-\alpha}^{\alpha} fq\cos\varphi \cdot Rd\varphi = 2fpbR\sin\alpha \quad ;$$

$$M_{\text{тр}} = \int_{-\alpha}^{\alpha} fqR \cdot Rd\varphi = 2fpbR^2\alpha \quad ,$$

где интегрирование ведется в пределах угла обхвата шкива 2α.

Уравнения равновесия для системы сил, приведенных к центру *O*, имеют вид:

$$\sum M_O(\vec{F}_k) = 0; \qquad M_{Fy} - M_{\text{тр}} = 0;$$

$$\sum F_{kx} = 0; \qquad F_x - Q\sin\gamma - P\cos\gamma = 0;$$

$$\sum F_{ky} = 0; \qquad F_y - Q\cos\gamma + P\sin\gamma = 0.$$

Решение системы уравнений равновесия приводит к следующему равенству:

$$f\cos\gamma - \sin\gamma = \frac{fR\alpha}{(R + l)\sin\alpha} \quad .(2)$$

Формула (2) позволяет определить искомое значение угла γ в зависимости от параметров f, R, l и α. При этом следует заметить, что упрощенная формула (1) действительно может быть получена из (2) в предположении малых значений углов α и γ.

Полученные результаты

По формулам (1) и (2) были рассчитаны значения угла γ для двухколодочного тормоза ТТ200 при использовании фрикционных колодок из материалов с различными коэффициентами трения. Значения параметров тормоза, взятые из [2], составляют: $R = 100$ мм; $l = 25$ мм; $\alpha = 35°$. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1

f		0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50
γ,°	по формуле (1)	1,146	1,718	2,291	2,862	3,434	4,004	4,574	5,143	5,711
	по формуле (2)	0,847	1,270	1,691	2,111	2,528	2,943	3,354	3,763	4,168

Выводы

Сравнение результатов расчета показывает, что использование упрощенной формулы (1) дает завышенные значения угла γ по сравнению со значениями, полученными по формуле (2), учитывающей распределенный характер сил в зоне контакта колодки со шкивом. В случае двухколодочного тормоза ТТ200 в диапазоне изменения коэффициента трения от 0,1 до 0,5 расхождение результатов достигает 37%.

Применение несимметричных относительно оси подвеса башмаков в тормозах одностороннего действия целесообразно для колодок из материалов с большими значениями коэффициента трения, а также в тормозах с большим отношением l / R.

Библиографический список

1. Александров М.П. Подъемно-транспортные машины: Учебник для машиностроит. спец. вузов / М.П. Александров. – Москва: Высш. шк.,1985. – 520 с.

2. Руденко Н.Ф. Грузоподъемные машины. Атлас конструкций: Учебное пособие для втузов / Н.Ф. Руденко, В.Н. Руденко. – Москва: Машиностроение, 1970. – 116 с.

3. Красников В.В. Подъемно-транспортные машины / В.В. Красников. – Москва: Колос,1981. – 263 с.

4. Тормоз двухколодочный: пат. 422883 СССР. № 1783660/25-27; заявл. 15.05.72; опубл. 05.04.74. Бюл. № 13. 2 с.

УДК 519.714

О нульмерных аттракторах при синергетическом управлении динамической системой третьего порядка

Братищев А.В., Донской государственный технический университет, Россия, avbratishchev@spark-mail.ru

Аннотация. Рассмотрена динамическая система, задаваемая автономным уравнением третьего порядка. Методом аналитического конструирования нелинейных регуляторов[1] параллельным введением двух многообразий синтезирован векторный регулятор. В для агрегированных переменных специального вида получен критерий устойчивости положений равновесия соответствующей системы управления. BSIMULINKпостроенаS-модель динамической системы Рёсслера, и с ее помощью проведена численная проверка полученного критерия.

Abstract. Is examined the dynamic system, given by the autonomous equation of the third order. We synthesize the vector regulator with the analytical construction of nonlinear regulators method and the parallel introduction of two varieties. In the synergistic control theory the stability criterion of equilibrium positions of the respective control system is obtained for a special form of aggregated variables. We build the S-model of the Roessler dynamic system in SIMULINK, and with its aid the numerical checking of the obtained criterion is carried out.

Ключевые слова: динамическая система, аттрактор, синергетическое управление.

Keywords: dynamical system, attractor, synergistic control.

1. Пусть динамическая система описывается математической моделью вида

$$\begin{cases} x_1' = f_1(x_1, x_2) \\ x_2' = f_2(x_1, x_2, x_3) \\ x_3' = f_3(x_1, x_2, x_3) \end{cases} . \quad (1)$$

Такой является, например, система уравнений Рёсслера

$$\begin{cases} x_1' = -x_2 - x_3 \\ x_2' = x_1 + ax_2 \\ x_3' = b - cx_3 + x_1x_3 \end{cases}$$

если поменять местами первое и второе уравнения.

Синтезируем методом аналитического конструирования нелинейных регуляторов [1] векторный регулятор по агрегированным переменным вида $\psi_1(x_1, x_2) = x_2 + \varphi_1(x_1)$, $\psi_2(x_1, x_2, x_3) = x_3 + \varphi_2(x_1, x_2)$ с условием $T_i\psi_{it}' + \psi_i \equiv 0,\ i = 1,2$. Соответствующая система управления

$$\begin{cases} x_1' = f_1(x_1, x_2) \\ x_2' = f_2(x_1, x_2, x_3) + u_1(x_1, x_2) \\ x_3' = f_3(x_1, x_2, x_3) + u_2(x_1, x_2, x_3) \end{cases}$$,обеспечит перевод изображающей точки в окрестность пересечения многообразий $x_2 + \varphi_1(x_1) = 0,\ x_3 + \varphi_2(x_1, x_2) = 0$.

Выразим управляющие воздействия через агрегированные переменные.

$$f_2(x_1,x_2,x_3)+u_1(x_1,x_2)=x_2'=-\varphi_{1t}'+\psi_{1t}'=-\varphi_{1x_1}'f_1(x_1,x_2)-\frac{1}{T_1}\psi_1=:\tilde{f}_2(x_1,x_2)$$

.

$$f_3(x_1,x_2,x_3)+u_2(x_1,x_2,x_3)=x_3'=-\varphi_{2t}'+\psi_{2t}'=-\varphi_{2x_1}'x_1'-\varphi_{2x_2}'x_2'-\frac{1}{T_2}\psi_2=$$

$$=-\varphi_{2x_1}'f_1(x_1,x_2)-\varphi_{2x_2}'\tilde{f}_2(x_1,x_2)-\frac{1}{T_2}\psi_2=$$

$$=-\varphi_{2x_1}'f_1(x_1,x_2)+\varphi_{2x_2}'\varphi_{1x_1}'f_1(x_1,x_2)+\varphi_{2x_2}'\frac{1}{T_1}\psi_1-\frac{1}{T_2}\psi_2=:\tilde{f}_3(x_1,x_2,x_3)$$

.

Поэтому система управления будет задаваться такой автономной системой

$$\begin{cases} x_1'=f_1(x_1,x_2) \\ x_2'=-\varphi_{1x_1}'f_1(x_1,x_2)-\frac{1}{T_1}\psi_1(x_1,x_2)=:\tilde{f}_2(x_1,x_2) \\ x_3'=-\varphi_{2x_1}'f_1(x_1,x_2)+\varphi_{2x_2}'\varphi_{1x_1}'f_1(x_1,x_2)+\varphi_{2x_2}'\frac{1}{T_1}\psi_1(x_1,x_2)-\frac{1}{T_2}\psi_2(x_1,x_2,x_3)=:\tilde{f}_3(x_1,x_2,x_3) \end{cases}$$

.(2)

Положениями равновесия этой системы (x_1^0,x_2^0,x_3^0) являются решениями системы

$$\begin{cases} f_1(x_1,x_2)=0 \\ \psi_1(x_1,x_2)=0 \\ \psi_2(x_1,x_2,x_3)=0 \end{cases}$$

.(3)

Для определения их характера вычислим характеристический многочлен матрицы Якоби правой части системы (2) в точке (x_1^0,x_2^0,x_3^0).

$$\begin{vmatrix} f_{1x_1}'-\lambda & f_{1x_2}' & 0 \\ \tilde{f}_{2x_1}' & \tilde{f}_{2x_2}'-\lambda & 0 \\ \tilde{f}_{3x_1}' & \tilde{f}_{3x_2}' & -\frac{1}{T_2}-\lambda \end{vmatrix}_{(x_1^0,x_2^0,x_3^0)} = -\left(\frac{1}{T_2}+\lambda\right)\cdot\begin{vmatrix} f_{1x_1}'-\lambda & f_{1x_2}' \\ -\varphi_{1x_1}'f_{1x_1}'-\frac{1}{T_1}\varphi_{1x_1}' & -\varphi_{1x_1}'f_{1x_2}'-\frac{1}{T_1}-\lambda \end{vmatrix}_{(x_1^0,x_2^0,x_3^0)} =$$

$$=-\left(\lambda+\frac{1}{T_2}\right)\cdot\left(\lambda+\frac{1}{T_1}\right)\cdot\left(\lambda-f_{1x_1}'+\varphi_{1x_1}'f_{1x_2}'\right)$$

Тогда по теореме Ляпунова об устойчивости по первому приближению [2] получаем такой результат.

ТЕОРЕМА. Пусть (x_1^0,x_2^0,x_3^0), есть положение равновесия системы управления (2), то есть является решением системы уравнений (3). Оно устойчиво и является узлом, если удовлетворяет неравенству

$$\frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x_1^0, x_2^0) - \frac{d\varphi_1}{dx_1}(x_1^0)\frac{\partial f_1}{\partial x_2}(x_1^0, x_2^0) < 0 \quad .(4)$$

Если $\frac{\partial f_1}{\partial x_1}(x_1^0, x_2^0) - \frac{d\varphi_1}{dx_1}(x_1^0)\frac{\partial f_1}{\partial x_2}(x_1^0, x_2^0) > 0$, то положение равновесия (x_1^0, x_2^0, x_3^0) является седлом.

2.Параллельное управление в системе Рёсслера будем осуществлять по первой и третьей переменным $\begin{cases} x_1' = -x_2 - x_3 + u_1(x_1, x_2) \\ x_2' = x_1 + ax_2 \\ x_3' = b - cx_3 + x_1x_3 + u_2(x_1, x_2, x_3) \end{cases}$,а агрегированные переменные

выберем в виде $\psi_1(x_1, x_2) = x_1 + \varphi_1(x_2) := x_1 + \beta_{12}x_2 + \frac{x_2^2}{2} = 0$ (параболический цилиндр),

$\psi_2(x_1, x_2, x_3) = x_3 + \varphi_2(x_1, x_2) := x_3 + \beta_{21}x_1 + \beta_{22}x_2 + \frac{x_1^2 + x_2^2}{2} = 0$ (круговой параболоид).

В этом случае уравнение замкнутой системы управления принимает вид

$$\begin{cases} x_1' = -(\beta_{12} + x_2)(x_1 + ax_2) - \frac{1}{T_1}\left(x_1 + \beta_{12}x_2 + \frac{x_2^2}{2}\right) \\ x_2' = x_1 + ax_2 \\ x_3' = -(\beta_{22} + x_2)(x_1 + ax_2) + (\beta_{21} + x_1)\left((\beta_{12} + x_2)(x_1 + ax_2) + \frac{1}{T_1}\left(x_1 + \beta_{12}x_2 + \frac{x_2^2}{2}\right)\right) - \\ \qquad -\frac{1}{T_2}\left(x_3 + \beta_{21}x_1 + \beta_{22}x_2 + \frac{x_1^2 + x_2^2}{2}\right) \end{cases} ,(5)$$

а ее положения равновесия являются решениями системы уравнений

$$\begin{cases} x_1 + \beta_{12}x_2 + \frac{x_2^2}{2} = 0 \\ x_1 + ax_2 = 0 \\ x_3 + \beta_{21}x_1 + \beta_{22}x_2 + \frac{x_1^2 + x_2^2}{2} = 0 \end{cases}$$

Система имеет два решения

$$\begin{cases} x_1^0 = -2a^2 + 2a\beta_{12} \\ x_2^0 = 2a - 2\beta_{12} \\ x_3^0 = x_2^0\left(a\beta_{21} - \beta_{22} - \frac{a^2 + 1}{2}x_2^0\right) \end{cases}$$

, (6)

$$\begin{cases} x_1^0 = 0 \\ x_2^0 = 0 \\ x_3^0 = 0 \end{cases}$$

.

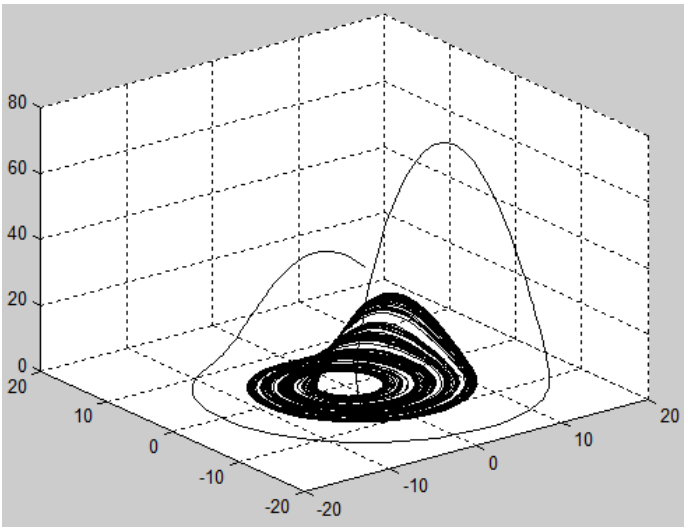
Условие их устойчивости (4) принимает вид

$$\frac{\partial f_2}{\partial x_2} - \frac{d\varphi_1}{dx_2}\frac{\partial f_2}{\partial x_1} = a - \beta_{12} - x_2^0 < 0 \quad (7)$$

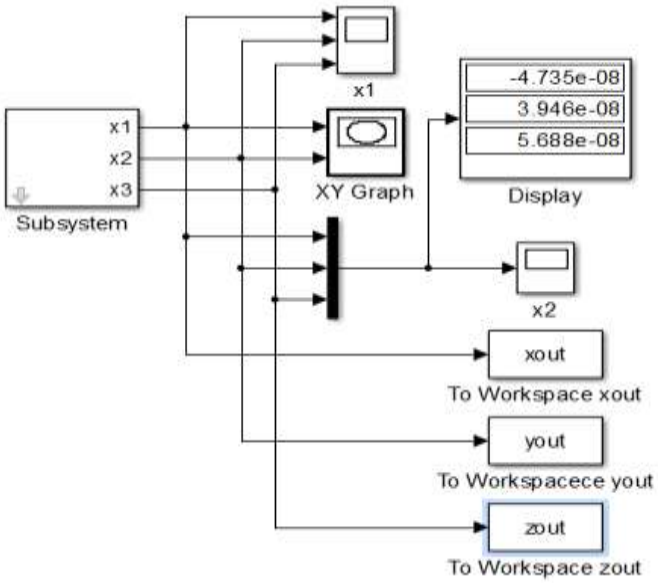
.

Проверим точность этого условия для системы Рёсслера с конкретными значениями параметров [3] $\begin{cases} x_1' = -x_2 - x_3 \\ x_2' = x_1 + 0,2x_2 \\ x_3' = 0,2 - 5,7x_3 + x_1x_3 \end{cases}$.

Траектория с начальным состоянием (10,10,20) свидетельствует о хаотическом характере этой системы (см. рисунок).



Построим в SIMULINK такую *S*-модель регулятора (5) по переменным x_1, x_3



Для валидации *S*-модели выберем для определенности $T_1 = T_2 = 1,\ \beta_{21} = 2,\ \beta_{22} = 0$.

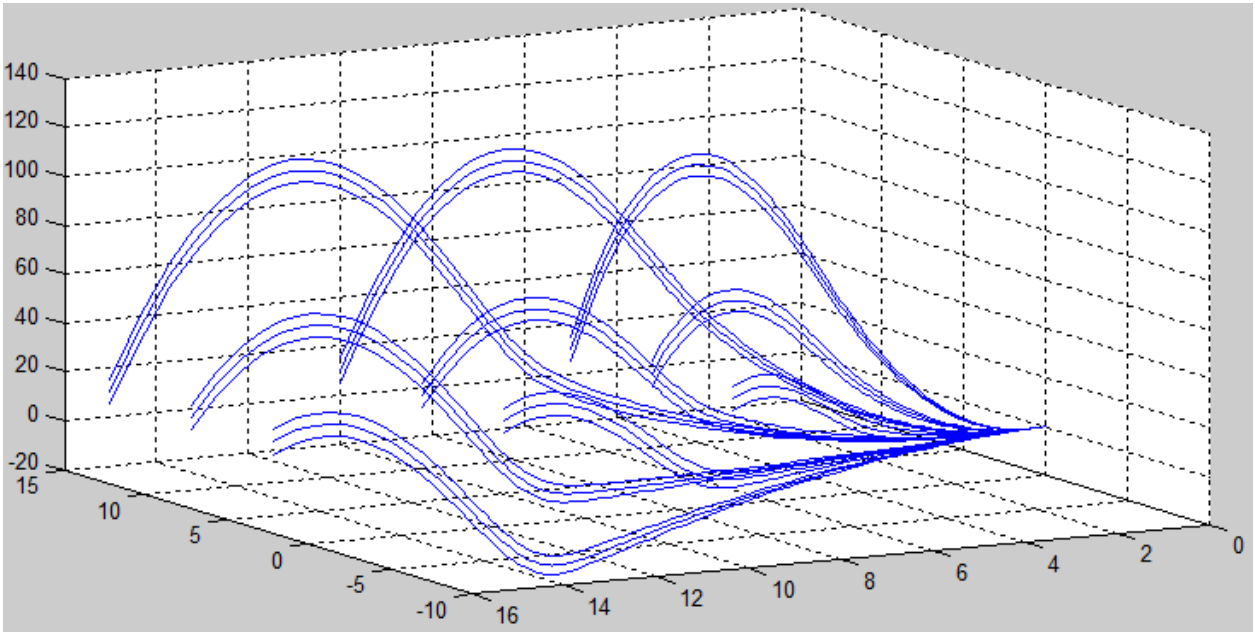
В случае $\beta_{12} = 0,1$, условие (7) выполнено для первого положения равновесия $x_1^0 = -0,04,\ x_2^0 = 0,2,\ x_3^0 = -0,0008$, вычисленного по формуле (6). При этом в результате вычислительного эксперимента для траектории с начальными данными (100,100,100) и временем симуляции t=10000 на дисплее получено такое конечное состояние $x_1^0 = -0,04,\ x_2^0 = 0,2,\ x_3^0 = -0,00080002$.

В случае $\beta_{12} = 0,3$, условие (7) выполнено для второго положения равновесия $x_1^0 = x_2^0 = x_3^0 = 0$. При этом в результате вычислительного эксперимента для той же траектории на дисплее получено такое конечное состояние

$x_1^0 = -5 \cdot 10^{-8},\ x_2^0 = 4 \cdot 10^{-8},\ x_3^0 = 6 \cdot 10^{-8}$.

Для последнего случая составим программу рисования 27 траекторий в фазовом пространстве.

```
for x1=5:5:15
for x2=5:5:15
for x3=5:5:15
opts=simset('InitialState',[x1,x2,x3]);
set_param('Rossler_control_1', 'InitInArrayFormatMsg', 'None')
[t,x]=sim('Rossler_control_1',1000,opts);
hold on;
plot3(x(:,1),x(:,2),x(:,3))
end
end
end
```



Видно, что все они стягиваются к положению равновесия (0,0,0).

Результаты статьи доложены на конференции [4]. Формулы (2), (4) уточняют соответствующие формулы статьи [4].

Библиографический список:

1. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами. Теория системного синтеза. М.: URSS, 2005, 219 с.

2. Демидович Б.П. Лекции по математической теории устойчивости. М.: Наука, 1967, 472 с.

3. Спротт Дж. К. Элегантный хаос: алгебраически простые хаотические потоки. М.- Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2012.- 328 с.

4. Братищев А.В. Условие устойчивости нульмерного многообразия при синергетическом управлении. Тезисы конференции "Современные проблемы теории операторов и гармонического анализа и их приложения - V", ЮФУ, ДГТУ, Ростов-на-Дону, 26.4.2015-1.05.2015, с. 167.URL: http://www.karapetyants.sfedu.ru/conf/

УДК 621.791.03-52

Управление реализацией технологических процессов механообработки с учетом динамического состояния производственных систем

Иванов А.А., Саратовский государственный технический университет Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия.
Бржозовский Б.М., Саратовский государственный технический университет Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия.
Бочкарев П.Ю., Саратовский государственный технический университет Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия.

Аннотация. Повышение эффективности функционирования мелкосерийных механообрабатывающих производственных систем является актуальной задачей на сегодня. Резервы повышения эффективности, в том числе, находятся в разработке новых способов управления производством, особенно таких, которые способны учитывать динамику производства в виде контроля изменений в производственной ситуации. Наибольшим потенциалом в этом плане обладает концепция повышения эффективности управления за счет использования автоматизированных систем управления с возможностью объединения проектных процедур технологической подготовки производства (ТПП) и реализации технологических процессов (ТП), информационно взаимосвязанных едиными целями, и обладающих обратной связью с производством по технико-организационным параметрам. В наибольшей степени этой концепции удовлетворяет система автоматизированного планирования САПЛ-ТП, в отличие от других систем обладающая архитектурными и функциональными особенностями для ее реализации. За счет многовариантности создаваемых ТП в подсистеме проектирования САПЛ-ТП появляется возможность учета динамики производства через механизм оперативного синтеза модели реализации ТП механообработки на базе альтернативного варианта ТП при изменении производственной ситуации. Для эффективного применения САПЛ-ТП отсутствует глубокая проработка процедур реализации ТП, в основном связанная с отсутствием на сегодня адекватных моделей и алгоритмов реализации ТП механообработки. Для устранения недостатка разработаны специальные модели и алгоритмы реализации ТП, учитывающие по отдельности и вместе такие особенности многономенклатурного производства как объединение технологического оборудования в группы по типу обрабатываемых операций и сложность переналадки оборудования в зависимости от последовательности обработки деталей на нем. Учет таких важных особенностей позволяет составлять более точные и прогнозируемые реализации ТП. В зависимости от организации производства, каждая из указанных моделей может использоваться самостоятельно. Представлен метод поиска оптимальной реализации технологических процессов, а также результаты промышленных и имитационных экспериментов.

Ключевые слова: Планирование производства, динамическое планирование, модель мелкосерийного производства механообработки, реализация технологических процессов, автоматизированное планирование

Abstract. Increase of efficiency of functioning of small-scale mechanoprocessing production systems is an actual task for today. Efficiency increase reserves are in development of new ways of production management, especially such which are capable to consider dynamics of production in the form of control of changes in a production situation. The greatest potential in this plan the concept of increase of management efficiency due to use of automated control systems with possibility of association of design procedures of the technological preparation of production (TPP) and realization of the technological processes (TP) possesses, is information interconnected by the uniform purposes, and possessing feedback with production in technical and organizational parameters. Most this concept the system of the automated planning of SAPL-TP unlike other systems possessing architectural and functional features for its realization satisfies. Due to diversity of the created TP in a subsystem of design of SAPL-TP there is a possibility of the accounting of dynamics of production via the mechanism of expeditious synthesis of model of realization of TP

of mechanoprocessing on the basis of alternative option of TP at change of a production situation. For effective application of SAPL-TP there is no the deep study of procedures of realization of TP which is generally connected with lack for today of adequate models and algorithms of realization of TP of mechanoprocessing. The special models and algorithms of realization of TP considering separately and together such features of multinomenclature production as association of processing equipment in groups on type of the processed operations and complexity of readjustment of the equipment depending on sequence of processing of details on it are developed for elimination of a shortcoming. The accounting of such important features allows to make more exact and predicted realization of TP. In dependence on the organization of production, each of the specified models can independently be used. The method of search of optimum realization of technological processes, and also results of industrial and imitating experiments is presented.

Keywords: Production planning, dynamic planning, model of small-scale mechanoprocessing production, realization of technological processes, the automated planning

По данным различных источников доля мелкосерийных производств в России составляет 60-70%.Эффективность их функционирования остается еще очень низкой[1]. Многие исследователи отмечают, что резервы повышения эффективности находятся не только в повышении уровня автоматизации оборудования и его надежности, но и в разработке новых способов управления производством, особенно таких, которые способны учитывать динамику производства в виде контроля изменений в производственной ситуации. Наибольшим потенциалом в этом плане обладает концепция повышения эффективности управления за счет использования автоматизированных систем управления с возможностью объединения проектных процедур технологической подготовки производства (ТПП) и реализации технологических процессов (ТП), информационно взаимосвязанных едиными целями, и обладающих обратной связью с производством по технико-организационным параметрам.

В настоящее время в наибольшей степени этой концепции удовлетворяет система автоматизированного планирования САПЛ-ТП, разрабатываемой на базе Саратовского государственного технического университета. Другие существующие известные подходы к управлению действующими производственными системами (ПС) механообработки, основаны на групповых, типовых и множественных методах разработки технологических процессов. Эти подходы на стадии разработки ТП определенным образом влияют на принятие решений при реализации ТП. Но это влияние носит чисто ограничительный характер. Отличие САПЛ-ТП, в которой применяется метод планирования многономенклатурных ТП, заключается в едином информационном методическом и критериальном подходе, как на стадии разработки, так и на стадии реализации ТП.

Для создания такой автоматизированной системы первоочередной задачей является установление информационных взаимосвязей всех этапов проектирования и реализации ТП. На рисунке 1 представлена обобщенная структура информационного обеспечения САПЛ-ТП. Основными функциональными элементами здесь являются подсистема Проектирования и

Реализации ТП. Для работы этих подсистем необходимы знания о состоянии ПС, технических характеристиках ПС, деталей и заготовок. Для этого предусмотрено наличие соответствующих баз данных (на рисунке 1 слева), информация в которых постоянно обновляется на основе контроля множества технических и информационно-организационных показателей и величин по каналу обратной связи между производственной системой и подсистемой реализации.

За счет многовариантных ТП, создаваемых в подсистеме проектирования, и передачи в подсистему реализации наилучшего с точки зрения выбранного критерия управления производством варианта технологического процесса, а также благодаря наличию связи между подсистемой реализации и производственной системой, появляется возможность эффективного использования САПЛ-ТП для автоматизации управления многономенклатурным механообрабатывающим производством (ММП) на этапе реализации ТП.

Рисунок 1 – Обобщенная структура информационного обеспечения САПЛ-ТП

За счет перечисленных особенностей САПЛ-ТП появляется возможность учета динамики производства через механизм оперативного синтеза модели реализации ТП механообработки на базе альтернативного варианта ТП при изменении производственной ситуации.

При глубокой проработке этапов проектирования ТП, в САПЛ-ТП не выполнена проработка задач этапа реализации ТП: определение оптимального управления реализацией ТП заданной номенклатуры деталей на основе реального состояния ТО и складывающейся производственной ситуации на момент запуска, а также корректировка управления в зависимости от изменения производственной ситуации. В данной работе рассматривается только первая задача, не проработка которой в большей степени вызвана отсутствием на сегодняшний день адекватных мат моделей реализации ТП, учитывающих основные особенности мелкосерийного механообрабатывающего производства, и как следствие отсутствием алгоритмов поиска оптимальных решений на базе таких моделей.

С учетом опыта различных зарубежных и отечественных исследований в области дискретных многостадийных систем предлагается эволюционный подход к построению модели такого сложного процесса как реализация ТП механообработки. Базовая модель постепенно расширяется путем добавления в нее не учтенных особенностей процесса механообработки мелкосерийного производства. Дискретный характер производства позволяет воспользоваться опытом теории расписаний и теории операций и в качестве подхода при построении базовой модели выбрать подход построения модели системы с «различными (фиксированными) порядками прохождения». В ней приняты два важных допущения по отношению к реальному процессу:

- Допущение по сложности переналадок оборудования – в базовой модели не учитывается сложность переналадки ТО в зависимости от последовательной обработки операций различных деталей, а зависят от назначенного ТО и учтены в $T_{\text{шт.к.}}$ операции.

- Допущение по объединению ТО в группы –в базовой модели не предполагается наличие идентичного ТО и, как следствие, отсутствует объединение ТО в группы, каждой операции назначается для обработки конкретное ТО.

Рисунок 2 – Эволюционный процесс построения моделей реализации ТП

В работе реализован учет в базовой модели указанных допущений, что позволило получить адекватные модели реализации ТП механообработки, и на их базе составлять более точные и прогнозируемые реализации ТП. В работе представлены способы информационной иерархической увязки подсистем проектирования ТП и реализации ТП в САПЛ-ТП, с целью оперативного синтеза трех видов моделей реализации ТП, учитывающих по отдельности и вместе указанные допущения. В зависимости от организации мелкосерийного механообрабатывающего производства, каждая из них может использоваться самостоятельно.

Каждая модель представлена в работе в двух видах: в виде дизъюнктивного графа и в аналитическом в виде формализованной задачи в терминах смешанного целочисленного линейного программирования (СЦЛП). Критерием оптимизации является минимизация общего времени работы производственной системы по изготовлению заданной номенклатуры деталей, т.к. его минимизация приводит к максимуму загрузки ТО, что до сих пор является одной из основных задач в механообрабатывающем производстве.

В диссертационном исследовании была разработана классификационная схема методов, способных решить задачу оптимальной реализации ТП на базе полученных моделей. Разработанные модели с учетом критерия представляют собой NP-трудные нелинейные задачи оптимизации большой размерности. Учитывая это, а также требование практики – ограничение по времени поиска решения составляет 5-10 минут – в данной работе был сделан выбор в пользу использования эвристик. Среди эвристик наиболее продвинутыми методиками на сегодня являются Метаэвристики. Учитывая их многообразие, в работе были сформулированы критерии отбора, которые позволили сделать выбор в пользу применения метода поиска с запретом (TS) для решения задач оптимальной реализации ТП.

Основная проблема, которые возникли в применении метода это построение эффективной окрестности, которая состоит из проблем выбора ее размерности и поиска эффективного способа построения допустимой окрестности.

В работе доказывается, что для данной задачи при построении окрестности достаточно ограничиться только элементарными перемещениями операций критического пути графа задачи. Очевидно также, что не всякое перемещение операции приведет к допустимому решению, т.к. при этом в новом графе могут возникнуть циклы.

Известны три способа выполнения допустимых перемещений, используемые для других типов задач:

1) гарантированная фильтрация допустимых перемещений[2],

2) сохранение топологической сортировки графа [2],

3) теория вставки в частичный граф [3].

Каждый из представленных способов имеет свои недостатки, не позволяющие использовать только его при построении эффективной окрестности для данных типов задач.

В работе был предложен новый метод построения эффективной окрестности для задачи поиска оптимальной реализации ТП механообработки в ММП, объединяющий достоинства указанных подходов к допустимости и минимизирующий их недостатки. Новизна разработанной окрестности как в рациональном назначении для каждого перемещения одного из трех подходов к соблюдению допустимости, так и в способе эффективной адаптации подходов к данной задаче.

В результате для первого подхода разработан специальный алгоритм топологической сортировки на базе анализа голов и хвостов операций, учитывающий специфику задачи и устраняющий недостаток потери локальности поиска.

Для третьего подхода предложен ускоренный алгоритм реализации применительно к поставленной задаче и теоретически доказана его эффективность. Ускоренный алгоритм позволяет при восстановлении допустимости перемещения вместо анализа всего множества дизъюнктивных дуг, связанных с операциями перемещаемой детали в графе задачи, как это сделано в исходной

версии алгоритма, анализировать значительно ограниченное количество дуг, что дает значительный прирост в скорости поиска.

Полученная таким образом окрестность является эффективной, так как имеет достаточную широту покрытия для сохранения качества поиска, и при этом позволяет достичь высокой скорости поиска. По разработанным математическим моделям и алгоритмам было создано специализированное программное обеспечение, на которое были получены свидетельства о государственной регистрации.

При проведении промышленного эксперимента для выбранной зафиксированной номенклатуры деталей в условиях действующего производства эффективность разработанных алгоритмов и программного обеспечения по сравнению с принятой на производстве методикой составила более 21%. Наибольший эффект был достигнут с использованием обобщенной модели.

С целью более широкой апробации работы и исследования эффективности созданных моделей, алгоритмов, информационного и программного обеспечения по управлению производственной системой механообработки, было разработано специализированное тестовое программное обеспечение, позволившее генерировать тестовые примеры, имитирующие реальные производственные задачи, с использованием которых были оценены эффективность в сравнении с принятой на производстве методикой планирования, а также время, затрачиваемое программой на поиск решения.

Размерность примеров была выбрана в широком диапазоне. Эффект в сравнении с принятой производственной методикой составил от 10 до 30%. Вторым по важности показателем разработанных методик является время, затраченное на поиск решения. Для тех же тестовых примеров поиск оптимального решения с использованием разработанной программы занимал не более 3 минут.

Использование разработанных моделей, алгоритмов и программного обеспечения позволит создать более эффективную систему интеллектуальной поддержки принятия решений при реализации технологических процессов механообработки в ММП с учетом динамического состояния производственных

Библиографический список

1. Бочкарев П.Ю., Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Схиртладзе А.Г. Управление станками и станочными комплексами: Учебник. - Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2007.

2. M. A. Gonzalez, C. R. Vela, and R. Varela. An efficient memetic algorithm for the flexible job shop with setup times. Twenty-Third International Conference on Automated Planning and Scheduling, 2013.

3. H. Groflin and A. Klinkert. A new neighborhood and tabu search for the blocking job shop. Discrete Applied Mathematics, 157(17):3643/3655, 2009.

УДК 621.43, 681.51

Синергетическая система управления двигателем внутреннего сгорания

Калий Д.С., Институт компьютерных технологий информационной безопасности, Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия, kaliy.d@yandex.ru

Радионов И.А., Институт компьютерных технологий информационной безопасности, Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия,i.a.radionov@gmail.com

Аннотация. В работе рассмотрена модель инжекторного двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и предпринята попытка подойти к решению задачи синтеза с помощью нового подхода, метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). Регулятор позволил стабилизировать нужные переменные, а именно соотношение воздух–топливо и давление во впускном коллекторе в нужном значении при разной подаче топлива в цилиндры, что в свою очередь, вместе с настроенным углом опережения зажигания приводит к улучшению показателей экономичности и мощности двигателя. Задавая одно из управляющих воздействий – количество впрыскиваемого топлива в цилиндры константой, было продемонстрировано поведение ключевых величин: соотношения воздух–топливо, давления во впускном коллекторе, скорости вращения коленчатого вала и угла опережения зажигания.

Ключевые слова: Инжекторный двигатель, двигатель внутреннего сгорания, метод АКАР, регулятор, синтез регулятора, автоматическая система управления, математическая модель.

Abstract. The work was taken finished object model – injection internal combustion engine (ICE) and the attempt to approach the problem of synthesis using a new approach, namely the method of analytical design of aggregated regulators (ACAR). Regulator allows to stabilize the desired variables, namely air-fuel ratio and the intake manifold pressure to the desired value by varying the fuel supply to the cylinders, in turn, with adjusts the ignition timing leads to an improvement in efficiency and engine power. By setting one of the control actions - the amount of fuel injected into the cylinder constant, it was demonstrated behavior of key variables: air-fuel ratio, intake manifold pressure, the rotational speed of the crankshaft and the ignition timing.

Keywords: Injection engine, internal combustion engine, method ACAR, controller, synthesis of control, automatic control systems, mathematical model.

Постановка задачи

Комбинированные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) имеют обширную область применения и являются основой как коммерческого транспорта – дизели, так и транспортных средств – бензиновые двигатели. Требования к экономичности, мощности и экологическим показателям двигателей ужесточаются. Поэтому одним из направлений развития современного автомобилестроения является совершенствование ДВС. Этим требованием призвана удовлетворить смена карбюраторного двигателя на инжекторный. Такой двигатель управляется «электронными мозгами», т.е. системой автоматического регулирования, что в свою очередь позволяет гибко регулировать подачу топлива в цилиндры и целенаправленно влиять на качество работы ДВС.

Целью работы является применение нового метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [1,2] к синтезу системы управления сложными нелинейными

процессами двигателя, что в свою очередь ведет к повышению мощностных и энергетических показателей объекта исследования, за счет нахождения нужного управляющего воздействия.

Для получения максимального крутящего момента на валу двигателя, а также для удовлетворения жестким экологическим требованиям необходимо, во-первых, обеспечивать оптимальное значение угла опережения зажигания (зависящее, прежде всего, от скорости вращения коленчатого вала, а также от ряда других факторов) и, во-вторых, поддерживать оптимальное для данного режима работы соотношение воздух–топливо в цилиндрах двигателя. При отклонениях любого из указанных параметров от оптимального значения происходит потеря мощности двигателя, вызванная неполным или несвоевременным сгоранием топливовоздушной смеси. Более того, эта же причина (неполное и несвоевременное сгорание смеси) вызывает резкое увеличение в выхлопных газах вредных и токсичных веществ (оксидов азота NO, угарного газа CO, углеводорода CH, сажи) и, следовательно, ухудшение экологических показателей двигателя. Поэтому важнейшими задачами при управлении инжекторными двигателями являются поддержание оптимального соотношения воздух–топливо в цилиндрах двигателя, и оперативная корректировка угла опережения зажигания. Таким образом, коэффициент избытка воздуха выступает одной из основных регулируемых переменных ДВС, рассматриваемого в качестве объекта управления.

Математическая модель (1) представляет собой три уравнения, описывающих динамику ДВС[3].

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= y_2 / J - b_{12} M_l, \\ \dot{x}_2 &= -a_2 x_2 + b_2 u_1, \\ \dot{x}_3 &= -a_3 x_1 x_3 + b_3 \varphi_1(x_3) \varphi_2(u_2), \end{aligned} \tag{1}$$

где $x_1 = \omega$ – скорость вращения коленчатого вала; $x_2 = \mu_{ff}$ – поток массы топливной пленки; $x_3 = P$ – давление во впускном коллекторе; $u_1 = \mu_{fi}$ – количество впрыснутого в цилиндр топлива; $u_2 = \alpha$ – угол поворота дроссельной заслонки; $u_3 = \alpha_{ign}$ – угол опережения зажигания; $y_1 = (c_1 x_2 + d_1 u_1) / x_1 x_3 = \phi$ – соотношение воздух–топливо;

$y_2 = c_2 x_3 \varphi_3 \varphi_4 - c_{f0} - c_{f1} x_1 - c_{f2} x_1^2 = M$ – эффективный момент; M_l – момент внешней нагрузки.

Неизвестные функции (2): $\varphi_1(x_3)$ – поток воздуха, проходящий через единицу площади, $\varphi_2(u_2)$ – площадь открываемого дроссельной заслонкой отверстия, $\varphi_3(y_1), \varphi_4(x_1, u_3)$ – статические функции, получаемые экспериментально.

$$\varphi_1(x_3) = \frac{P_a}{\sqrt{RT_a}}\gamma^{1/2}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/2(\gamma-1)},$$
$$\varphi_2(u_2) \approx \frac{\pi D^2}{4}\left(1-\frac{\cos(u_2)}{\cos(\alpha_0)}\right),$$
$$\varphi_3(y_1) = -1{,}2837y_1^2 + 2{,}2664y_1,$$
$$\varphi_4(x_1,u_3) = (-4{,}6434\times10^{-4}u_3^2 + 0{,}0431u_2)\times(1-0{,}5\exp(-0{,}0079x_1)). \quad (2)$$

В данной работе представлена реализация двух целей управления, таких как, стабилизация соотношения воздух–топливо и давления во впускном коллекторе в желаемых значениях.

Вводятся два притягивающих многообразия для достижения двух целей управления:

$$\psi_1 = x_3 - x_3^* = 0,$$
$$\psi_2 = y_1 - y_1^* = 0, \quad (3)$$

таким образом, переменные x_3 и y_1 (давление в коллекторе и соотношение воздух–топливо) приводятся к желаемым значениям x_3^* и y_1^*.

Решается система функциональных уравнений:

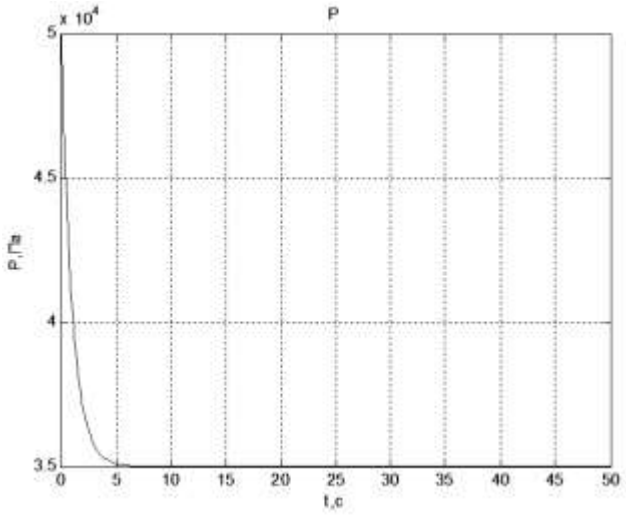
$$T_1\dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0,$$
$$T_2\dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0, \quad (4)$$

и находятся управляющие воздействия u_2, u_3, которые не представлены в виду своей громоздкости. Переменные $T_1 = 1, T_2 = 1$.

Моделирование системы

При моделировании полагалось, что начальные условия $x_{1_0} = 1 рад/с, x_{2_0} = 0, x_{3_0} = 50000 Па$. Желаемые значения стабилизируемых переменных выбраны следующими: $x_3^* = 35000 Па, y_1^* = 1/14{,}7 = 0{,}068$. Внешние возмущения заданы в виде момента внешней нагрузки $M_l = 20 Н\cdot м$.

Управляющее воздействие $u_1 = 0{,}0001 г/с$ выбирается константой (то есть в один цилиндр впрыскивается одна десятая грамма топлива в секунду), и проводится анализ поведения остальных переменных.



'исунок 1 – График давления во впускном коллектор

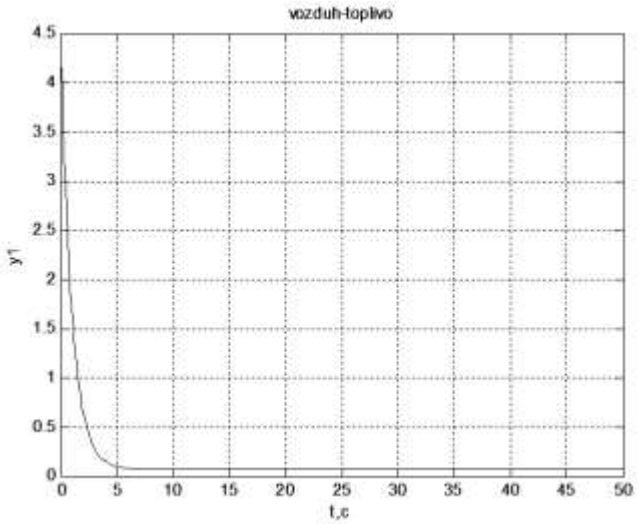


Рисунок 2 – График соотношения воздух–топливо

По графикам, представленным на рис. 1 и рис. 2 видно, что при данной подаче топлива давление во впускном коллекторе и соотношение воздух–топливо стабилизируются в желаемых значениях, при изменении количества подаваемого топлива, значения этих величин также будут стабилизироваться в желаемых значениях.

На графиках, представленных на рис. 3, 4, показано поведение остальных ключевых переменных при данных начальных условиях.

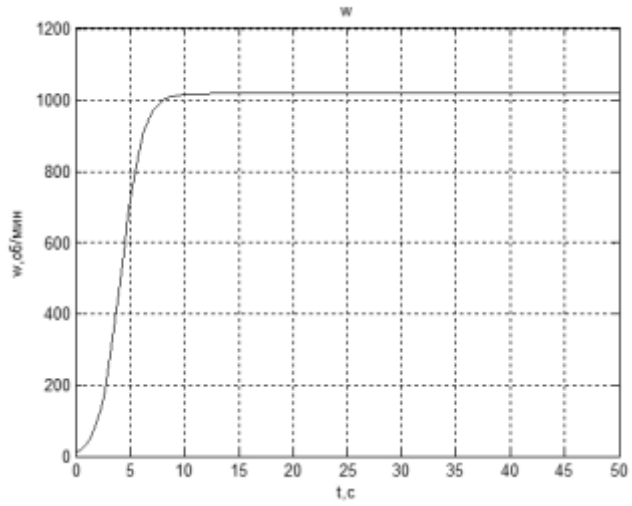


Рисунок 3 – График скорости вращения коленчатого вала

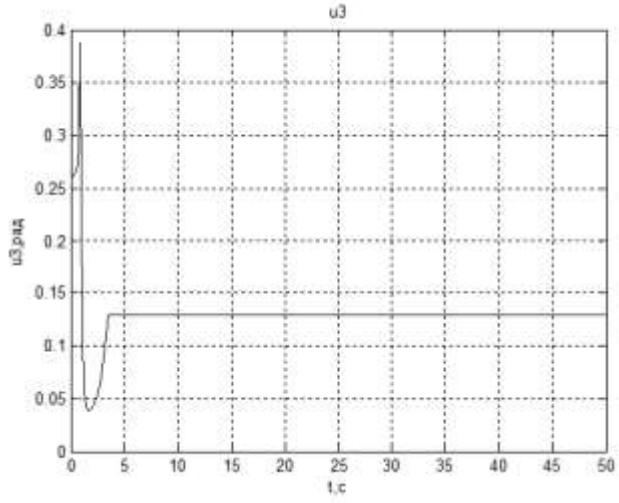


Рисунок 4 – График угла опережения зажигания

Полученные результаты дополняют предыдущие работы по управлению ДВС и показывают применимость метода АКАР при конструировании систем управления с целью повышения мощностных и энергетических показателей ДВС.

Благодарности и признательности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант №13-08-00995-а)

Библиографический список

1. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза.. – М: Едиториал УРСС / КомКнига, 2012. – 240 с.

2. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с.

3.Герасимов Д.Н., Джавахериан Х, Ефимов Д.В. Инжекторный двигатель как объект управления // Системы управления движущимися объектами. – Спб.: Известия РАН, 2010. – №5. – С. 135–147.

4. Луканин В.Н., Морозов К.А. Двигатели внутреннего сгорания // В 3–х кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: Учебник для вузов. – 2–е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2005. – 400 с.

5. Колчин А.И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учебное пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 2003. – 496 с.

6. Вырубов Д.Н., Иващенко Н.А. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей: учебник для вузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» / под ред. А.С. Орлина, М.Г Круглова. – 4–е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.

7. Heywood J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. – N.Y.: McGraw–Hill International Editions, 1988. – 930 с.

8. Черняк Б.Я., Васильев Г.В. Управление двигателем с помощью микропроцессорных систем. – М.: МАДИ, 1987. – 85 с.

9. Крутов В.Н. Автоматическое регулирование и управление двигателями внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1989. – 412 с.

10. Ault B.A., Jones V.K., Powell J.D. Adaptive air–fuel ration control of a spark ignition engine// SAEpaper. – 1993. – №940373.

УДК 681.51:620.31

Синергетический синтез нелинейных адаптивных законов управления ветротурбиной

Синицын А.С., Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия, axeom18@gmail.com

Синицына А.А., Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия,

Кузьменко А.А., Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия, aakuzmenko@sfedu.ru

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию вопросов управления ветротурбиной с асинхронизированным генератором. Для подавления внешнего возмущения был синтезирован синергетический нелинейный наблюдатель. Результаты сравнения замкнутой системы с синергетическими законами и с типовыми регуляторами наглядно демонстрируют высокую эффективность предложенных в докладе законов управления ветрогенератором.

Ключевые слова: Асинхронизированный генератор, ветротурбина, нелинейная модель, синергетическая теория управления, адаптация, нелинейный наблюдатель возмущения.

Abstract. This work is devoted to research of the wind turbine with asynchronized generator control. There were synthesized the synergetic nonlinear observer for suppressing external disturbance. Comparison simulation results of the synergetic closed system with typical linear controllers demonstrate high efficiency of the wind turbine control laws proposed in the report.

Keywords: Asynchronous generator, wind turbines, nonlinear model, synergistic control theory, adaptation, disturbance nonlinear observer.

Введение

Системы преобразования энергии ветра быстро развивались на протяжении последних десятилетий, но для того, чтобы применение данных установок было выгодным, необходимо обеспечить их максимальную эффективность [1]. При этом выбор стратегии управления оказывает значительное влияние на работу ветротурбины вне зависимости от ее типа, таким образом, эффективные законы управления являются решающим фактором, определяющим качество преобразования энергии ветра в электроэнергию. В настоящее время существуют несколько типов генераторов, используемых в качестве преобразователей энергии ветра[2, 3]: индукционные генераторы с короткозамкнутым ротором и фазным ротором, синхронные генераторы с фазным ротором и с постоянными магнитами, генераторы постоянного тока, переменные реактивные генераторы, генераторы с прямым приводом и др. Наиболее распространенные из них – синхронные генераторы. Однако все более и более популярными в области возобновляемых источников энергии становятся индукционные машины, особенно асинхронизированные [3].Простые индукционные

машины имеют некоторые недостатки, такие как потребление реактивной мощности и нерегулируемый уровень напряжения при переменной скорости вращения ротора. Эти проблемы преодолены путем внедрения асинхронизированных генераторов (АСГ)с соответствующими системами управления [3]. Реализация такого рода генераторов в области возобновляемых систем преобразования энергии резко возрастает в связи с их многочисленными преимуществами, такими как низкая стоимость и компактность, устранение внешнего источника постоянного тока, способность вырабатывать максимальную мощность при различной скорости ветра, возможность раздельного управления активной и реактивной мощностью, а это, в свою очередь, существенно расширяет возможности такой энергосистемы для повышения устойчивости в целом и устраняет необходимость иметь компенсатор реактивной мощности. Основные методы управления АСГ были предложены еще в 60-х годах XX в. Ботвинником М.М. и развиты его учениками [4, 5]. Однако и в настоящее время используемые методы обладают существенным недостатками – они опираются на линеаризованное математическое описание АСГ и законы управления, как правило, имеют жесткую линейную структуру – относятся к классу ПИД-регуляторов[2]. А это не может обеспечить расширения области устойчивого функционирования АСГ. Основной целью данной работы является синергетический синтез законов адаптивного управления энергосистемой «АСГ – ветротурбина», обеспечивающих выполнение требуемых технологических инвариантов – целей и компенсацию внешнего негативного возмущения.

Синтез законов управления

Математическая модель АСГ может быть представлена в виде обобщенной модели электрической машины с симметричными двухфазными системами обмоток на статоре и роторе, имеющих постоянные параметры [4, 5]. Дополнив модель АСГ уравнениями динамики ветротурбины [6], получим общую нелинейную модель исследуемой энергосистемы:

$$
\begin{aligned}
&\dot{i}_d(t) = A\left(\left(\omega_R x_a^2 - x_a^2 + x_f x_s\right) i_q + x_a u_{fd} - x_a r_f i_{fd} + x_a \omega_R x_f i_{fq} + u_d x_f + r_s i_d x_f\right);\\
&\dot{i}_q(t) = A\left(\left(-\omega_R x_a^2 + x_a^2 - x_f x_s\right) i_d + x_a u_{fq} - x_a r_f i_{fq} - x_a \omega_R x_f i_{fd} + u_q x_f + r_s i_q x_f\right);\\
&\dot{i}_{fd}(t) = A\left(\left(-x_a^2 - \omega_R x_f x_s + x_f x_s\right) i_{fq} - x_s u_{fd} + x_s r_f i_{fd} - x_a u_d - r_s i_d x_a - \omega_R x_a i_q x_s\right);\\
&\dot{i}_{fq}(t) = A\left(\left(x_a^2 + \omega_R x_f x_s - x_f x_s\right) i_{fd} - x_s u_{fq} + x_s r_f i_{fq} - x_a u_q - r_s i_q x_a + \omega_R x_a i_d x_s\right);\\
&\dot{\delta}(t) = \omega_R - 1; \qquad 2H_g \dot{\omega}_R(t) = -M_{sh} + M_e - F(t); \qquad 2H_T \dot{\omega}_T(t) = -M_{sh} + M_m,
\end{aligned}
\tag{1}
$$

где i_d, i_q, i_{fd}, i_{fq} – токи обмоток статора и ротора в осях dq соответственно; ω_R – частота вращения ротора АСГ; ω_T – частота вращения вала ветротурбины; M_m – механический момент на валу ветротурбины; M_{sh}– механический момент на распределительном валу; M_e– электрический момент на валу АСГ; H_g, H_T – коэффициент инерции ротора АСГ и ветротурбины; u_{fd}, u_{fq} – напряжения возбуждения (управления); r_s, r_f – активные сопротивления обмоток статора и ротора

соответственно; x_s – реактивное сопротивление статора; x_f – реактивные сопротивления обмоток ротора; x_a – взаимная индуктивность ротора и статора; u_d, u_q – напряжения, приложенные к соответствующим обмоткам статора; $F(t)$ – внешнее неизмеряемое возмущение, связанное с изменением нагрузки АСГ и имеющее кусочно-постоянный характер и неизвестную максимальную амплитуду; δ – угол между системой координат, связанной с напряжением в точке подключения к сети потребителя и синхронно вращающимся потокосцеплением статора АСГ; $A = \left(x_a^2 - x_f x_s\right)^{-1}$.

Для модели (1) определим выражения для моментов: $M_{sh} = K_s\delta + D(\omega_T - \omega_R)$; $M_m = 0{,}5\rho\pi R_b^2 C_p(\lambda) V_w^3 / S_b\omega_T$; $M_e = i_q\left(x_s i_d + x_a i_{fd}\right) - i_d\left(x_s i_q + x_a i_{fq}\right)$, здесь K_s, D – известные постоянные коэффициенты; ρ – плотность воздушного потока; R_b – радиус лопастей ветротурбины; S_b – номинальная мощность ветротурбины, отнесенная к мощности генератора; V_w – скорость ветра; $C_p(\lambda)$ – нелинейная функция коэффициента полезности ветротурбины:

$$C_p(\lambda) = c_1\left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\varphi_b - c_4\right)e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}}; \tag{2}$$

где $\lambda_i = \left(\frac{1}{\lambda + c_6\varphi_b} - \frac{c_7}{\varphi_b^3 + 1}\right)^{-1}$; $\lambda = \omega_T R_b / V_w$ – эмпирические функции эффективности лопастей; $c_i, i = 1..7$ – известные постоянные коэффициенты, φ_b – угол установки лопастей.

Принимая, что сопротивление линии электропередач между генератором и точкой подключения к энергосети достаточно мало, уравнения напряжения на обмотках статора можно записать в следующем виде $u_d = U\cos\delta$; $u_q = -U\sin\delta$, где $U = const$ – модуль напряжения энергосети. Согласно [4, 5] реактивная мощность АСГ может быть рассчитана по следующему соотношению: $Q_s = i_q u_d - i_d u_q$. Из этого соотношения вытекает первый технологический инвариант для энергосистемы (1):

$$Q_s = Q_{ref}, \tag{3}$$

здесь Q_{ref} – желаемая реактивная мощность. Отметим, что для того, чтобы в энергосистеме с АСГ можно было исключить компенсатор реактивной мощности, необходимо выдерживать значение $Q_{ref} = 0$.

Так как АСГ может выдавать потребителям напряжение с синхронной частотой при наличии скольжения ротора, то имеется возможность оптимизации эффективности ветротурбины путем вычисления оптимальной частоты вращения для текущей скорости ветра, которая является измеряемой величиной. В [6] показано, что функции коэффициента полезности ветротурбины (2) от

частоты вращения вала имеет один экстремум. Найдя закон управления, обеспечивающий выполнение технологического инварианта

$$\omega_T = \omega_{opt}, \tag{4}$$

появится возможность извлекать максимум энергии для текущей скорости ветра. Так, если коэффициент демпфирования D в системе (1) достаточно высок, можно сказать, что в переходных режимах $\omega_T \approx \omega_R$, а в установившихся скольжение $s = \omega_T - \omega_R$ асимптотически стремится к нулю. Оптимальная частота вращения турбины является результатом решения уравнения $\partial C_p(t)/\partial\omega_T(t) = 0$:

$$\omega_{opt} = \frac{1}{B}\left(-c_5c_3\varphi_b^5c_6 - c_6(c_5c_4 + c_2)\varphi_b^4 + c_5c_2\varphi_b^3 - c_5c_3\varphi_b^2c_6 - c_6\left((c_4 + c_2c_7)c_5 - c_2\right)\varphi_b + c_5c_2\right),$$

где $B = R_b\left(\varphi_b^4c_5c_3 + (c_5c_4 + c_2)\varphi_b^3 + \varphi_bc_5c_3 + (c_4 + c_2c_7)c_5 + c_2\right)$.

В данной работе будем полагать, что угол установки лопастей $\varphi_b = const$, т.е. отсутствует возможное регулирование углом установки лопастей ветротурбины, а скорость ветра полагается кусочно-постоянной функцией.

Подробно синтез базовых законов управления АСГ (1), обеспечивающих выполнение инвариантов (3), (4) и подавление возмущения $F(t)$ представлен в [7]:

$$\begin{aligned}
u_{fd} &= (-u_d f_5 a_1 x_a - x_a(u_q f_1 x_s - s_3 a_1 Q_{ref} x_s + s_3 a_1 Q_s x_s + x_a f_4 u_d - u_d f_2 x_s) i_d + \\
&+ (x_a(u_q f_1 - s_3 a_1(Q_{ref} - Q_s)) i_{fd} - u_d(f_1 x_a i_{fq} - i_q x_a f_3 - a_1(s_1 \mathbf{F}(t) + \\
&+ s_1 M_e + s_2(2\omega_R H_g - 2\omega_{opt} H_g) - s_1 M_{sh}))) x_a)/(x_a(i_d b_2 u_q - i_{fd} x_a u_q - u_d(x_s i_q - x_a i_{fq})) x_a); \\
u_{fq} &= (-u_q f_5 a_1 x_a - x_a(-s_3 a_1 Q_{ref} b_2 - f_3 u_q x_a + u_q f_1 b_2 + s_3 a_1 Q_s b_2 - u_d f_2 b_2) i_q + \\
&+ x_a(-x_a(u_d f_2 + s_3 a_1(Q_{ref} - Q_s)) i_{fq} + u_q(f_2 x_a i_{fd} - i_d x_a f_4 + a_1(s_1 \mathbf{F}(t) + \\
&+ s_1 M_e + 2\omega_R H_g s_2 - 2\omega_{opt} H_g s_2 - s_1 M_{sh})))/(x_a(-i_q b_2 u_d + i_{fq} b_1 u_q + u_q(x_s i_d - x_a i_{fd})) x_a),
\end{aligned} \tag{5}$$

где $a_1 = x_a^2 + x_f x_s$; $f_1 = (\omega_R x_a^2 - \omega_s(x_a^2 - x_f x_s)) i_q + x_a \omega_R x_f i_{fq} - x_a r_f i_{fd} + x_f(u_d + i_d r_s)$;

$f_2 = (-\omega_R x_a^2 + \omega_s(x_a^2 - x_f x_s)) i_d - x_a \omega_R x_f i_{fd} - x_a r_f i_{fq} + x_f(u_q + i_q r_s)$;

$f_3 = (-\omega_R x_f x_s - \omega_s(x_a^2 - x_f x_s)) i_{fq} - \omega_R x_a i_q x_s + r_f i_{fd} x_s + x_a(u_d + r_s i_d)$;

$f_4 = (\omega_R x_f x_s + \omega_s(x_a^2 - x_f x_s)) i_{fd} + \omega_R x_a i_d x_s + r_f i_{fq} x_s - x_a(u_q + r_s i_q)$;

$f_5 = (M_{sh}(H_T - H_g) D + 2K_s H_T H_g(\omega_T - \omega_R) - D(H_T(M_e + \mathbf{F}(t)) - H_g M_m)) H_T^{-1} H_g^{-1}$.

В найденные законы управления (5) входит неизмеряемое возмущение $F(t)$, для которого необходимо построить наблюдатель. Опираясь на метод синтеза нелинейных наблюдателей синергетической теории управления для объектов энергосистем [8, 9] получим следующие уравнения наблюдателя:

$$\dot{z}(t) = -\xi_{nab}(-M_{sh} + M_e + 2\xi_{nab} H_g \omega_R + z); \tag{61}$$

$$\hat{F} = 2\xi_{nab} H_g \omega_R + z, \tag{72}$$

где z – динамическая переменная синергетического наблюдателя; $\hat{F}$ – оценка кусочно-постоянного возмущения; ξ_{nab} – постоянный параметр, определяющий динамику оценивания возмущения. Устойчивость наблюдателя гарантируется при $\xi_{nab} > 0$. В итоге, в законах управления (5) возмущение $F(t)$ необходимо заменить оценкой (7).

Моделирование

Выполним моделирование энергосистемы «АСГ – ветротурбина» с синергетическими законами (5) и наблюдателем (6), (7). Эти результаты сравним с широко распространённым законом управления, базирующимся на четырех ПИ-регуляторах [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. езультаты моделирования показаны на рис. 1, 2. При моделировании используем следующие выражения для скорости ветра и внешнего возмущения:

$$V_w = \begin{cases} 10{,}1, & t < 1{,}5 \\ 12, & 1{,}5 \le t < 3 \\ 9, & 3 \le t < 4{,}5 \\ 13, & 4{,}5 \le t \end{cases}; \qquad F(t) = \begin{cases} 0, & t < 1{,}8 \\ 0{,}2, & 1{,}8 \le t < 2{,}8 \\ 0{,}5, & 2{,}8 \le t < 3{,}8 \\ 0{,}1, & 3{,}8 \le t \end{cases}.$$

Рис. 1 – График изменения частоты вращения ротора

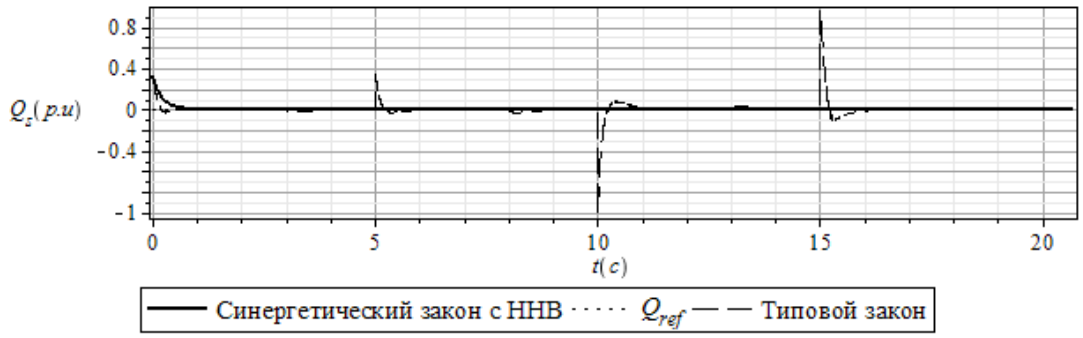


Рис. 2 – График изменения реактивной мощности генератора

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод, что синтезированные синергетические нелинейные законы адаптивного управления обеспечивают выполнение технологической задачи – стабилизацию реактивной мощности (3), частоты вращения ротора (4), оперативную оценку и компенсацию внешнего кусочно-постоянного возмущения $F(t)$. Как следует из графиков, синергетические законы управления выгодно отличаются от типового регулятора по

следующим пунктам: большее быстродействие; значительное улучшение качества переходного процесса; независимость управляемых величин друг от друга. Таким образом, можно говорить о робастности АСГ к внешнему возмущению.

Благодарности и признательности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №13-08-01008-а).

Библиографический список

1. Manwell JF, McGowan J, Rogers A. Wind energy explained: theory, design and applications. – New York: John Wiley & Sons, 2009. – 704 p.

2. Nguyen H.M., Naidu D.S. Advanced Control Strategies for Wind Energy Systems: An Overview // IEEE PES Power Systems Conference & Exposition, Phoenix, AZ, USA, 20 - 23 March 2011. – Pp. 230-238.

3. Wu B., Lang Y., Zargari N., Kouro S. Power Conversion and Control of Wind Energy Systems. – New York: Wiley-IEEE Press, 2011. – 480 p.

4. Ботвинник М.М., Шакарян Ю.Г. Управляемая машина переменного тока. – М.: Наука, 1969. – 140 с.

5. Довганюк И.Я., Шакарян Ю.Г., Лабунец И.А., Плотникова Т.В. и др. Концепция построения системы управления возбуждением асинхронизированных турбогенераторов // Электротехника. – 2010. – №2. – С. 30-35.

6. Wind Powerin Power Systems / edited by T. Ackermann. – Chichester: JohnWiley&Sons, 2005. – 745 p.

7. Кузьменко А.А., Синицын А.С., Синицына А.А. Робастное управление энергоустановкой «асинхронизированный генератор – ветротурбина»: интегральная адаптация // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – №7(168). – С. 197-208.

8. Колесников А.А., Кузьменко А.А., Веселов Г.Е. Новые технологии проектирования современных систем управления процессами генерирования электроэнергии: научное издание. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 280 с.

9. Кузьменко А.А. Нелинейное адаптивное управление турбогенератором// Известия РАН. Теория и системы управления. – 2008. – №1. – С. 112-119.

10. Zamanifara M., Fanib B., Golshana M.E.H., Karshenas H.R. Dynamic modeling and optimal control of DFIG wind energy systems using DFT and NSGA-II // IEEE Electric Power Systems Research. – 2014. – Vol. 108. – Pp. 50-58.

УДК 681.511.4:629.127

Синергетическое управление движением автономного подводного аппарата в вертикальной плоскости

Якименко[1] О.И., Институт компьютерных технологий информационной безопасности, Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия, iakimenko_olga@mail.ru

Кузьменко А.А., Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия, aakuzmenko@sfedu.ru

Аннотация. В данной работе рассматривается проблема нелинейного синтеза законов управления движением автономного подводного аппарата (АПА) в вертикальной плоскости. Представлена нелинейная динамическая модель АПА. На её основе методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) выполнен синтез синергетических законов управления. Целевыми инвариантами являются выход подводного аппарата на заданную глубину с желаемой скоростью. Рассмотрены результаты компьютерного моделирования движения АПА, которые подтверждают достижение целей управления.

Ключевые слова: Автономный подводный аппарат, нелинейная модель, инвариантное многообразие, синергетическая теория управления, метод АКАР, моделирование.

Abstract. The problem of control laws nonlinear synthesis for autonomous underwater vehicle (AUV) motion in vertical plane is considered in this paper. There is a nonlinear dynamical model of the AUV. Synergetic control laws synthesis was performed for nonlinear AUV model according to method of analytical design of aggregated regulators (ADAR).Control aims are the AUV moving to desired depth with rated velocity. There are the computer simulation results of AUV motion with synergetic controls, that confirms the achievement of control objectives.

Keywords: Autonomous underwater vehicles, nonlinear model, invariant manifold, synergetic control theory, ADAR methods, computer simulation.

Постановка задачи

Человечество на протяжении многих веков стремится к освоению подводного пространства. Автономный подводные аппараты (АПА) – высокоманевренные и жизнеспособные морские объекты, способные выполнять широкий круг задач по освоение Мирового океана. Проблема управления движением автономных подводных аппаратов актуальна и в наши дни[1-6]. Научная новизна и цель данной работы заключаются в использовании метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР) [7, 8] для синтеза нелинейных законов векторного управления движением автономного подводного аппарата в вертикальной плоскости. Традиционным подходом к управлению АПА является раздельная разработка стабилизирующего управления для каждого канала регулирования по части переменных состояния с целью достижения желаемых переходных характеристик. Это в большей степени связано с использованием линейного представления АПА и использования методов линейной теории управления. В нашей же работе предлагается выполнять

совместный синтез законов управление АПА по нелинейной модели АПА по всем переменным состояния с целью перевода АПА в желаемое состояние.

Математическая модель движения АПА в вертикальной плоскости имеет следующий вид [9]

$$
\begin{aligned}
&m_x \frac{dV_x}{dt} - m_y \omega_z V_y = T - qv^{2/3}(c_x^{\alpha}\alpha + c_x^{\delta}\delta_{г});\\
&m_y \frac{dV_y}{dt} + m_x \omega_z V_x = qv^{2/3}(c_y^{\alpha}\alpha + c_y^{\omega}\omega_z + c_y^{\delta}\delta_{г});\\
&J_z \frac{d\omega_z}{dt} + V_x V_y (m_y - m_x) = qv(m_z^{\alpha}\alpha + m_z^{\omega}\omega_z + m_z^{\delta}\delta_{г});\\
&\frac{dy_g}{dt} = V_x\psi + V_y;\\
&\frac{d\psi}{dt} = \omega_z,
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

где V_x, V_y и ω_z – проекции на оси связанной системы координат вектора линейной скорости перемещения центра масс автономного подводного аппарата и вектора угловой скорости вращения автономного подводного аппарата относительно центра масс; x_g, y_g – координаты центра масс АПА в базовой системе координат; ψ – угол дифферента; m_x, m_y, J_z – элементы матрицы инерции твердого тела с учетом присоединенных масс жидкости; c_i^j и m_i^j – гидродинамические коэффициенты; $\alpha \approx -V_y / V$ – угол атаки; $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$ – скорость поступательного движения; q – скоростной напор, зависящий от плотности воды и скорости движения $q = 0{,}5\rho V^2$, v – объемное водоизмещение аппарата; T – сила тяги по продольной оси *OX*, создаваемая тяговым движителем; $\delta_{г}$ – угол перекладки вертикального руля.

Введем переменные состояния: $x_1 = V_x, x_2 = V_y, x_3 = \omega_z$, $x_4 = y_g, x_5 = \psi$ и управляющие воздействия: $u_1 = T$, $u_2 = \delta_{г}$.

Таким образом, задача управления заключается в синтезе нелинейных синергетических законов управления u_1, u_2 в функции переменных состояния нелинейной модели АПА (1), которые обеспечивают движение из произвольного начального состояния (в допустимой области) на заданную глубину $x_4 = x_4^* = const$ с желаемой скоростью $x_1 = x_1^* = const$.

Синтез законов управления

Согласно процедуре АКАР введем совокупность инвариантных многообразий (ИМ):

$$
\begin{aligned}
&\psi_1 = \beta_{11}(x_2 - \varphi_1) + \beta_{12}(x_1 - x_1^*) = 0;\\
&\psi_2 = \beta_{21}(x_2 - \varphi_1) + \beta_{22}(x_1 - x_1^*) = 0.
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

ИМ (2) должны удовлетворять системе основных функциональных уравнений метода АКАР [7, 8]:

$$T_k \dot{\psi}_k(t) + \psi_k = 0, \quad k = \overline{1,2}. \tag{3}$$

Решения уравнений (3) $\psi_k = 0$ устойчивы при $T_k > 0$. На пересечении многообразий динамика АПА (1) описывается декомпозированной системой:

$$\begin{aligned} \dot{x}_3(t) &= \frac{qv(m_z^{\alpha}\alpha + m_z^{\omega}x_3 + m_z^{\delta}u_2) - x_1^{*}\varphi_1(m_y - m_x)}{J}; \\ \dot{x}_4(t) &= x_1^{*}x_5 + \varphi_1; \\ \dot{x}_5(t) &= x_3. \end{aligned} \tag{4}$$

Функцию φ_1 можно рассматривать как «внутреннее» управляющее воздействие для декомпозированной системы (4) и повторить процедуру синтеза, тем самым реализуя принцип методику последовательного синтеза метода АКАР. Для достижения целевого инварианта $x_4 = x_4^{*}$ введем еще одно инвариантное многообразие:

$$\psi_3 = x_4 - x_4^{*} = 0. \tag{5}$$

Из решения функционального уравнения вида (3) при k=3 с учетом (4), (5) находим

$$\varphi_1(x_4, x_5) = -x_1^{*}x_5 - (x_4 - x_4^{*})/T_3. \tag{6}$$

Окончательные выражения для управлений u_1, u_2 получим из совместного решения функциональных уравнений (3), которые раскрываем с учетом ИМ (2), «внутреннего управления» (6) и уравнений АПА (1). Система уравнений (3) имеет нетривиальное решение при $\beta_{11}\beta_{22} \neq \beta_{12}\beta_{21}$. В силу ограниченного объема доклада выражения для управлений u_1, u_2 не приведены.

Моделирование системы

Параметры модели (1) представлены в таблице 1, а параметры законов управления $x_1^{*} = 15, x_4^{*} = -20$, $T_1 = T_2 = T_3 = 2, \beta_{11} = 2, \beta_{12} = \beta_{21} = \beta_{22} = 1$.

Таблица 1 – Параметры модели АПА[9]

m_x, *кг*	110	c_x^{α}, *град*$^{-1}$	0,01
m_y, *кг*	150	c_x^{δ}, *град*$^{-1}$	0,01
J_z, *кг м*^{2}	1200	c_y^{α}, *град*$^{-1}$	0,01
m_z^{α}, *град*$^{-1}$	-0,015	c_y^{δ}, *град*$^{-1}$	0,03
m_z^{ω}, *град*$^{-1}$	-0,012	c_y^{ω}, *град*$^{-1}$	0,01
m_z^{δ}, *град*$^{-1}$	-0,01	p, *кг/м*^{3}	1000
v, *м*^{3}	50		

На рис. 1, 2 показаны результаты компьютерного моделирования движения АПА (1) в вертикальной плоскости под действием синергетических законов управления, которые обеспечивают выход АПА на заданную глубину $x_4^* = -20$ с заданной скоростью $x_1^* = 15$.

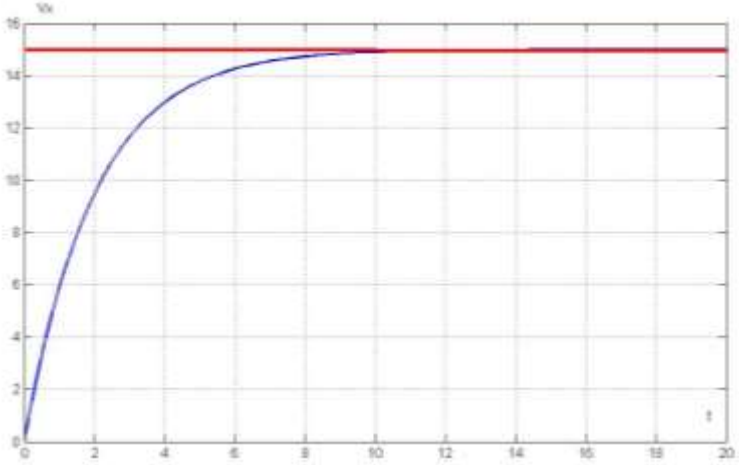


Рисунок 1 – График изменения проекции вектора линейной скорости на ось OX

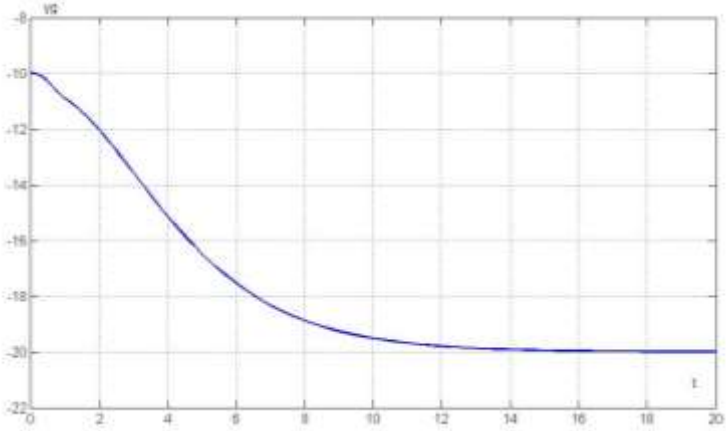


Рисунок 2 – График изменения координаты центра масс АПА в базовой системе координат

Итак, в работе выполнен совместный синтез законов управление АПА по нелинейной модели АПА по всем переменным состояния с целью перевода АПА в желаемое состояние – выход на заданную глубину с желаемой скоростью. Проведено компьютерное моделирование замкнутой системы (1) с синтезированными синергетическими законами управления, которое иллюстрирует достижение поставленных целей управления – инвариантов. Полученные синергетические законы согласованного управления АПА являются базовыми законами, а дальнейшим развитием данного исследования является построение адаптивных законов управления, обеспечивающих компенсацию влияния внешних и параметрических возмущений, действующих на АПА.

Библиографический список

1. Тарасов Н.Н., Тахтамышев М.Г. Алгоритм принятия решений при управлении балластной системой подводного аппарата // Проблемы управления. – 2011. – № 1. – С. 74-77.

2. Евстигнеева, Л.В., Тарасов Н.Н., Тахтамышев М.Г. Синтез алгоритма для одной задачи управления морскими подвижными объектами // Проблемы управления. – 2007. – № 4. – С. 84-88.

3. Ивель В.П., Герасимова Ю.В. Адаптивная система вертикального позиционирования автономного подводного аппарата // Наука и мир. – 2014. – Т. 1. – №2(6). – С. 161–164.

4. Пшихопов В.Х., Чернухин Ю.В., Федотов А.А. [и др.] Разработка интеллектуальной системы управления автономного подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 3. – С. 87-101.

5. Hyakudome T. Design of Autonomous Underwater Vehicle // International Journal of Advanced Robotic Systems. – 2011. – Vol. 8. – No. 1. – Pp. 131-139.

6. Бочаров Л. Необитаемые подводные аппараты: состояние и общие тенденции развития // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2009. – № 7. – С. 62-69.

7. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. – Изд. 2-е. – М:КомКнига, 2012. – 240 с.

8. Современная прикладная теория управления. Ч. II: синергетический подход в теории управления/ под ред. А.А. Колесникова. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. – 559 с.

9. Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. Системы управления морскими подвижными объектами. – Л.: Судостроение, 1988. – 272 с.

УДК 621.9:531.1

Исследование взаимосвязи между устойчивостью плазменного облака и колебаниями технологической установки при низкотемпературном плазменном упрочнении

*Мартынов В.В., Саратовский государственный технический университет Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия.*v_martynov@mail.ru

*Бржозовский Б.М., Саратовский государственный технический университет Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия.*bmbsar85@mail.ru

Зинина Е.П., Саратовский государственный технический университет Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия. e-zinina@bk.ru

*Янкин И.Н., Саратовский государственный технический университет Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия.*yankin10@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты экспериментального исследования устойчивости процесса низкотемпературного плазменного упрочнения. Установлена тесная взаимосвязь между электро-физико-химическими процессами в рабочей камере технологической установки и колебательными процессами в ее несущей системы. Для оценивания степени устойчивости процесса упрочнения разработана методика, основанная на сравнении основной и дополнительной спектральных поверхностей электро-физико-химических и колебательных процессов. На основе полученных результатов сделаны выводы о необходимости учета динамической совместимости между процессами, протекающими в плазменном облаке, и параметрами механической системы технологической установки.

Ключевые слова: низкотемпературная плазма, плазменное облако, устойчивость, колебания, спектр колебаний.

Abstract. The results of experimental investigation of the stability of low-temperature plasma hardening. The close relationship between the electro-physical and chemical processes in the working chamber of the process plant and oscillatory processes in its support system. To assess the sustainability of the process of hardening developed a methodology, based on a comparison of wasps mainly surfaces and additional spectral electro-physical, chemical and vibration processes. Based on the results obtained conclusions about the need to consider the compatibility between the dynamic processes in the plasma cloud, and the parameters of the mechanical system of the process plant.

Keywords: low-temperature plasma, plasma cloud, stability, fluctuations, range of vibrations.

Низкотемпературное плазменное упрочнение используется для формирования в поверхностном слое изделий различного назначения функциональных покрытий, которые состоят из нанокластеров, скрепленных между собой и с материалом основы аморфной связкой. Это обеспечивает повышение сопротивляемости слоя процессам ползучести и изнашивания, особенно если условия эксплуатации изделий близки или являются экстремальными.

С целью получения качественного покрытия необходимо поддержание устойчивости процесса воздействия плазменного облака на поверхность изделия, поскольку в противном случае могут возникнуть автоколебательные процессы, приводящие к изменению параметров скомпенсированного потока частиц плазмы на поверхность изделия.

Реализация процесса низкотемпературного плазменного упрочнения осуществляется в специальной технологической установке, которая содержит набор функциональных блоков, образующих вместе с рамным каркасом и протекающими в них процессами сложную электромеханическую динамическую систему. Доклад посвящен результатам экспериментального исследования взаимосвязи между колебательными процессами, протекающими в плазменном облаке и имеющими электро-физико-химическую природу, и механическими колебаниями, протекающими в основных элементах и узлах установки. Параметры этих процессов фиксировались по двухканальной схеме. Первый канал использовался для регистрации колебаний тока смещения, по которому оценивалась устойчивость технологического процесса, второй канал служил для регистрации механических колебаний рабочей камеры технологической установки.

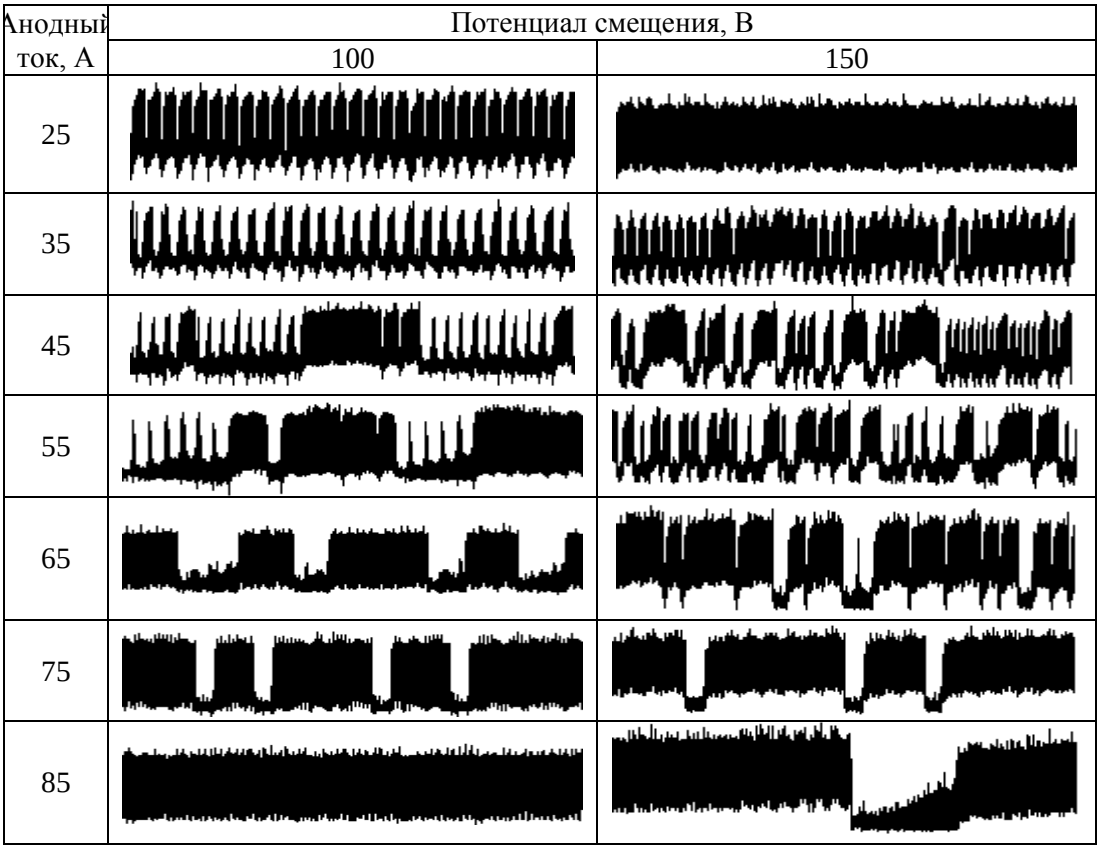


Рис. 1. Осциллограммы проявления неустойчивости технологического процесса плазменного упрочнения

На рис.1 показаны осциллограммы колебаний тока смещения, который является косвенной количественной характеристикой степени компенсации скомпенсированного потока, при значениях анодного тока, подаваемого на генератор, который формирует подводимую в рабочую камеру установки СВЧ энергию электромагнитного поля, в диапазоне 25…85 мА, и потенциала смещения, формирующего электростатическое поле между облаком плазмы и поверхностью изделия в диапазоне 100…175 В. Осциллограммы демонстрируют проявление неустойчивости плазменного облака, причем она может проявляться в широком диапазоне сочетаний значений «анодный ток – потенциал смещения».

Колебания мощности плазменного облака приводят к возникновению колебаний технологической установки, прежде всего рабочей камеры, что может стать дополнительным источником развития неустойчивости процесса упрочнения. Для исследования устойчивости технологического

процесса было разработано специальное программно-математическое обеспечение, позволяющее отображать картину колебательного процесса в виде спектральной поверхности (рис. 2, а), представляющей собой систему спектров, смещенных между собой на равные интервалы времени.

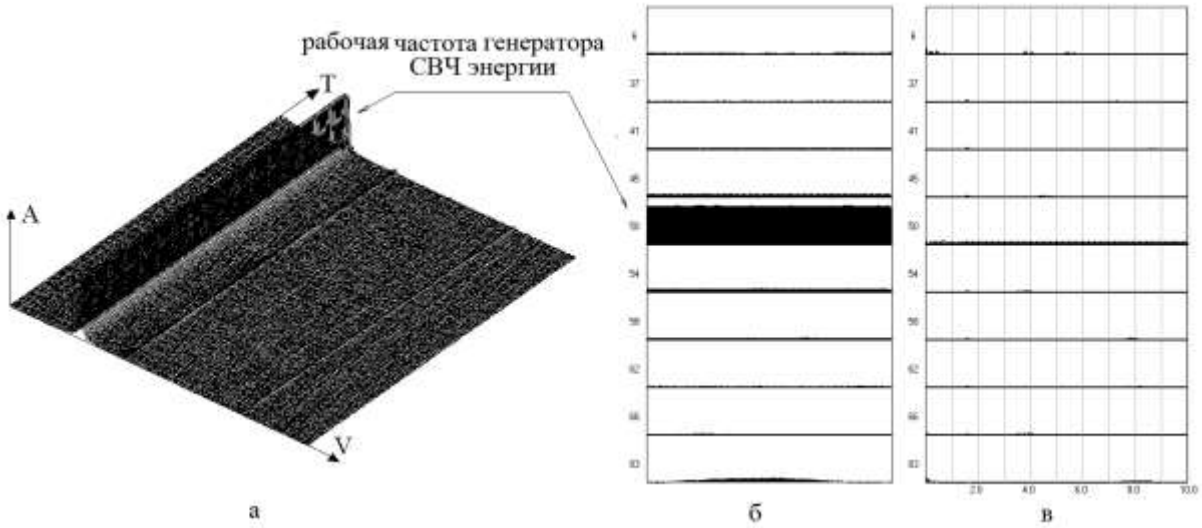


Рис. 2. Устойчивый технологический процесс

В условиях устойчивого технологического процесса спектральная поверхность содержит основную составляющую с рабочей частотой генератора СВЧ энергии (рис. 2, а). Неустойчивость технологического процесса проявляется в виде образования автоколебательной составляющей как на рабочей частоте, так и на частоте автоколебаний (рис. 3, а). Частота автоколебательной составляющей в зависимости от используемого технологического режима и состава технологической среды колебалась в пределах 3-8 Гц. В правых частях на указанных рисунках приведены формы наиболее значимых частотных полос спектральной поверхности (рис. 2, б; рис. 3, б). Поскольку указанные кривые являются функциями времени, их вторичное разложение в спектр дает дополнительную информацию о колебательном процессе. Для устойчивого технологического процесса вторичные спектры имеют минимальную энергетическую емкость (рис. 2, в), для неустойчивого процесса вторичный спектр отражает динамизм изменения его спектрального состава, о котором можно судить по степени изменяемости частотных полос основной спектральной поверхности (рис. 3, в).

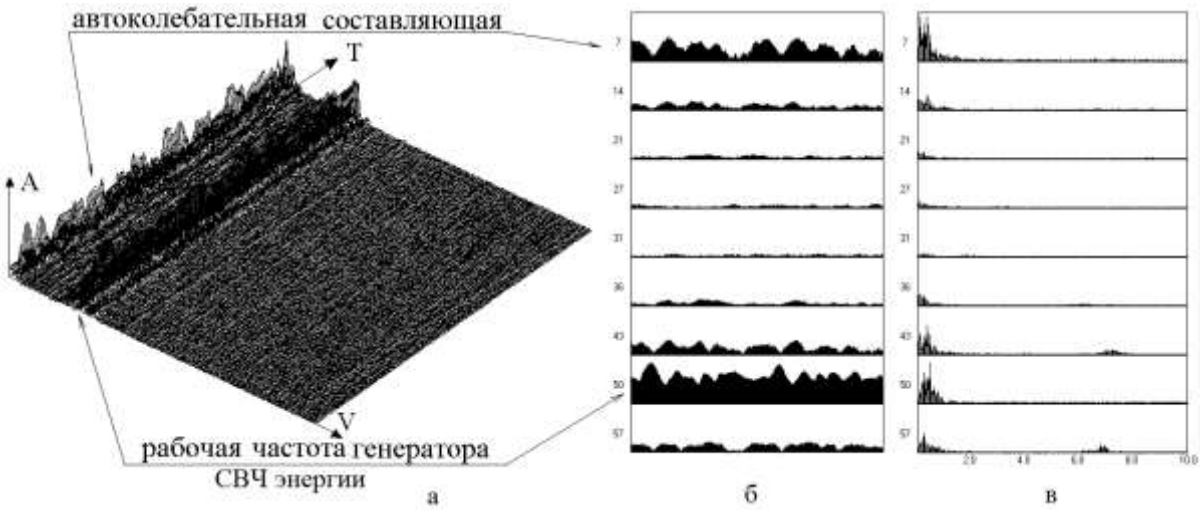


Рис. 3. Неустойчивый технологический процесс с образованием автоколебаний

Для оценки степени устойчивости процесса применен коэффициент $K_{нст}$. Он рассчитывался в виде отношения суммарных амплитуд значимых частотных полос вторичных спектров к суммарным амплитудам указанных полос основной спектральной поверхности. Для стационарного процесса, который свойственен устойчивой технологической системе, $K_{нст}$= 0. Появление неустойчивости процессов, возбуждаемых в плазменном облаке, приводит к возникновению значимых изменений амплитуд частотных полос основной спектральной поверхности, фиксируемых ростом коэффициента $K_{нст}$.

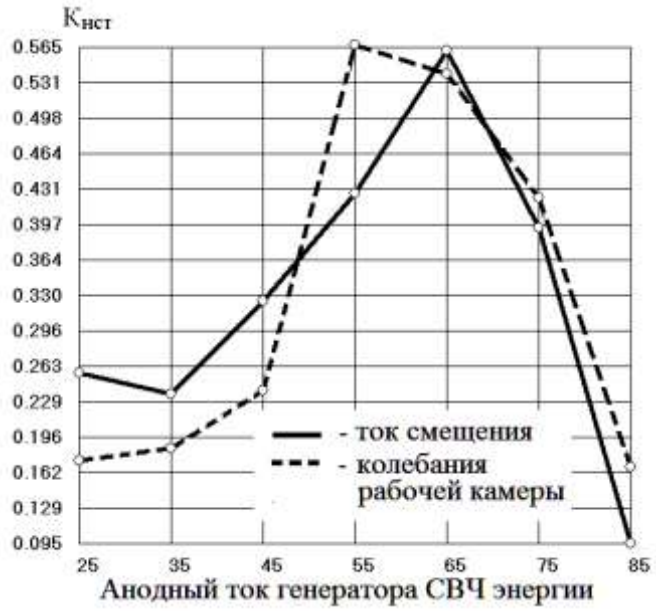


Рис. 4. Вариации коэффициентов $K_{нст}$ колебаний плазменного облака и механических колебаний корпуса рабочей камеры

На рис. 4 приведены графики, отражающие результаты статистической обработки полученных экспериментальных данных. Коэффициент $K_{нст}$ рассчитывался по десяти наиболее значимым частотным полосам основной спектральной поверхности. Как видно из приведенных зависимостей, корреляция между процессами, протекающими в плазменном облаке, и колебаниями рабочей камеры

установки является достаточно высокой с коэффициентом корреляции 0,879. Это позволяет сделать вывод о том, что дальнейшее развитие работ в области низкотемпературного плазменного упрочнения определяет необходимость более детального исследования динамических явлений, поскольку они, достоверно отображая основные закономерности протекания процессов в плазменном облаке, формирующих как его состояние, так и возможные изменения, могут служить одним из критериев оценивания качества процесса упрочнения.

Исследование целесообразно проводить с позиций следующих принципиальных положений:

– механический колебательный процесс рассматривается как реакция технологической установки на возмущение со стороны процессов, протекающих в плазме;

– реакция каждого элемента технологической установки происходит в соответствии с его динамическими характеристиками и протекает, как правило, на собственных частотах, то есть оригинально;

– отображением колебательного процесса является вибросигнал, оценивание спектрального состава которого позволит получить информацию об изменении свойств колебательного процесса при изменении параметров режима упрочнения, в частности изменении параметров, характеризующих образование, «жизненный цикл» и тренд частотных составляющих возмущаемых колебаний, соотношений между циклическими (детерминированными) и случайными составляющими колебаний, а также плотности их траекторий на фазовой плоскости.

Практически это позволит при назначении технологического режима низкотемпературного плазменного упрочнения обеспечить возможности для его оптимизации по динамическому критерию на основе согласования динамических характеристик установки с процессами, имеющими склонность к образованию автоколебательных явлений в плазменном облаке, с целью обеспечения его устойчивости.

Благодарности и признательности

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду, за счет гранта которого (проект №15-19-00030) было выполнено исследование.

УДК 621.9.06

Особенности формирования стационарной траектории установившихся периодических движений при фрезеровании

Губанова А.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, anatoliya81@mail.ru

Бегун В.Г., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Аннотация. При оценивании параметров качества необходимо рассматривать вибрационные смещения. Кроме этого стоит проблема выделения регулярной составляющей вибрационных смещений, в которой отображаются основные свойства формообразования поверхности. Представленная статья посвящена вопросу обработки вибрационной последовательности сигнала виброускорений таким образом, чтобы было удобно полученную информацию использовать при рассмотрении разнообрабатываемости процесса и формируемого качества поверхности детали

Ключевые слова: фреза, модель, стробоскопическое усреднение Пуанкаре, траектория, устойчивость

Abstract. The key parameter for determining the law of change of the cutting force during milling is the thickness of the shear layer. Therefore, the definition of the law of change of cutting thickness is essential to determine the law of variation of the cutting force.

Keywords: cutter, model, stroboscopic Poincare averaging, trajectory, stability

Введение

Фрезерование является типично нестационарным процессом. Это связано с тем, что он сопровождается периодическими изменениями площади срезаемого слоя, которая формирует силы резания, и, следовательно, упругие деформационные смещения инструмента относительно обрабатываемой заготовки [1], [2]. Поэтому, например, при анализе устойчивости необходимо рассматривать не точку равновесия в пространстве состояния, а траектории периодических деформационных смещений. При этом уравнение в вариациях относительно рассматриваемой траектории является уравнением с периодически изменяющимися параметрами. Поэтому основной механизм потери устойчивости траекторий обусловлен параметрическим самовозбуждением системы. Характерно, что методика анализа устойчивости справедлива, как для линейных, так и нелинейных динамических моделей, так как при рассмотрении устойчивости анализируется линеаризованное уравнение в вариациях относительно рассматриваемой траектории. Не смотря на важность аналитического моделирования этого процесса, представляет интерес экспериментальные исследования вибраций, сопровождающих процесс обработки. Это важно особенно в тех случаях, когда ставится проблема оценивания качества формируемой поверхности по сигналу виброакустической эмиссии. При построении систем диагностирования обычно используются пьезоэлектрические акселерометры, которые позволяют определять виброускорения в ограниченном частотном диапазоне.

Методика проведения исследований и их результаты

Экспериментальные исследования вибраций выполнено на основе рассмотрения вибраций обрабатываемой заготовки.

Виброускорения были получены с помощью пьезоэлектрического акселерометра, имеющего частотный диапазон измерений виброускорений 10 Гц – 20 кГц. Для дальнейшего анализа необходимо виброускорения преобразовать в вибросмещения. Формально для этого необходимо выполнить операцию двойного интегрирования. Однако необходимо иметь в виду, что операция интегрирования, во-первых, приводит к накоплению ошибки, всегда существующей при цифровом интегрировании, во-вторых, за счет неточности начальных условий образуется постоянная интегрирования, наконец, измеряемая последовательность имеет ограниченный частотный диапазон. Причем, в низкочастотной области погрешность резко возрастает, а постоянные значения деформационных смещений не восстановимы принципиально, так как исходной информацией являются ускорения. Все это приводит к погрешностям. Так как рассматриваемый процесс является периодическим, то периоды в виброускорений, виброскоростей и виброперемещений равны между собой. Поэтому, после интегрирования выполнялась операция удаления тренда. Для определения тренда используется операция вычисления скользящего среднего. Пусть задана измеренная временная последовательность виброускорений $a(t)$. Ее необходимо преобразовать в виброскорости $v(t)$ и в вибросмещения $x(t)$.Измеренные виброускорения в памяти компьютера представлены в виде вектора $a(t)=\{a(0),a(1),...a(i),...a(N)\}$. В нашем случае $N=10^6$. Экспериментальные данные, полученные программой LGraph2, обеспечивают 100 000 опросов в течение секунды (частота опроса наблюдаемой последовательности равна 100 кГц, время – 10 секунд). После цифрового интегрирования последовательности $a(t)=\{a(0),a(1),...a(i),...a(N)\}$ получаем последовательность колебательных скоростей $v(t)=\{v(0),v(1),...v(i),...v(N)\}$. Она состоит из измеримой последовательности $v_0(t)$ и низкочастотного тренда $v^*(t)$. Для устранения тренда выполним операцию вычисления скользящего среднего на отрезке k, тогда для каждой точки i последовательности скорости имеем

$$v_0(i)=v(i)-\frac{1}{k}\sum_{i-k}^{k}v(i), \qquad (1)$$

где k выбирается исходя из значения нижней частоты измеримой последовательности.

Получаемая последовательность $v_0(t)=\{v_0(0),v_0(1),...v_0(i),...v_0(N-k)\}$ имеет размер «$N-k$». Для определения последовательности вибросмещений $x_0(t)=\{x_0(0),x_0(1),...x_0(i),...x_0(N-2k)\}$ воспользуемся тем же алгоритмом (1), но для вычисленной последовательности виброскоростей $v_0(t)=\{v_0(0),v_0(1),...v_0(i),...v_0(N-k)\}$. Тем самым выполняется операция преобразования

виброускорений в вибросмещения. Необходимо подчеркнуть, что в этом случае восстанавливается лишь траектория переменной составляющей вибросмещений. Для определения низкочастотной составляющей необходимо использовать методы непосредственного определения деформационных смещений инструмента и обрабатываемой детали.

Приведем пример временных траекторий ускорений, скоростей и смещений для условий фрезерования, изложенных выше (рис. 1).

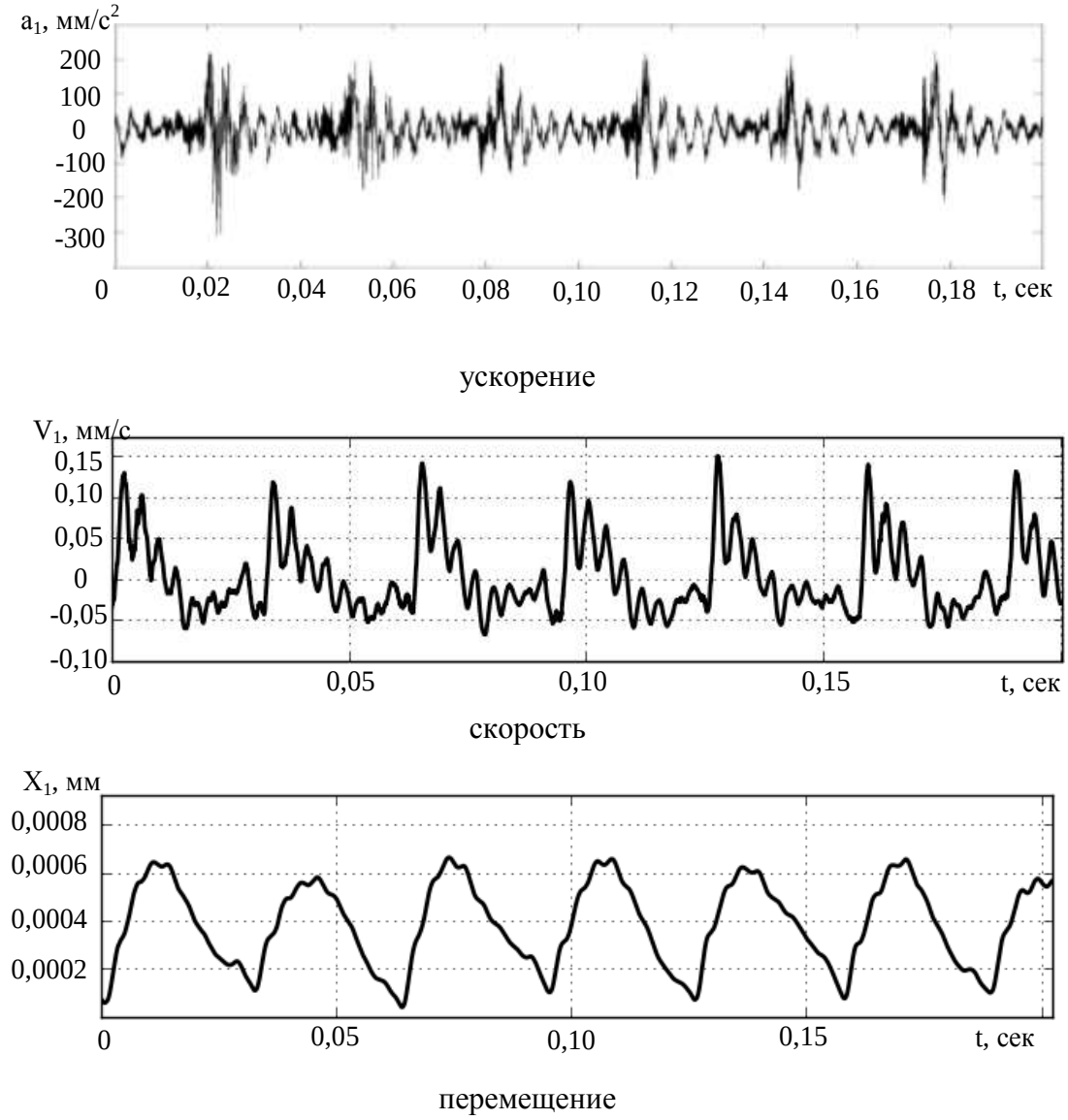


Рис.1. Пример преобразования виброускорений в вибросмещения

Все приведенные графики характеризуют временные последовательности, которые периодически изменяются во времени, а при постоянной частоте вращения инструмента они также периодически изменяются в пространстве по угловым координатам. Известно, что для строго периодических функций $f(t) = f(t - T)$, период повторения которых равен T, существует стробоскопическое отображение Пуанкаре [9].Его смысл заключается в том, что

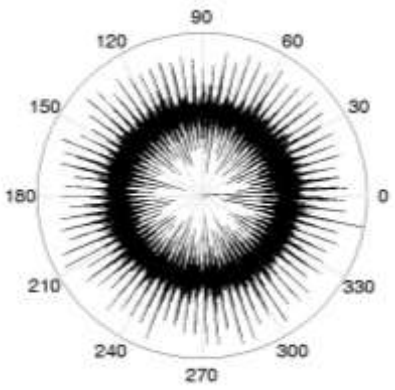
$f(t_i) = f(t_i - kT) = const \quad (k = 1, 2, ...)$. Здесь $t_i \in (0, T)$. Таким образом, математическое ожидание $\hat{f}(t_i)_{t_i \in (0,T)} \equiv f(t_i)$ (здесь $\hat{f}(t_i)$ - операция математического ожидания). Если по периодам повторения T существуют некоторые случайные вариации функции $f(t)$,и они обусловлены аддитивным случайным воздействием, то для определения свойств этой функции можно воспользоваться следующими статистическими функционалами

$$\begin{cases} \hat{f}(t_i) = \dfrac{\sum\limits_{k=0}^{k=N} f(t_i + kT)}{k+1}, k = 1,2,...N, t_i \in (0,T); \\ \sigma(t_i) = \dfrac{\sum\limits_{k=0}^{k=N} \{\hat{f}(t_i) - f(t_i + kT)\}^2}{(k+1)}, k = 1,2,...N, t_i \in (0,T), \end{cases} \qquad (2)$$

где $\hat{f}(t_i)$ - математическое ожидание последовательностей стробоскопического отображения Пуанкаре; $\sigma(t_i)$ - оценка дисперсии стробоскопического отображения Пуанкаре. Рассмотрим примеры статистической оценки $\hat{f}(t_i)$ стробоскопического отображения Пуанкаре(рис.2) для вибрационных последовательностей, которые для наглядности удобно представить в полярных координатах.

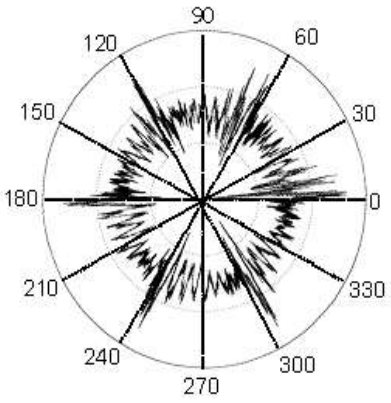
Заключение. Измерение вибраций, сопровождающих процесс фрезерования, с помощью выпускаемых промышленностью виброакселерометров, является легко доступным. Эти датчики легко встраиваются в зажимные приспособления, в которых на столе фрезерных станков устанавливаются обрабатываемые детали. Приведенные достаточно простые алгоритмы преобразования легко измеримых последовательностей вибрационных ускорений в вибрационные смещения позволяют в процессе фрезерования определять периодические упругие деформации инструмента относительно заготовки, что является основой для диагностирования в процессе резания микрорельефа формируемой поверхности обрабатываемой детали.

Использование приведенной методики обработки временных последовательностей ускорений позволили выявить основные закономерности изменения вибраций, сопровождающих процесс фрезерования, в зависимости от технологических режимов, условий обработки и параметров режущего инструмента.



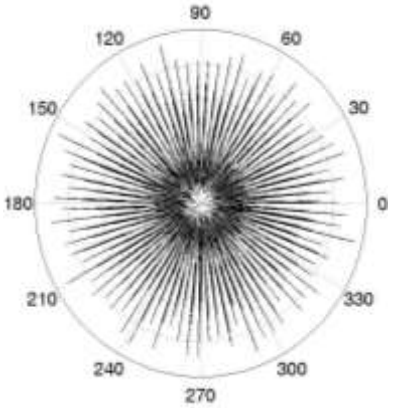
Исходная выборка виброускорений в полярных координатах

а)



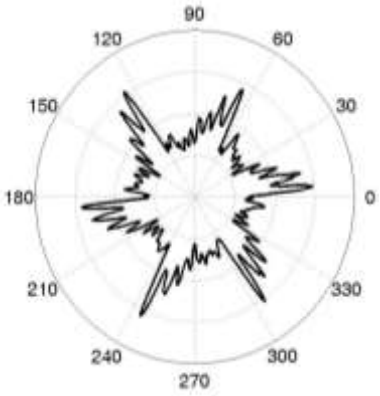
Функция усредненных виброускорений стробоскопического отображения Пуанкаре

б)



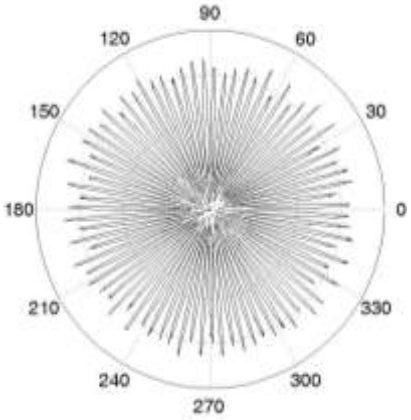
Исходная выборка виброскоростей в полярных координатах

в)



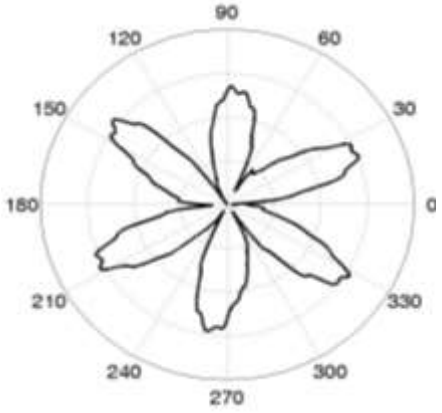
Функция усредненных виброскоростей стробоскопического отображения Пуанкаре

г)



Исходная выборка вибросмещений в полярных координатах

д)



Функция усредненных вибросмещений стробоскопического отображения Пуанкаре

е)

Рис.2. Представление оценок стробоскопического отображения Пуанкаре в полярных координатах

Приведенные методики обработки временных последовательностей ускорений деформационных смещений позволяют создать алгоритмы и оборудование для диагностирования состояния процесса фрезерования и формируемого рельефа поверхности обрабатываемой детали.

Библиографический список

1. Заковоротный В.Л., Фам Динь Тунг, Нгуен Суан Тьем. Математическое моделирование и параметрическая идентификация динамических свойств подсистем инструмента и заготовки при точении. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Техническиенауки.2011.№2.с.38-46.

2. Заковоротный В.Л., Фам Динь Тунг, Нгуен Суан Тьем. Моделирование деформационных смещений инструмента относительно заготовки при точении. Вестник Донского государственного технического университета. 2010. Т10. № 7 (50). С. 1005 – 1015.

3. Заковоротный В.Л., Бордачев Е.В., Алексейчик М.И. Динамический мониторинг состояния процесса резания. СТИН.1998.№12.с.6

УДК 62-526:519.248

К вопросу о прецизионном позиционировании маложестких высокоинерциальных заготовок в условиях граничного трения

Лукьянов А.Д., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, lex1998@rambler.ru
Онойко Т.С., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, shmeluchka@yandex.ru
Бегун В.Г., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,
Верещетин П.П., Университет Вирджинии, Шарлоттсвилль, США, subter69@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты разработки алгоритмов и системы прецизионного позиционирования маложестких высокоинерционных заготовок типа «ротор паровой турбины большой мощности» в условиях граничного трения. Показана неработоспособность алгоритмов, основанных на принципе пропорционального управления. Предложены и проанализированы алгоритмы позиционирования на основе стохастического оценивания величины выбега и адаптивной ее подстройки. Обосновано предпочтение оценивания величины выбега по медиане относительно оцениванию по среднему. Разработана и идентифицирована математическая модель системы.

Ключевые слова: позиционирование, управление, идентификация, граничное трение, упругие деформации, стохастическое оценивание, медиана.

Abstract. The results of the development of algorithms and systems of high precision positioning for low-rigid high-inertial detail like " big power steam turbine rotor " under boundary lubrication were presented. The inoperability of algorithms based on the principle of proportional control was shown. The algorithms of positioning based on stochastic estimation of the value of coasting and its adaptive tuning were proposed and analyzed. The preference of the overrun value evaluation relative to the median vs the average was proved. The identification and development of the mathematical model of the system were made.

Keywords: positioning, control, identification, boundary friction, elastic deformation, stochastic estimation, median.

Введение

Среди проблем создания систем управления и позиционирования проблема создания системам позиционирования механических систем при наличии граничного трения занимает отдельное место, требуя подходов, отличных от традиционных для «хороших» систем позиционирования. В частности, показано [1-5], что алгоритмы позиционирования, основанные на пропорциональном управлении (ПИ и ПИД регуляторы) приводят в подобных системах к возникновению колебаний и не позволяют достичь приемлемой точности. Ситуация усугубляется в том случае, если в позиционируемой системе присутствуют упругие деформации, превышающие по величине требуемую точность позиционирования. В этом случае, даже при условии точного позиционирования на заданную координату и включения удерживающих механизмов (тормозов), в системе наблюдается постепенная релаксация напряжений, смещающая систему из точки позиционирования[6].

Динамическая модель позиционирования ротора и ее идентификация.

Для более детального исследования проблемы позиционирования маложестких высокоинерционных заготовок авторами для рассматриваемой системы (рис. 1) была разработана математическая модель, описывающая процесс позиционирования ротора турбины в условиях действия граничного трения в подшипниках опорных люнетов ротора [7].

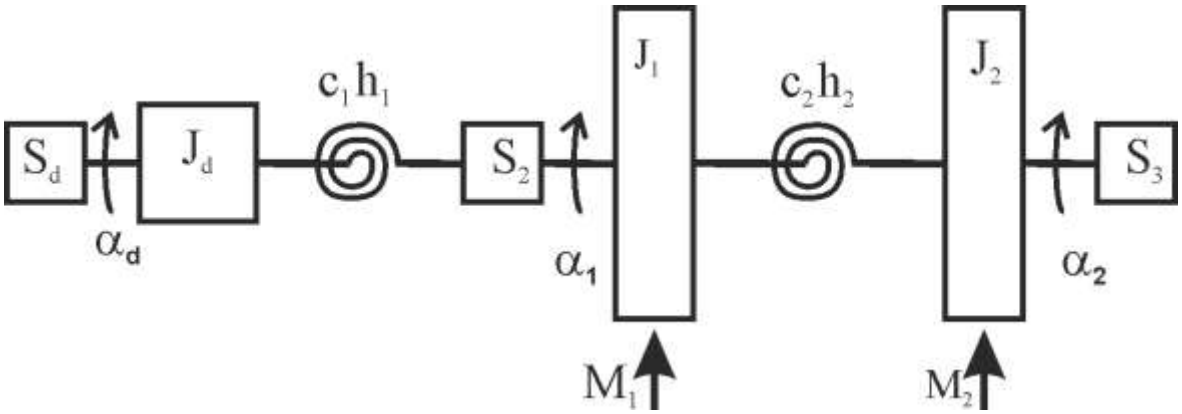


Рис. 1 Структурная схема системы прецизионного углового позиционирования.

$$\begin{cases} J_D \dfrac{d\omega_D}{dt} = M_D - c_1(\alpha_D - \alpha_1) - h_1(\omega_D - \omega_1) - H_D\omega_D \\ \dfrac{d\alpha_D}{dt} = \omega_D \\ J_1 \dfrac{d\omega_1}{dt} = c_1(\alpha_D - \alpha_1) + h_1(\omega_D - \omega_1) - c_2(\alpha_1 - \alpha_2) - h_2(\omega_1 - \omega_2) - M_1 - H_1\omega_1 \\ \dfrac{d\alpha_1}{dt} = \omega_1 \\ J_2 \dfrac{d\omega_2}{dt} = c_2(\alpha_1 - \alpha_2) + h_2(\omega_1 - \omega_2) - M_2 - H_2\omega_2 \\ \dfrac{d\alpha_2}{dt} = \omega_2 \end{cases} \quad (1)$$

Проведенные в производственных условиях эксперименты по позиционированию ротора позволили набрать фактический материал и выполнить процедуру идентификации модели. При этом, по результатам идентификации модель была обоснованно упрощена [8].

$$\begin{cases} J_d \dfrac{d\omega_d}{dt} = M_d - c_1 \Delta\alpha_{d1} - H_d(\omega_d)\omega_d \\ \dfrac{d\alpha_d}{dt} = \omega_d \\ J_1 \dfrac{d\omega_1}{dt} = c_1 \Delta\alpha_{d1} - c_2 \Delta\alpha_{12} - M_1 - H(\omega_1)\omega_1 \\ \dfrac{d\alpha_1}{dt} = \omega_1 \\ J_2 \dfrac{d\omega_2}{dt} = c_2 \Delta\alpha_{12} - M_2 - H(\omega_2)\omega_2 \\ \dfrac{d\alpha_2}{dt} = \omega_2 \end{cases} \quad (2)$$

Также была подтверждена гипотеза функционирования системы позиционирования в условиях граничного трения, с обратной зависимостью коэффициента трения от скорости перемещения ротора. Для учета данной особенности при идентификации модели был использован метод фиктивных переменных [9].

Алгоритмы прецизионного позиционирования маложестких высокоинерциальных заготовок.

Как было упомянуто ранее, применение пропорциональных регуляторов приводит для маложестких систем, работающих в условиях граничного трения к возникновению колебательного режима в окрестности точки позиционирования. Амплитуда колебаний сравнима с величиной упругих деформаций в системе, и для рассматриваемого случая составляла порядка единиц угловых минут при требуемой точности в единицы угловых секунд.

Для решения задачи позиционирования был предложен алгоритм, прогнозирующий величину выбега ротора после остановки двигателя с учетом релаксации упругих деформаций и априорно заданного распределения величины момента сопротивления вращению. При этом оказалось, что в силу особенностей возникающих в системе возмущений, алгоритм прогнозирования величины выбега по математическому ожиданию является более чувствительным к редким импульсным помехам, чем алгоритм с прогнозированием по медианному значению [10].

Заключение

По результатам внедрения разработанных алгоритма и системы позиционирования ротора турбины в условиях ОАО «Калужский турбинный завод» на продольно фрезерном станке мод. 6625 была получена точность позиционирования в интервал ~4” с первого захода в 507 случаях из 570 (~89%), со второго захода – в 570 случаях из 570 (100%)

Библиографический список.

1. J. Das, A.K. Mallik. Control of friction driven oscillation by time-delayed state feedback. Elsevier. Journal of Sound and Vibration 297 (2006), pp. 578–594.
2. Brian Armstrongt and Bimal Amin. PID Control in the Presence of Static Friction: A Comparison of Algebraic and Describing Function Analysis. Elsevier, Automatica, Vol. 32, No. 5, pp. 679-692, 1996.
3. Henrik Olsson and Karl Johan Åström. Friction Generated Limit Cycles. IEEE Transactions on control systems technology, vol. 9, No. 4, July 2001, pp. 629 – 636
4. N. Mihajlovic, N. van de Wouw, M. P. M. Hendriks. H. Nijmeijer. Friction-induced limit cycling in flexible rotor systems: An experimental drill-string set-up. Springer Science + Business Media B.V. Nonlinear Dynamic (2006) 46 pp. 273–291. DOI 10.1007/s11071-006-9042-z.
5. Loring Matron. On analysis of limit cycles in positioning systems near Striebeck velocities. Elsevier. Mechatronics 18 (2008) pp. 46–52.
6. Лукьянов А.Д., Онойко Т.С., Овчаренко Д.С., Овчаренко В.Ю., Щербаков В.М. Практические особенности внедрения системы прецизионного углового позиционирования маложестких высокоинерционных заготовок при нарезании пазов в дисках роторов турбин. // Инновационные технологии в машиностроении и металлургии: мат-лы IV Междунар. науч.-практ. конф. – Ростов-н/Д, Изд. Центр ДГТУ, 2012.
7. Лукьянов А.Д., Онойко Т.С. Компьютерное моделирование системы управления при прецизионном позиционировании при наличии внешнего воздействия // Инновационные технологии в машиностроении и металлургии: сб. тр. V науч.-практ. конф. в рамках IX прим. Конго. Юга России, 11–13 сент. – Ростов-на-Дону , 2013, стр. 633 – 651
8. Алексейчик М.И., Лукьянов А.Д., Онойко Т.С. Идентификация динамической модели системы позиционирования ротора с использованием метода фиктивных переменных. Системы управления и информационные технологии, - 2014. - №3.2(57),
9. Алексейчик М.И., Общий поход к идентификации технических систем. Проблемы машиностроения и автоматизации. Изд-во: РНИИИТ и САП, Москва. №1, 2002. с.1-15.
10. Дмитренко А.А., Лукьянов А.Д., Онойко Т.С. Сравнительный анализ точности позиционирования при стохастическом оценивании выбега ротора. // Инновационные технологии в машиностроении и металлургии: сборник статей VII научно-практической конференции (Ростов-на-Дону, 9–10 сентября 2015 г.). – Ростов н/Д: ДГТУ, 2015. –с.235 - 247

УДК 621.91

Исследование математической модели процесса прерывистого точения вала со шпоночным пазом

Быкадор В.С., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, vitaly.bykador@yandex.ru,

Костенко Г.Ю., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, zashigalka-777@mail.ru,

Филатьева Н.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, filatuska1994@mail.ru,

Аннотация. В статье рассмотрена математическая модель динамики системы резания, имеющей пять степеней свободы. Важной особенностью системы является взаимодействие резца со шпоночным пазом, расположенном на обрабатываемой заготовке. В результате взаимодействия резца со шпоночным пазом возникает процесс прерывистого резания. В данной работе исследуется влияние на качество обрабатываемой поверхности прерывистого резания при различных скоростях резания, а также выделяются диагностические признаки, позволяющих выполнять анализ качества поверхности заготовки и корректировать режимы резания.

Ключевые слова: прерывистое резание, динамика процесса резания, качество обрабатываемой поверхности.

Abstract. In the paper is considered mathematical model of the dynamical cutting system. The system has five degrees of freedom. An interaction of cutting tool and key groove, that located on the surface workpiece was a very of interest to investigate. As a result of interaction a cutting tool and key groove we have a pulse-cutting process. In the paper, we had studied an influence a pulse-cutting process to quality of a machined surface for different cutting velocities. We had shown some diagnostic characters for identification of quality of a machined surface and control cutting process in real time.

Key words: pulse-cutting process, dynamic of the cutting process, quality of a machined surface.

Введение

Процесс прерывистого резания возникает в результате необходимости точения цилиндрических поверхностей на которых ранее был получен либо шпоночный паз, либо шлицевые пазы. Вопросом прерывистого резания занимались и ранее [1], но в отличии от подхода, приведенного в работе [1], в данном исследовании рассматривается система, имеющая пять степеней свободы, учитывается влияние на динамическую характеристику координат перемещения системы. В данной статье исследовано влияние различного числа оборотов на профиль обрабатываемой заготовки, а также выделены основные изменения спектров сигналов виброперемещений заготовки и резца в радиальном направлении, позволяющим выполнять диагностирование качества обрабатываемой заготовки в реальном масштабе времени.

Математическая модель

На рисунке 1 приведена концептуальная модель системы точения.

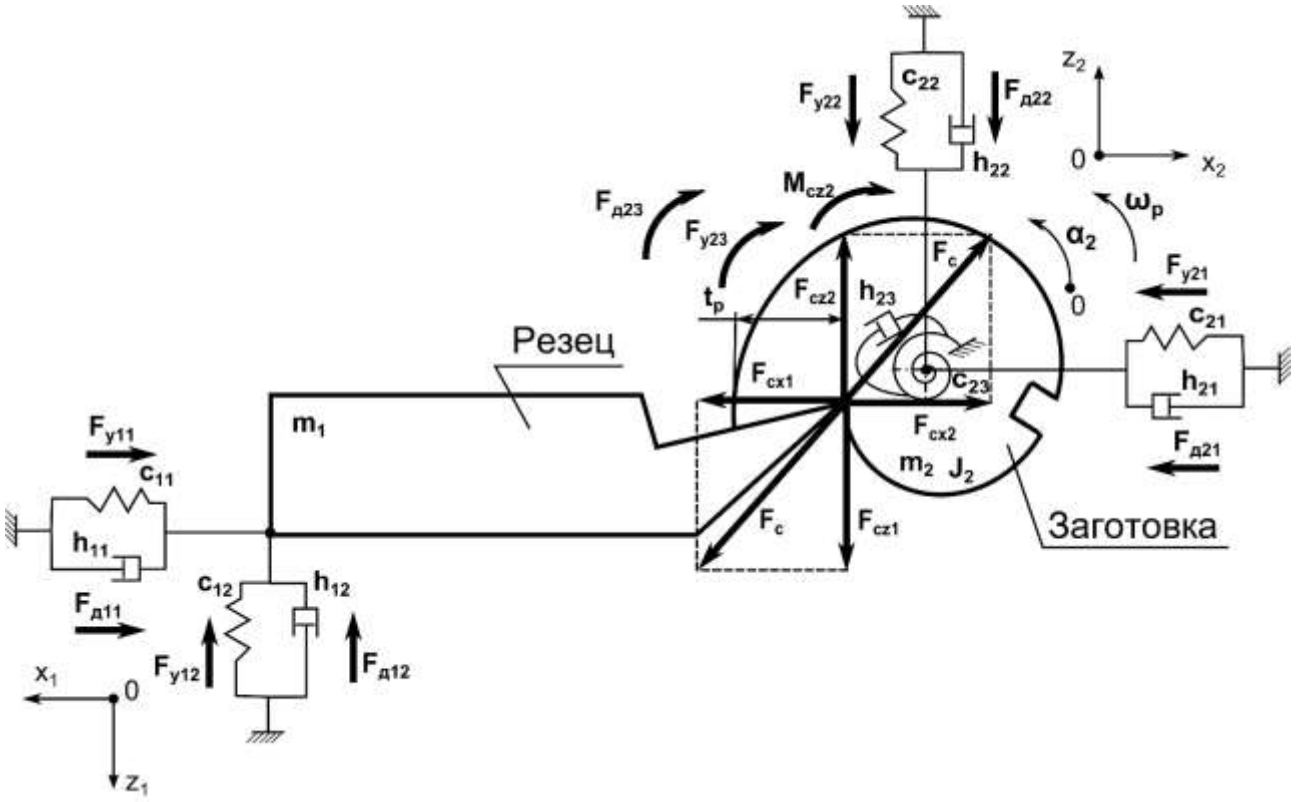


Рисунок 1. Концептуальная модель системы точения

Раскрывая динамическую характеристику процесса точения – силу резания F_cи применяя уравнение Лагранжа II-го рода, получим систему уравнений (1), которая будет представлять математическую модель системы.

$$\begin{cases} m_1\ddot{x}_1(t) + h_{11}\dot{x}_1(t) + c_{11}x_1(t) = k_1F_c(x_1, x_2, \alpha_2, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{\alpha}_2) \\ m_1\ddot{z}_1(t) + h_{12}\dot{z}_1(t) + c_{12}z_1(t) = k_2F_c(x_1, x_2, \alpha_2, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{\alpha}_2) \\ m_2\ddot{x}_2(t) + h_{21}\dot{x}_2(t) + c_{21}x_2(t) = k_1F_c(x_1, x_2, \alpha_2, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{\alpha}_2) \\ m_2\ddot{z}_2(t) + h_{22}\dot{z}_2(t) + c_{22}z_2(t) = k_2F_c(x_1, x_2, \alpha_2, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{\alpha}_2) \\ J_2\ddot{\alpha}_2(t) + h_{23}\dot{\alpha}_2(t) + c_{23}\alpha_2(t) = -\frac{1}{2}Dk_2F_c(x_1, x_2, \alpha_2, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{\alpha}_2) \\ \\ F_c(x_1, x_2, \alpha_2, \dot{z}_1, \dot{z}_2, \dot{\alpha}_2) = \\ = \rho S\left[t_p^{(0)} - (x_1 + x_2)\right]\left[3\cdot 10^{-2}D\left(\omega_p^{(0)} + \dot{\alpha}_2\right) - (\dot{z}_1 + \dot{z}_2)\right]\cdot\psi(\alpha_2) \\ \\ \psi(\alpha_2) = \begin{cases} 1, \alpha_2 \notin [\Theta_1, \Theta_2], \\ 0, \alpha_2 \in [\Theta_1, \Theta_2]. \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

где m_1, m_2- приведенные масса резца и заготовки, соответственно, $\frac{\text{кг}\cdot\text{с}^2}{\text{мм}}$; J_2- приведенный момент инерции заготовки, $\frac{\text{кг}\cdot\text{мм}\cdot\text{с}^2}{\text{рад}}$;$h_{i,j}$- приведенные коэффициенты диссипации подсистем инструмента и заготовки по направлениям ($i = 1, 2;\ j = \overline{1, 3}$), $\frac{\text{кг}\cdot\text{с}}{\text{мм}}$;$c_{i,j}$- приведенные коэффициенты жесткости подсистем инструмента и заготовки по направлениям ($i = 1, 2;\ j = \overline{1, 3}$), $\frac{\text{кг}}{\text{мм}}$;$k_1$, k_2–

коэффициенты проекций силы резания F_cпо ортогональным направлениям; D–диаметр обрабатываемой заготовки, мм; ρ – коэффициент удельного давления стружки на переднюю поверхность инструмента, $\frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$; S – подача на оборот, $\frac{\text{мм}}{\text{об}}$; $t_p^{(0)}$ – технологически заданная глубина резания, мм; $\omega_p^{(0)}$ – технологически заданная частота вращения заготовки, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$; $\psi(\alpha_2)$ – функция моделирования контакта режущего инструмента и заготовки; Θ_1, Θ_2–угловые координаты расположения шпоночного паза на профиле заготовки, град.

Анализ результатов моделирования

Представив систему (1) в нормальной форме Коши и выполнив цифровое моделирование системы были построены конфигурации профиля заготовки и амплитудные спектры колебаний режущего инструмента и заготовки для различных частот вращения заготовки. Результаты моделирования приведены на рисунке 2 и рисунке 3.

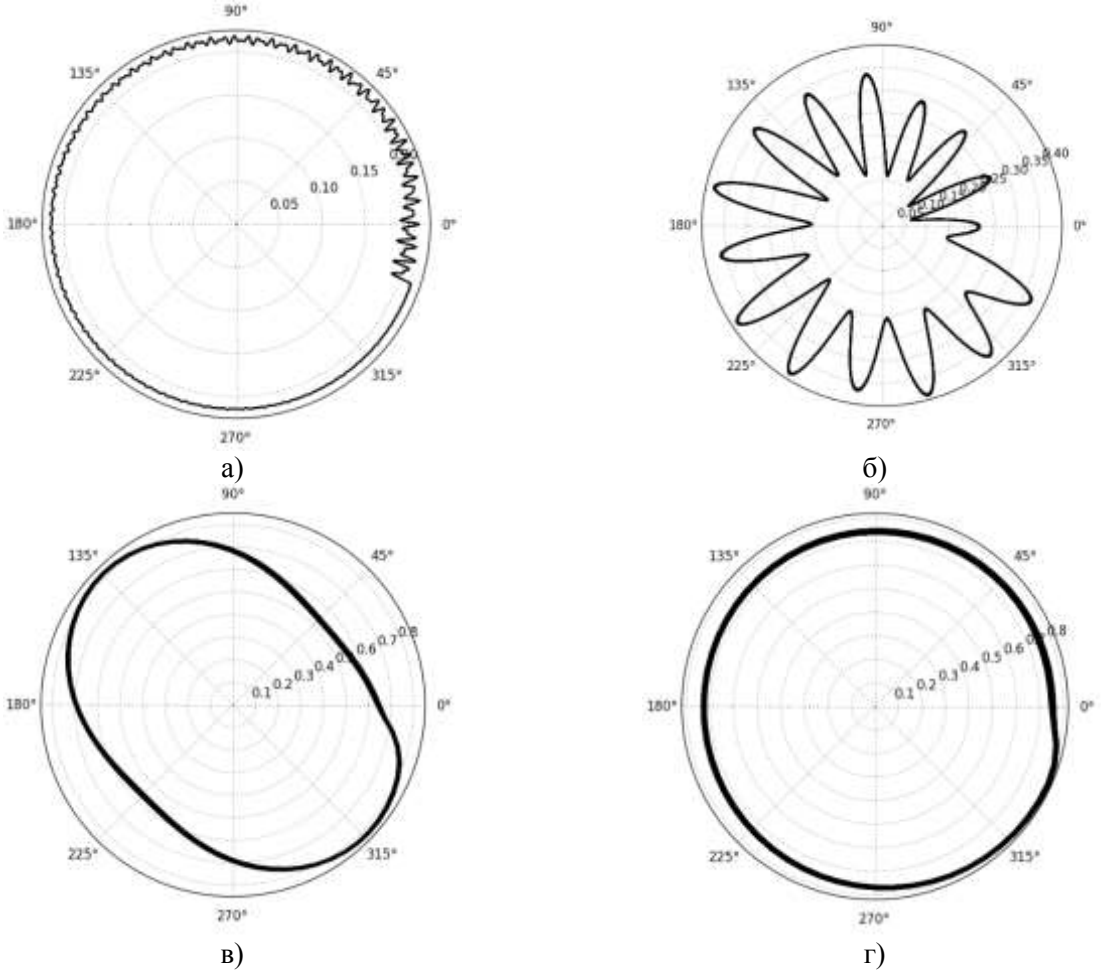
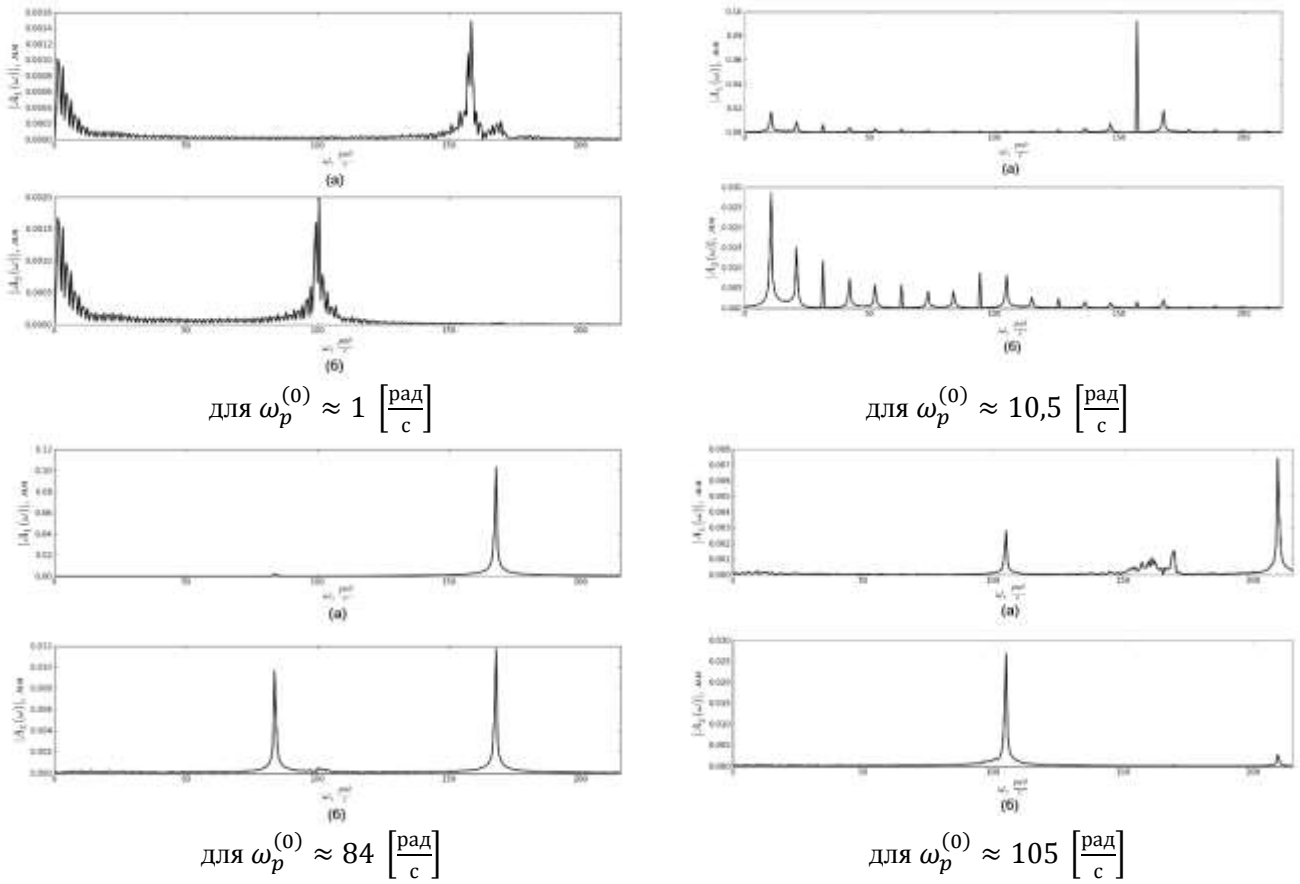


Рисунок 2. Профили заготовки для частот вращения шпинделя:
а) $\omega_p^{(0)} \approx 1\ \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right]$;б) $\omega_p^{(0)} \approx 10{,}5\ \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right]$;в) $\omega_p^{(0)} \approx 84\ \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right]$;г) $\omega_p^{(0)} \approx 105\ \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right]$

Из рисунка 2,а можно видеть, что на профиле заготовки имеется повышенная шероховатость, обусловленная возмущающим воздействием шпоночного паза на траектории движения режущего инструмента и заготовки. При этом шероховатость уменьшается с течением времени. То есть

шероховатость на одной стороне обработанной поверхности будет выражена больше чем на другой стороне. Такой профиль возможен в том случае, если переходные процессы в упруго-диссипативных подсистемах инструмента и заготовки завершаются быстрей, чем время повторения возмущающего воздействия шпоночного паза. При увеличении частоты вращения шпинделя $\omega_p^{(0)}$ на профиле заготовки образуется волнистость. Дальнейшее увеличение частоты $\omega_p^{(0)}$ приводит к формированию овальности профиля заготовки. Ещё большее увеличение частоты $\omega_p^{(0)}$ приводит к образованию локального дефекта на профиле обрабатываемой заготовки.

На рисунке 3 приведены амплитудные спектры колебаний инструмента и заготовки.



для $\omega_p^{(0)} \approx 1 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right]$ для $\omega_p^{(0)} \approx 10{,}5 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right]$

для $\omega_p^{(0)} \approx 84 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right]$ для $\omega_p^{(0)} \approx 105 \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right]$

Рисунок 3. Амплитудный спектр колебаний в радиальном направлении:
а) инструмента; б) заготовки

Как можно видеть из рисунка 3, спектры колебаний режущего инструмента и заготовки в радиальном направлении имеют различный вид, отличаются по составу компонентов, численным значениям частот и амплитуд компонентов, для различных профилей заготовки. Соответственно, такое отличие спектров, позволяет реализовать диагностирования типа формируемого профиля заготовки в реальном масштабе времени с последующей коррекцией управления процессом резания.

Вывод

Упруго-диссипативные свойства системы резания совместно с воздействием на систему возмущения в виде шпоночного паза, при различных частотах вращения шпинделя станка,

формируют различные по виду профили заготовки. Анализируя амплитудные спектры радиальных колебаний резца и заготовки возможно диагностирования вида формируемых профилей в реальном масштабе времени с последующей коррекцией режимов обработки.

Библиографический список

1. Кошелева А.А. Уменьшение вибрации технологической системы станка при прерывистом резании // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2008. – № 4.– С. 207 – 212.

УДК 621.91: 531.3

Самоорганизация и бифуркации динамической системы обработки металлов резанием

Фам Дин Тунг, Государственный технический университет им. Ле Куй Дона, Ханой, Вьетнам, phamdinhtung@mail.ru,

Заковоротный В.Л., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, vzakovorotny@dstu.edu.ru,

Быкадор В.С., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, vitaly.bykador@yandex.ru,

Голованёв В.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, vanbom@ya.ru,

Аннотация. В статье рассмотрена математическая модель динамики системы резания. Исследованы бифуркации системы и типы фазовых траекторий системы. Показано наличие в системе предельного цикла и двумерного инвариантного цикла. Сформулированы рекомендации по проектированию процессов резания.

Ключевые слова: система резания, динамика процесса резания, предельный цикл, инвариантный тор.

Abstract. In the paper is considered mathematical model of the dynamical cutting system and types of the phase trajectories of the system. It was shown, the system has orbitally stable solution and double invariant torus. Recommendations were given for design cutting processes.

Key words: cutting system, dynamic of the cutting process, orbitally stable solution, double invariant torus.

Введение

Резание металлов является нелинейным процессом, для которого характерно формирование сложных траекторий движения вершины режущего инструмента и поверхности обрабатываемой заготовки. Например, такими движениями являются автоколебательные движения, которые можно наблюдать, как в лабораторных, так и производственных условиях. За частую, автоколебательные движения имеют более чем одну частоту. Более того, следует отметить, что в зависимости от варьирования некоторых параметров системы, вид траекторий движения элементов металлорежущей системы, может менять скачкообразно, то есть в системе могут наблюдаться бифуркации.

Без условно, автоколебательные движения элементов металлорежущей системы, негативно сказываются на точность обработки и качество поверхностного слоя обрабатываемой заготовки, поэтому такие движения подлежат подробному изучению.

Математическая модель

Исследование свойств системы резания возможно на основе математической модели динамики системы. Концептуальная модель системы показана на рисунке 1.

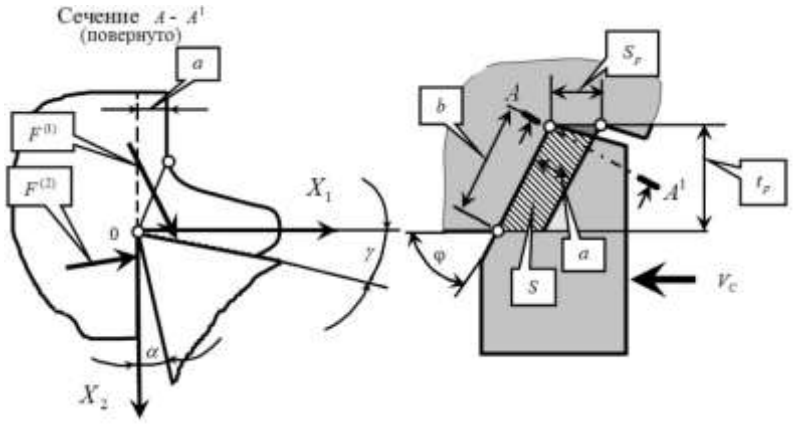


Рисунок 1. Концептуальная модель системы [1]

При построении математической модели были сделаны следующие допущения: упругие деформационные смещения рассматриваются в подвижной системе координат, угловая скорость вращения заготовки и скорость резания V считаются постоянными, сила резания формируется в виде суммы двух составляющих, действующих на переднюю $F^{(1)}$ и заднюю $F^{(2)}$ грань инструмента, ориентация сил в установившемся состоянии не меняется, деформационные смещения в нормальном направлении $(X_1 - X_2)$ к плоскости не учитываются, жесткость подсистемы заготовки считается на порядок большей, чем инструмента, поэтому ее деформационные смещения не учитываются. На основании выше приведенных допущений была получена система (1) дифференциальных уравнений системы [1].

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2X_1}{dt^2} + h_{1,1}\dfrac{dX_1}{dt} + h_{2,1}\dfrac{dX_2}{dt} + c_{1,1}X_1 + c_{2,1}X_2 = \chi_1\rho\cdot b\cdot(a - y_1) + \\ + \chi_1^{(1)}F_1^{(0)}\exp(-\dfrac{dX_1/dt}{T_3}) - \chi_2^{(1)}\alpha_1[V - \dfrac{dX_2}{dt} - \alpha_2(V - \dfrac{dX_2}{dt})^3]; \\ m\dfrac{d^2X_2}{dt^2} + h_{1,2}\dfrac{dX_1}{dt} + h_{2,2}\dfrac{dX_2}{dt} + c_{1,2}X_1 + c_{2,2}X_2 = \\ = \chi_2\rho\cdot b\cdot(a - y_2) + \chi_2^{(1)}F_1^{(0)}\exp(-\dfrac{dX_1/dt}{T_3}) - \chi_2^{(2)}\alpha_1[V - \dfrac{dX_2}{dt} - \alpha_2(V - \dfrac{dX_2}{dt})^3]; \\ T_1\dfrac{dy_1}{dt} + y_1 = X_1; \\ T_2\dfrac{dy_2}{dt} + y_2 = X_1, \end{cases} \quad (1)$$

где m, $h_{i,j}$, $c_{i,j}$ - приведенные коэффициенты массы, диссипации и жесткости системы, соответственно, $\left[\dfrac{кг\cdot с^2}{мм}\right]$, $\left[\dfrac{кг\cdot с}{мм}\right]$ и $\left[\dfrac{кг}{мм}\right]$; a, b - соответственно толщина и ширина срезаемого слоя в $[мм]$; $F^{(0)}$ - сила резания, действующая на заднюю грань инструмента в стационарном состоянии

$[кг]$; T_3 - параметр, определяющий крутизну нарастания силы, действующей на заднюю грань резца, $[мм/с]$; V - скорость резания; α_1, α_2 - параметры кинетической характеристики процесса резания, которые определяют приращение тангенциальной составляющей силы резания, действующей на заднюю грань инструмента, $[кг \cdot с/мм]$ и $[(с/мм)^2]$.

Следует отметить, что в математической модели системы, учитывается два противоречивых фактора. Первый фактор, определяет влияние скорости резания на предел прочности материала через изменение температуры, производство которой, как известно, зависит от мощности резания, возрастающей при увеличении скорости. Таким образом, при увеличении скорости резания, силы уменьшаются. Второй фактор связан с тем, что составляющие силы резания запаздывают по отношению к деформационным смещениям режущего инструмента. Следует отметить, что запаздывание составляющих силы резания происходит по апериодическому закону, что учтено введение в систему соответствующих уравнений с промежуточными координатами y_1 и y_2.

Бифуркации динамической системы обработки металлов резанием

Выполняя исследование системы (1), при варьировании параметров T_3 и α_1, были получены три состояния системы: устойчивая точка равновесия, автоколебания и так называемый тор. Разделение плоскости $(T_3 - \alpha_1)$ на различные типы траекторий показано на рисунке 2 [1].

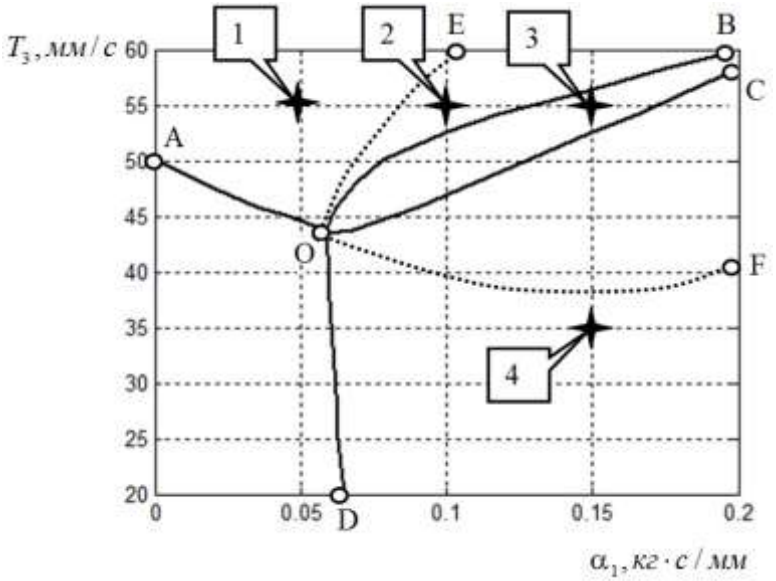


Рисунок 2. Бифуркационная диаграмма в плоскости $(T_3 - \alpha_1)$: «A-O-D» – область устойчивости равновесия «B-O-C» –область формирования двумерного инвариантного тора; «A-O-B» -область формирования орбитально асимптотически устойчивого предельного цикла на низкой частоте; «C-O-D» – область формирования орбитально асимптотически устойчивого предельного цикла на высокой частоте [1].

Из рисунка 2 четко видно существование различных видов траекторий движения, при этом переход от одного к другому виду движения происходит скачкообразно при достижении параметров T_3 и α_1 определенных значений, то есть в системе резания имеют место быть бифуркации.

На рисунке 2 отмечены четыре точки, для которых можно показать вид фазовых траекторий (рисунок 3), полученных цифровым моделированием системы (1).

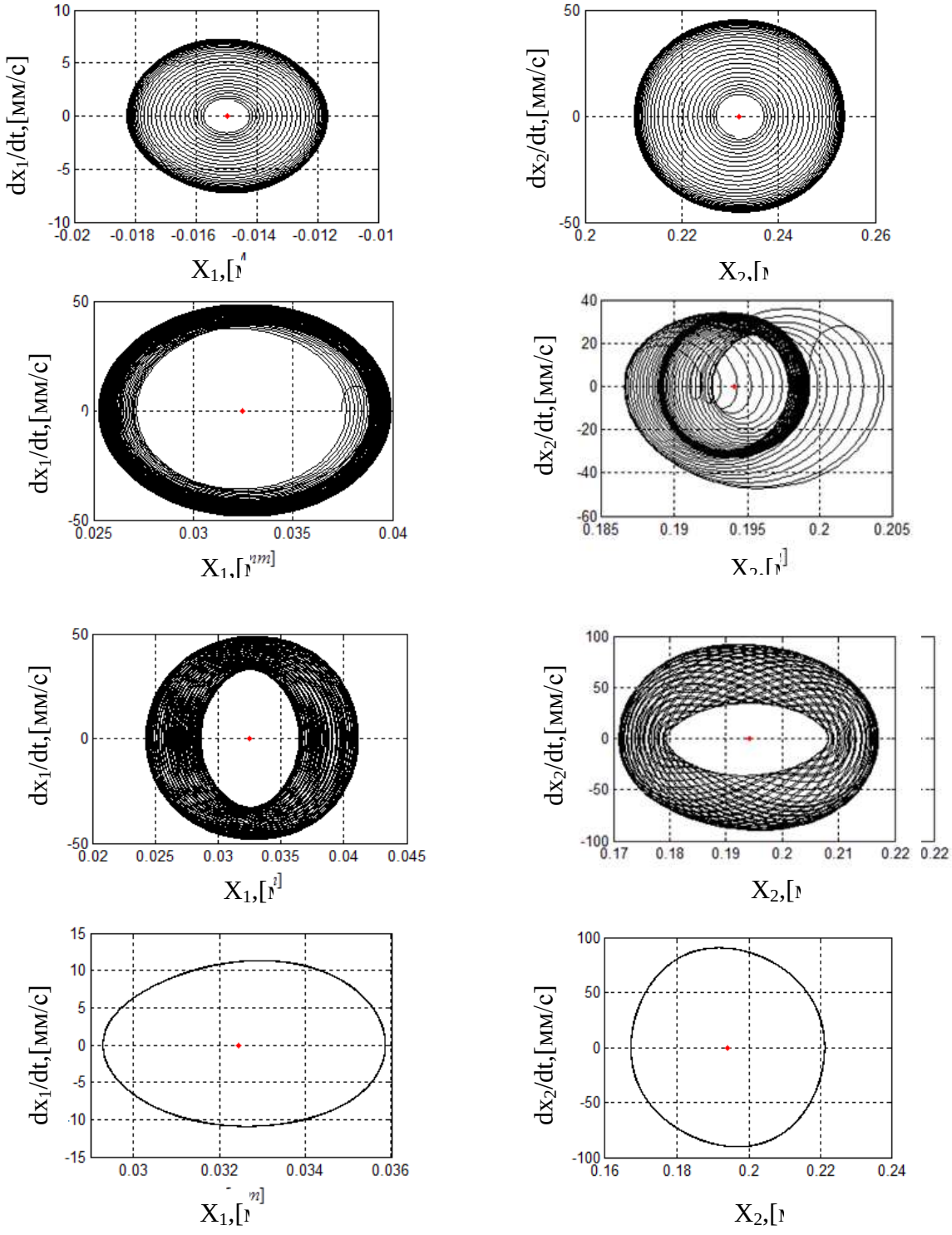


Рисунок 3. Фазовые траектории системы [1]

Выводы

Учет в системе резания лишь зависимости силы резания от скорости резания, а также запаздывания составляющих силы резания по отношению к упругим деформационным смещениям инструмента, показал, что в система становится существенно нелинейной. Нелинейность системы

проявляется в двух направлениях. Во-первых, в системе, имеют место быть различного рода предельные циклы. Во-вторых, переход от этих предельных циклов происходит скачкообразно, то есть в системе резания существуют бифуркации.

Эти нелинейные эффекты оказывают влияние на износостойкость инструментов [2, 3], зависящих от параметров автоколебаний, а также на шероховатости формируемой поверхности. Поэтому изучение механизмов их образования позволяет улучшить качество механической обработки.

Библиографический список

1. Заковоротный В.Л., Фам Динь Тунг, Быкадор В.С. Самоорганизация и бифуркации динамической системы обработки металлов резанием // Прикладная нелинейная динамика, Саратов, 2014, Т.22, №3, с. 26-39.

2. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1987. 184 с.

3. Остафьев В.А., Антонюк В.С., Тымчик Г.С. Диагностика процесса металлообработки. / В.А. Остафьев, В.С. Антонюк, Г.С. Тымчик.// К.: Техника, 1991. – с. 54 – 55.

УДК 681.51:621.95.01

Оценка влияния скорости подачи, на равновесные режимы привода обеспечивающего фрезерование заготовки переменной толщины

Лапшин В.П., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, i090206.lapshin@yandex.ru

Тюняев Р.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Христофорова В.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, nikaapp@rambler.ru.

Аннотация. Рассматриваются вопросы моделирования статики системы управления приводом обеспечивающим резанье в фрезеровальном станке при обработке заготовки переменной толщины. Приведены результаты моделирования равновесных режимов при фрезеровании заготовки переменной толщины в среде Matcad. Результаты моделирования позволяют сделать вывод об отсутствии точечного стационарного равновесного режима. Проведена оценка динамики системы в окрестности устойчивого равновесного режима, сделаны выводы о слабом влиянии, на область притяжения устойчивого многообразия, изменений матрицы жесткости.

Ключевые слова: фрезерование, момент сопротивления, модель, вариация припуска.

Abstract. Discusses issues of modeling the statics of a drive control system providing the cutting in a milling machine during machining of a workpiece of variable thickness. The results of the simulation of equilibrium modes when milling workpieces of variable thickness in the environment Matcad. The simulation results allow to ETS-lat the conclusion that there was no point of stationary equilibrium regime. Evaluates the dynamics of the system in a neighborhood of a stable equilibrium regime, made you water a weak influence on the basin of attraction of the stable manifolds of the changes matrix stiffness.

Keywords: milling, moment of resistance, the model, the variation of the allowance.

Не смотря на развитость как теории и практики обработки материалов резаньем [1, 2], при решении некоторых задач возникают особенности, влияние которых на процесс обработки материалов настолько существенно, что требуется отдельное рассмотрение моделей описывающих динамику обработки для этих случаев. В качестве задач такого типа выступают задачи, связанные с учетом упругих движений инструмента или заготовки в зонах близких к зоне резанья. В качестве примера такой задачи рассмотрим процесс фрезерования для случая, когда по мере увеличения подачи будет увеличиваться упругая составляющая жесткости, учитываемая в силовой реакции со стороны процесса резанья.

Во всех дальнейших рассуждениях: x – координата обозначающая подачу, y – координата показывающая направление, в котором происходят изгибные упругие отклонения заготовки в процессе обработки. Реакция, возникающая в зоне резанья, на действие фрезы может быть, в самом общем случае, описано следующим выражением [1]:

$$F = \rho_0 t_p (a - y), \quad (1)$$

гдеρ_0 - плотность обрабатываемого материала, t_p – глубина фрезеруемого слоя,a - площадь срезаемого слоя. Площадь срезаемого слоя можно определить как интеграл от скорости подачи за один оборот фрезы, то есть в виде следующего выражения:

$$a = \int_{t-T}^{t} V(t)dt, \quad (2)$$

где$V(t)$ – скорость подачи, T - период вращения фрезы, величина обратная скорости вращения фрезы.

Наиболее часто распространенным режимом обработки металлов на металлорежущих станках является режим небольшой, но постоянной скорости подачи [1].В этом случае площадь срезаемого слоя определиться как:

$$a = VT = \frac{V}{\omega}, \quad (3)$$

где ω – угловая скорость фрезы.

Введем в (1) полученное в (3) выражение, получим:

$$F = \rho_0 t_p (\frac{V}{\omega} - y). \quad (4)$$

Значение упругих деформаций заготовки можно определить по закону Гука$F = \mathrm{c}(x)y$,где(x) - жесткость заготовки, изменяющаяся по мере движения фрезы.Определим из этого упругие деформации, как $y = \frac{F}{c(x)}$, тогда силовая реакция в зоне резанья, с учетом упругих деформаций заготовки примет вид:

$$F = \frac{\rho_0 t_p c(x)}{[\rho_0 t_p + c(x)]} \frac{V}{\omega}. \quad (5)$$

Сделаем гипотезу, что вид характеристики описывающей зависимость изменения жесткости заготовки будет зависеть от геометрической формы обрабатываемой детали, к примеру, $\mathrm{c}(x)$- будет экспоненциально нарастать от $x = 0$ до $x = l$. Потребуем от функции, описывающей изменения $\mathrm{c}(x)$, чтобы она экспоненциальнорасла в пределах от c_{min} до c_{max}, или $\lim_{y\to 0} c(x) \to c_{min}$, $\lim_{y\to l} c(x) \to c_{max}$.

В качестве функции, описывающей вышеизложенную зависимость, используем функцию следующего вида[3]:

$$c(x) = c_{min} + \Delta c[1 - e^{-\frac{5x}{l}}], \quad (6)$$

где$\Delta c = c_{max} - c_{min}$. Для c_{max} = 500 Н/мм, c_{min} = 350 Н/мм, l=0.05 м.

Отметим, что координата (x), характеризующая подачу, может быть определена как$x = \int_0^t V dt$. Учитывая, то факт, что *V=const*, то *x=Vt,* где t текущее время обработки заготовки. Эти рассуждения позволяют интерпретировать переменную жесткость заготовки (см. выражение8) как функцию времени. В связи с этим, реакция системы на процессы, проходящие в зоне резанья (см. выражение (5)), будет функцией зависящей от скорости вращения фрезы и времени от начала

процесса обработки, то есть выражение (5), для случая увеличения жесткости упругой реакции со стороны заготовки, можно представить в следующем виде:

$$F = \frac{\rho_0 t_p [c_{min} + \Delta c(1 - e^{-\frac{5Vt}{l}})]}{[\rho_0 t_p + c_{min} + \Delta c(1 - e^{-\frac{5Vt}{l}})]} \frac{V}{\omega}. \quad (7)$$

Для моделирования выражения (7), и получения графической интерпретации, введем в эти выражения$\rho_0 = 30$ кг/мм - плотность обрабатываемого материала соответствующая большому количеству обрабатываемых материалов, t_p= 20 мм – примерная стандартная глубина фрезеруемого слоя [1].

Пусть двигатель обеспечивающий вращение фрезы будет простым двигателем постоянного тока с коллекторным управлением, описываемым системой уравнений следующего вида:

$$\begin{aligned} U - c_e\omega &= L\frac{di}{dt} + Ri \\ c_m i &= J\frac{d\omega}{dt} + KF \end{aligned}, \quad (8)$$

где K – некоторый коэффициент характеризующий связь момента сопротивления на валу двигателя с силовой реакцией, возникающей в зоне резанья,J – момент инерции якоря, L – индуктивность обмотки якоря, R – сопротивление якоря, c_m - электромеханическая постоянная, i – номинальный ток якоря, U – входное напряжение, ω - частота вращения.

Преобразуем систему (9) к одному уравнению второго порядка, получим:

$$\frac{U}{c_e} = T_{\text{эм}}T_{\text{э}}\frac{d^2\omega}{dt^2} + T_{\text{эм}}\frac{d\omega}{dt} + \omega + T_{KL}\frac{dF}{dt} + T_{KR}F. \quad (9)$$

где $T_{\text{э}} = \frac{L}{R}$ - электрическая постоянная двигателя,$T_{\text{эм}} = \frac{RJ}{c_m c_e}$- электромеханическая постоянная двигателя, $T_{KL} = \frac{KL}{c_m c_e}$ - временная постоянная двигателя обеспечивающая связь частоты вращения двигателя со скоростью изменения силовой реакции в зоне резанья, $T_{KR} = \frac{KR}{c_m c_e}$- временная постоянная двигателя обеспечивающая связь частоты вращения двигателя с силовой реакцией в зоне резанья.

При условии стабилизации переходных процессов в системе все производные в уравнении (9) станут равны нулю:

$$\frac{U}{c_e} - \omega - T_{KR}\frac{\rho_0 t_p [c_{max} + \Delta c(1 - e^{-\frac{5Vt}{l}})]}{[\rho_0 t_p + c_{max} + \Delta c(1 - e^{-\frac{5Vt}{l}})]}\frac{V}{\omega} = 0. \quad (10)$$

Примем в качестве допущения, что двигателем, обеспечивающим режим резанья является двигатель МИ21 (c_e= *0.34,* c_m= *1.08, R=1.48 Ом, L=0.011184 мГн, J=0.06 кг*м*^{2}, U_n=150 В,* а коэффициент $K = 19$, тогда, скорость подачи определим $V = 0.2$ мм/с. Построим уравнение (10) в трехмерном виде (см. рис. 1).

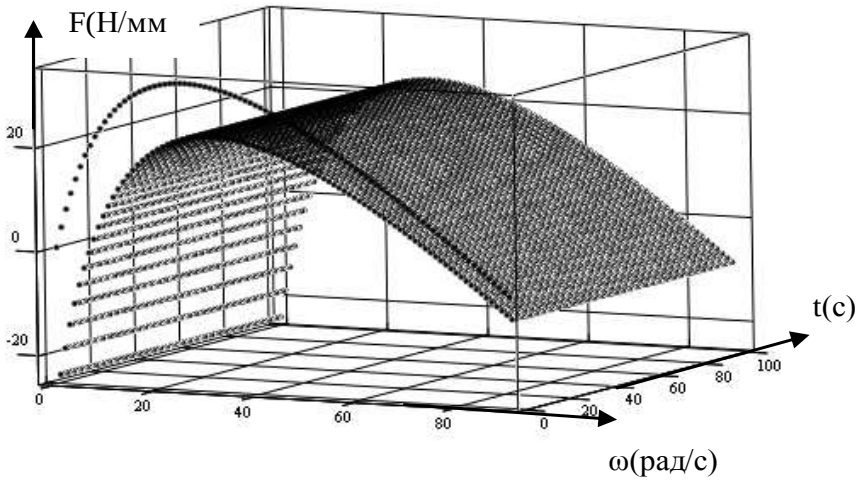


Рис.1 Изменение нагрузочной характеристики при$V = 2$ мм/с

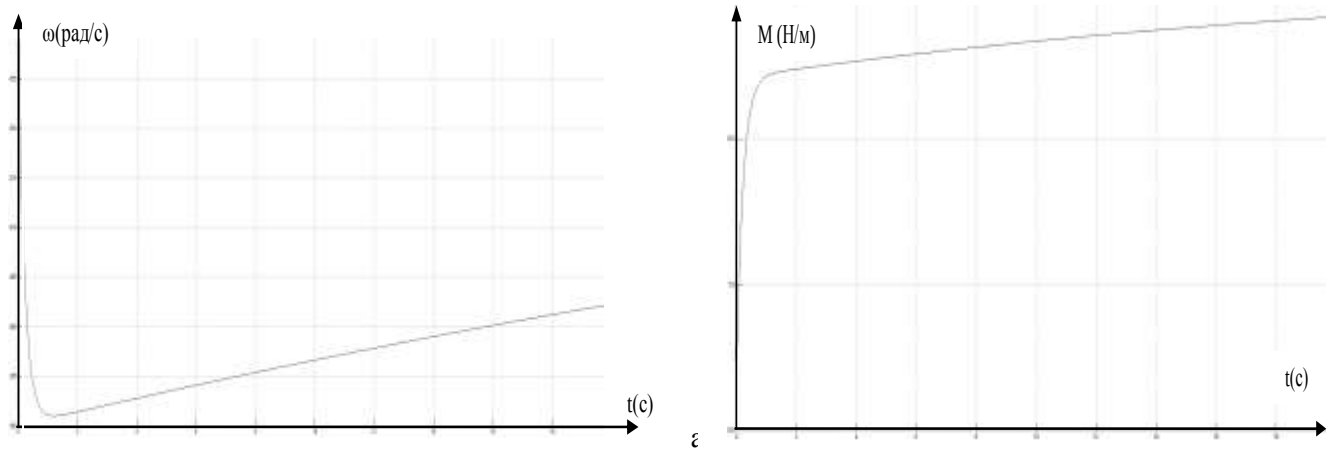
Как видно из рис. 1,правая характеристика равновесного существенно приблизилась к левой, что может говорить об уменьшении области притяжения устойчивого равновесного режима работы системы, обеспечивающей резанье.

Для оценки динамики привода, обеспечивающего вращение фрезы, раскроем выражение (9), подставив в него вместо F и $\frac{dF}{dt}$ их значения с учетом (7), для этого найдем производную для (7).

$$\frac{dF}{dt} = -\frac{\rho_0 t_p[c_{max} + \Delta c(1 - e^{-\frac{5Vt}{l}})][\rho_0 t_p + c_{max} + \Delta c(1 - e^{-\frac{5Vt}{l}})]V\frac{d\omega}{dt}}{[(\rho_0 t_p + c_{max} + \Delta c(1 - e^{-\frac{5Vt}{l}}))\omega]^2} \quad (1$$

$$+\frac{5V^2{\rho_0}^2{t_p}^2\Delta c e^{-\frac{5Vt}{l}}\omega}{l[(\rho_0 t_p + c_{max} + \Delta c(1 - e^{-\frac{5Vt}{l}}))\omega]^2}$$

Для оценки динамики системы проведем эксперимент, считая, что начальная скорость врезания фрезы ω_0 будет равна 430 рад/сек, скорость подачи $V = 0.2$ мм/с.В этом случае, динамику процесса можно оценить по временным характеристикам, отражающим изменения скорости вращения фрезы и временным зависимостям момента (см. рис. 2).



а)

б)

Рис. 2. Результаты моделирования: а) скорости вращения, б) момента сопротивления

Как видно из рис. 2а) скорость вращения фрезы в начальный момент времени, при врезании в заготовку резко падает, но в последующем стабилизуется, и стремиться к ранее определенному стационарному состоянию. Момент, возникающий в зоне резанья, вначале резко увеличивается, но в последующем его рост становиться крайне незначительным, что связанно, по нашему мнению, с восстановлением скорости вращения фрезы (см. рис.2 б)).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при обработке заготовки переменной толщины система резанья не будет иметь точечного равновесного режима работы. Скорость вращения фрезы будет эволюционировать вдоль некоторой прямой в пространстве связанном со временем обработки. В связи с тем, что первый равновесный режим является неустойчивым, по мере сближения траекторий движения равновесных режимов, область притяжения устойчивого режима уменьшается, но стабилизация скорости вращения фрезы на начальном этапе существенно замедляет это движение.

Библиографический список

1. Рыжкин А.А., Шучев К.Г., Климов М.М. Обработка материалов резаньем: учебное пособие – Ростов н/Д: Феникс, 2008– 577 с.

2. Заковоротный В.Л., Флек М.Б. Динамика процесса резанья. Синергетический подход.- Ростов/н/д: Терра.2006 – 876 с.

3. Балакирев В.С., Дудников Е.Г., Цирлин А.М. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. – М.: Энергия, 1967 – 232 с.

УДК 621.95.08:51-74

Динамическая диагностика состояния обработки поликристаллическими алмазными инструментами

Быкадор В.С., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, vitaly.bykador@yandex.ru,

Бобрешов Р.И., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Аннотация. В статье рассматривается применение стробоскопического преобразования А. Пуанкаре для диагностирования отклонений сверла в радиальном направлении.

Ключевые слова: стробоскопическое преобразование Пуанкаре, диагностирование технологических процессов.

Abstract. The use of stroboscopic Poincare transformation to diagnose abnormalities in the radial direction of the drill is discusses in the article.

Keywords: stroboscopic Poincare transformation, diagnosis processes.

Введение.

Сверление глубоких отверстий малого диаметра поликристаллическими алмазными инструментами, как и обычное сверление, обладает принципиальной нестационарностью свойств по мере заглубления инструмента [1 - 7]. Поэтому одной из проблем процесса сверления глубоких отверстий является обеспечение геометрической точности параметров отверстия на основе построения систем диагностирования. Основные принципы построения таких систем известны [3, 4]. Под погрешностью геометрических параметров отверстия, как правило, понимаются отклонения действительного диаметра отверстия от его идеального диаметра (разбивка отверстия) и отклонение действительной оси отверстия от его идеальной оси (увод оси отверстия). Одним из способов устранения радиальных отклонений сверла является адаптивное управление процессом сверления [1, 2]. При построении систем управления естественным образом возникает проблема диагностирования качества поверхности непосредственно в процессе обработки. Один из способов построения такой системы рассматривается в статье. Он основан на анализе последовательностей, построенных с помощью использования отображений Пуанкаре.

Обоснование использования стробоскопического отображения Пуанкаре.

На рис.1 приведена схема измерения радиальных отклонений сверла бесконтактным способом, при помощи токовихревых датчиков.

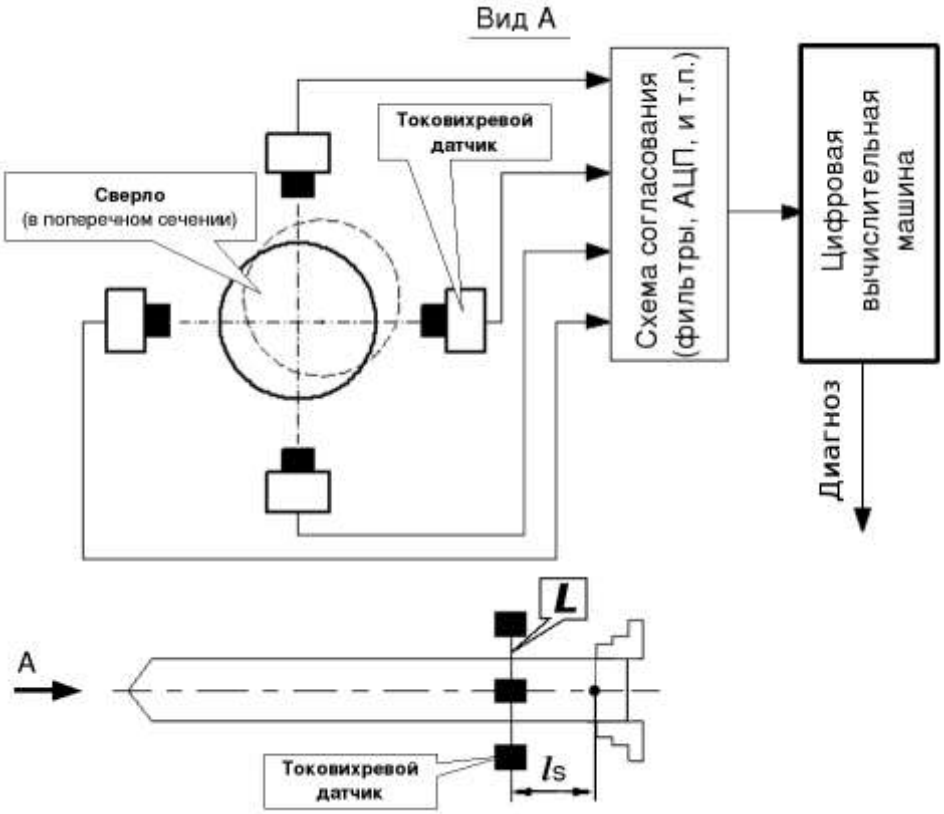


Рис. 1. Схема измерения радиальных отклонений сверла при помощи токовихревых датчиков

Радиальные отклонения вершины сверла в ортогональных направлениях представляют собой вектор функций времени $Y = \|y_1(t), y_2(t)\|^T$, анализ которых позволяет установить значения отклонений по каждому направлению, вид отклонений и их тренд во времени. Процессы, протекающие в зоне резания, находятся в частотном диапазоне определяемым частотой вращения шпинделя станка ω_p. Собственные колебания системы, как минимум, на порядок выше частоты шпинделя ω_p, поэтому можно считать, что резонансные свойства подсистемы инструмента проявляться не будут. Другим словами, основные факторы, вызывающие разбивку диаметра и увод оси отверстия вызваны возмущениями, связанными с физическими явлениями, сопутствующими процессу резания и периодически повторяющими с периодом, определяемым частой вращения шпинделя ω_p. Для выявления таких периодичностей удобно использовать стробоскопическое преобразование А. Пуанкаре от вектора непрерывных функций Y [8]. Вектор Y представляет собой решения системы дифференциального уравнения (1), которое составляется по правилам, изложенным в [9, 10]. Для сверления система описывает движения вершины сверла в ортогональных радиальных направлениях во временной области.

$$M \cdot \frac{d^2Y}{dt^2} + H \cdot \frac{dY}{dt} + C \cdot Y = P_Y(Y, S_P, V_P) \qquad (1)$$

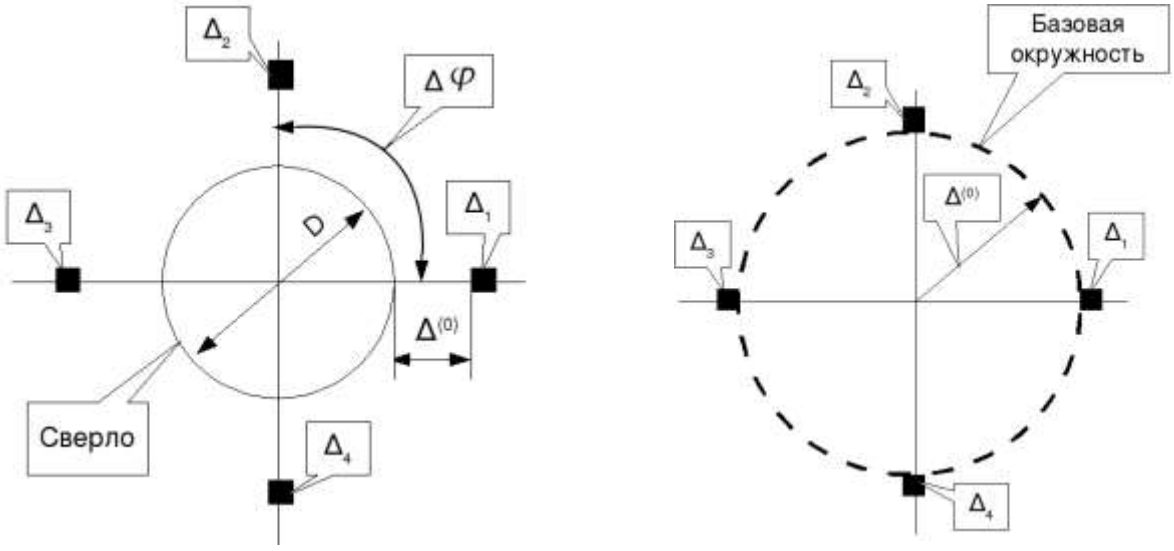
где M, H и C - матрицы размера 2×2; $Y = \|y_1(t), y_2(t)\|^T$ - вектор отклонений сверла в радиальных направлениях; $P_Y(Y, S_P, V_P) = \|P_{Y1\Sigma}(Y, S_P, V_P), P_{Y2\Sigma}(Y, S_P, V_P)\|^T$ - вектор-функций динамических характеристик; S_P - подача пиноли; V_P - скорость резания.

Известно, что решения системы (1) можно представить в фазовых плоскостях с координатами $(dy_i / dt; y_i)$, тогда рассекая траекторию изображающей точки Q секущей плоскостью Π_i, можно получить на Π_i проекции траектории точки Q, которые будут представлять собой преобразование А. Пуанкаре фазового портрета. Следует отметить, что плоскость Π_i может быть введена как угодно на фазовом портрете, главное, чтобы было выполнено требование трансверсальности плоскости Π_i к фазовой траектории. Для рассматриваемого случая, плоскость Π_i может быть введена одним из способов, показанных на рис.2.Следует обратить внимание на то, что в общем случае, период пересечения фазовой траектории плоскости Π_i может быть различным из-за наличия в решении системы (1) движений обусловленных многими факторами, поэтому использование преобразования Пуанкаре приводит к размыванию точки Пуанкаре на плоскости Π_i. Тем не менее, по своей сущности, функции вектора Y являются периодическими. Период данных функций определяется частотой вращения шпинделя ω_p. Таким образом, для анализа радиальных перемещений вершины сверла целесообразно использовать именно стробоскопическое преобразование А. Пуанкаре.

Рис. 2. Варианты введения плоскости Π_i на фазовом портрете $(dy_i / dt; y_i)$

Перед тем как перейти к рассмотрению расположения точек А. Пуанкаре на плоскостях, соответствующих различным видам отклонений сверла, остановимся, на некоторых важных моментах. Во-первых, период стробоскопического отображения А. Пуанкаре определяется частотой

вращения шпинделя ω_p, так как имеется четыре датчика (см. рис.1), то за один оборот сверла должно быть получено по одной точке от каждого датчика. Другими словами должно быть выполнено стробоскопическое преобразование А. Пуанкаре для каждого датчика, а в идеале для пары ортогонально расположенных датчиков. Так как датчики смещены относительно друг друга на угол $\Delta\varphi = \pi/2$ (рис. 3,а), то временные интервалы снятия данных с датчиков будут также смещены на $1/4$ периода оборота сверла. Также следует иметь в виду, что частота вращения шпинделя ω_p может иметь вариации $\pm\Delta\omega_p$, поэтому для адаптивной подстройки периода стробоскопического отображения А. Пуанкаре желательно использовать датчик угла поворота, а не формировать период, используя таймер. Во-вторых, так как диаметр сверла D не имеет значения для анализа отклонений его вершины, то целесообразно исключить диаметр D и рассматривать некоторую окружность с радиусом $\Delta^{(0)}$ (рис. 3,б), которую будем называть базовой. Если отклонения сверла отсутствуют, то все точки будут лежать на пересечении базовой окружности с осями каждого из направлений смещений Δ_i, в противном случае точки А. Пуанкаре будут находиться не на базовой окружности. Таким образом, базовая окружность является некоторым критерием, характеризующим отклонения вершины сверла в радиальном направлении. В-третьих, следует отметить, что радиальные смещения сверла рассматриваются в плоскости L датчиков, расположенной на расстоянии l_S от точки закрепления сверла (рис. 1). Так как рассматривается низкочастотная область колебаний инструмента, то деформационные смещения вершины сверла и деформационные смещения сверла в плоскости L можно связать через некоторый коэффициент.



а) б)

Рис. 3. Сверло с датчиками (а), базовая окружность (б)

Расположения точек отображения Пуанкаре на плоскостях для различных видов радиальных отклонений вершины сверла.

При силовом зашумлении процесса сверления, диагностирование радиальных отклонений вершины сверла с помощью стробоскопического преобразования А. Пуанкаре возможно только с использованием статистических оценок, например среднего значения μ_x и дисперсии σ_x^2 расположения точек на плоскостях А. Пуанкаре. Как известно данные характеристики определяются следующими выражениями [4]:

$$\mu_x = \frac{1}{m} \cdot \sum_{k=1}^{m} y_k \tag{2}$$

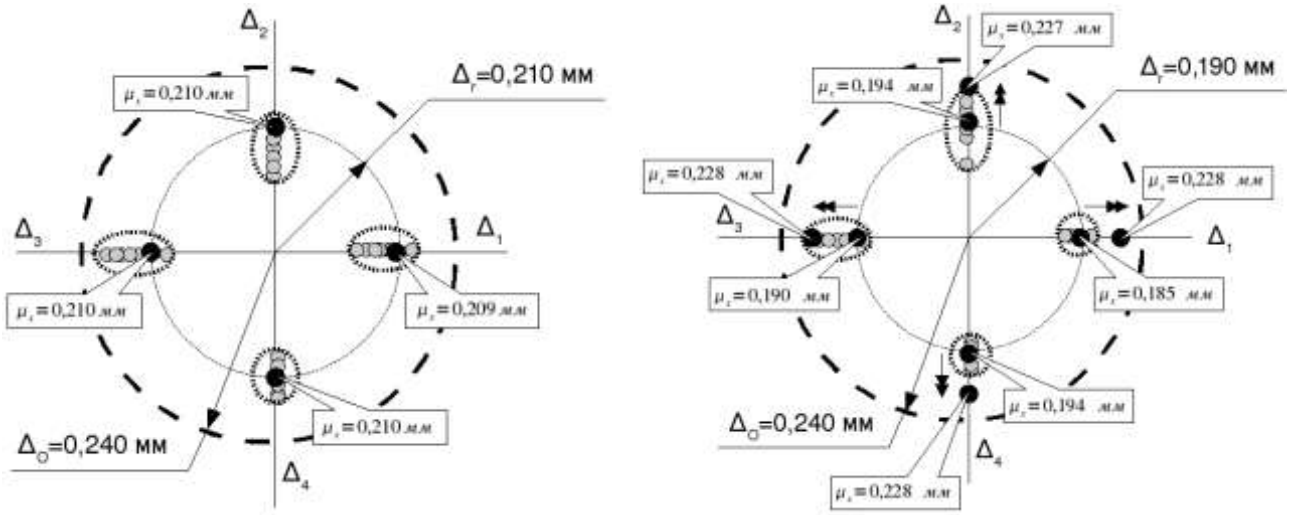
$$\sigma_x^2 = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{k=1}^{m} (y_k - \mu_x)^2 \tag{3}$$

где m - число реализаций скользящего среднего; y_k - k -е значение случайной величины отклонения вершины сверла в радиальном направлении.

Следует отметить. 1. Вычисление статистических величин μ_x и σ_x^2 необходимо выполнять по каждому направлению $\Delta_i \left(i = \overline{1,4}\right)$. 2. Требуется накопление некоторого количества исходных данных для выполнения достоверного статистического анализа $m_O = \min(m)$ обеспечивающего сходимость оценок μ_x и σ_x^2 к некоторому стационарному значению. На рис. 4 приведен пример зависимости сходимости μ_x от количества точек m. Как можно видеть минимальным количеством точек, обеспечивающим сходимость μ_x, является $m_O \approx 150$. 3. Вместо скользящего окна шириной в m_O точек, возможно усреднение по всему ансамблю наблюдаемых величин, то есть окно не смещается на одно точку, а постоянно расширяется, включая в себя новые точки. Именно такой подход был использован для оценки расположения точек на плоскостях А. Пуанкаре при наличии силового шума.

Рис. 4. Пример сходимости оценки μ_x в зависимости от величины выборки m (для случая убывающей разбивки отверстия по направлению Δ_1)

На рис. 5,а показано расположение точек и их средних значений μ_x (по каждому из направлений) для случая постоянной разбивки, а на рис. 5,б для случая убывающей разбивки по мере увеличения глубины засверливания сверла. В случае постоянной разбивки диаметра отверстия, в начале процесса диагностирования, при $m < m_O$, будет наблюдаться колебательный характер изменение величин μ_x вблизи не которого значения Δ_r (см. рис. 5,а), но при $m \to m_O$ колебания будут уменьшаться и когда $m \geq m_O$ точка, характеризующая μ_x, стабилизируется около некоторой величины Δ_r. Аналогичное движения точки μ_x будет наблюдаться и при изменяющейся, при заглублении сверла, разбивке. Например, при уменьшающейся разбивке, при увеличении заглубления сверла, точка характеризующая μ_x, будет монотонно двигаться в сторону базовой окружности (см. рис. 5,б). Следует обратить внимание, что в случае разбивки диаметра отверстия, точки могут располагаться за пределами базовой окружности, что в свою очередь зависит от направления вектора радиального отклонения вершины сверла Y в момент начала стробоскопического преобразования А. Пуанкаре.



а) б)

ис. 5. Пример расположения точек на плоскостях А. Пуанкаре и их средних значений μ_x (по i-м направлению): а) – постоянная разбивка; б) – уменьшающаяся разбивка по мере заглубления сверла

При уводе оси сверла будет иметь место монотонное нарастание вектора радиального отклонения вершины сверла Y, что приведет к тому, что сверло своей цилиндрической поверхностью будет приближаться к одним датчикам и отдаляться от других. Такое движение сверла будет иметь характерное движение среднего значения μ_x точек по соответствующим направлениям Δ_i (см. рис. 6). По одним направлениям μ_x будет двигаться от периферии окружности к её центру, по другим направлениям будет перемещаться от периферии окружности в стороны противоположные её центру.

Отметим, что по величинам смещений μ_x, которые обозначены на рис. 6 как $\Delta\mu_x$ возможно ориентировочно оценить величину смещения сверла по каждому из ортогональных направлений $\Delta_1 - \Delta_3$ и $\Delta_2 - \Delta_4$, а по направлениям движения точек – ориентировочное направление увода оси сверла. Действительное направление увода сверла противоположно направлению движения точек на плоскостях А. Пуанкаре (см. рис. 6). Выше описанный случай относится к отображению развитию увода на плоскостях А. Пуанкаре при сверлении без вращения заготовки.

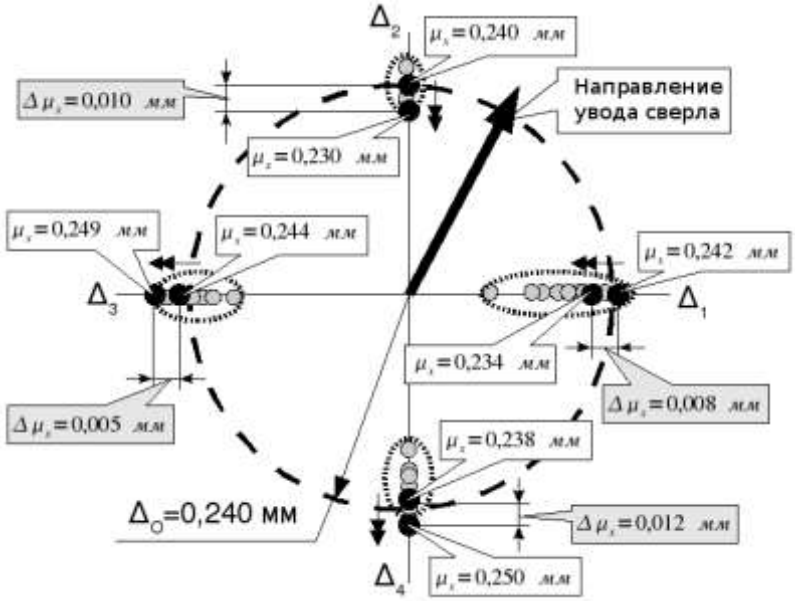


Рис. 6. Пример расположения точек на плоскостях А. Пуанкаре и их средних значений μ_x (по i-му направлению) для случая увода оси сверла при отсутствии вращения заготовки

По мере возможности, для уменьшения увода оси сверла применяют сверление с одновременным вращением шпинделя станка и заготовки, при этом $|\omega_3| < |\omega_p|$ (ω_3 - частота вращения заготовки). В этом случае вектор радиального отклонения вершины сверла Y, при развитии увода сверла, будет совершать вращение с частотой ω_3, а период стробоскопического отображения Пуанкаре будет, как и ранее, зависеть частоты вращения шпинделя ω_p. Это приведёт к тому, что точки на плоскостях А. Пуанкаре будут располагаться хаотически по каждому Δ_i направлению с μ_x лежащем на базовой окружности. В этом случае увод вершины сверла можно анализировать по величинам дисперсий σ_x^2 по каждому направлению. Следует отметить, что минимально необходимое количество точек m_O для данного случая сверления как правило в несколько раз больше, чем для ранее рассмотренных случаев. Однако в случае силовой зашумлённости, дисперсии σ_x^2 точек на плоскостях А. Пуанкаре, будут иметь место и в случае отсутствия каких-либо отклонений сверла. Дисперсии σ_x^2 в данном случае будут обусловлены силовым шумом. Тем не менее, величины дисперсий σ_x^2 вызванных уводом оси сверла при совместном вращении шпинделя

станка и заготовки будут выше чем, величины дисперсий σ_x^2 вызванных только лишь одним силовым шумом (рис.7).

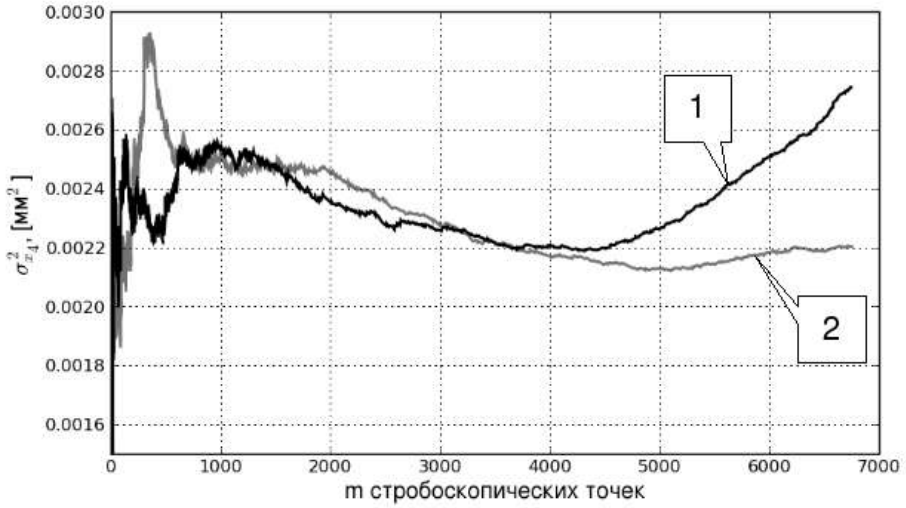


Рис. 7. Пример изменения дисперсии σ_x^2 точек на плоскостях А. Пуанкаре по направлению Δ_4 : 1 – увод оси сверла при совместном вращении шпинделя станка и заготовки; 2 – отсутствие каких-либо радиальных отклонений сверла

Выводы.

1) Расположение и движение стробоскопических точек на плоскостях А. Пуанкаре позволяет однозначно определить вид радиального отклонения сверла и его стробоскопическую оценку, а по скорости перемещения точек по плоскостям оценить интенсивность развития радиального отклонения сверла. Отметим, что для проведения данного анализа удобным является выполнять оценку расположения и движения точек относительно базовой окружности, которая в таком случае является некоторым отображением идеальной поверхности отверстия.

2) Использование даже таких несложных статистических оценок как среднее значение μ_x и дисперсия σ_x^2 случайного распределения точек на плоскостях А. Пуанкаре, обусловленного силовым шумом процесса сверления, обеспечивает достаточно приемлемую скорость сходимости последовательности для многих практических случаев, и тем самым позволяет использовать плоскость А. Пуанкаре для анализа радиальных отклонений сверла непосредственно во время процесса сверления, с целью организации адаптивного управления процессом и предотвращения или снижения геометрических погрешностей отверстия.

Благодарности и признательности

Основные результаты в статье получены при финансовой поддержке РФФИ по проекту № 14-08-00206_а

Библиографический список.

1. Заковоротный В.Л., Санкар Т.С., Бордачев Е.В. Система оптимального управления процессом глубокого сверления отверстий малого диаметра. СТИН. 1995. № 1. С. 12.

2. Заковоротный В.Л., Санкар Т., Бордачев Е.В. Система оптимального управления процессом глубокого сверления отверстий малого диаметра. СТИН. 1994. № 12. С. 22.

3. Заковоротный В.Л., Бордачев Е.В. Информационное обеспечение системы динамической диагностики износа режущего инструмента на примере токарной обработки. Проблемы машиностроения и надежности машин. 1995. № 3. С. 95.

4. Заковоротный В.Л., Бордачев Е.В. Прогнозирование и диагностика качества обрабатываемой детали на токарных станках с ЧПУ. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1996. № 1. С. 95.

5. Заковоротный В.Л., Панов Е.Ю., Потапенко П.Н. Свойства формообразующих движений при сверлении глубоких отверстий малого диаметра. Вестник Донского государственного технического университета. 2001. Т. 1. № 2. С. 81-93.

6. Троицкий Н.Д. Л. Глубокое сверление. «Машиностроение», 1971, 176 с.

7. Дичка Э.М. Сверление глубоких отверстий в сталях. – Мн.: Высш. школа, 1979. – 232 с.

8. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М., Физмат из, 1959, 916 с.

9. Заковоротный В.Л., Фам Динь Тунг, Нгуен Суан Тьем. Математическое моделирование и параметрическая идентификация динамических свойств подсистем инструмента и заготовки при точении. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2011. № 2. С. 38-46.

10. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Нгуен С.Т. Моделирование деформационных смещений инструмента относительно заготовки при точении . Вестник Донского государственного технического университета. 2010. Т. 10. № 7 (50). С. 1005-1015.

11. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. - М.: Мир, 1989. - 540 с.

УДК 621.91.01

Управление динамикой обработки на металлорежущих станках. Системный анализ и синтез.

*Заковоротный В.Л., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,*vzakovorotny@dstu.edu.ru,

Лукьянов А.Д., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, lex1998@rambler.ru

Аннотация. В статье выполнен аналитический обзор исследований системного синергетического анализа и синтеза управляемой динамической системой резания. Задача статьи в раскрытии состояния вопроса в этом динамично развивающемся направлении. Изложение материала сделано по возможности доступным, без обилия математических представлений. Для детального знакомства с этими направлениями сделаны подробные ссылки.

Ключевые слова: процесс резания на металлорежущих станках, системный синергетический подход

Abstract. An analytical overview of the research of the system synergistic analysis and synthesis of controlled dynamic system of cutting was made in the article. The goal of the article is to reveal the status of the question in this rapidly developing area. The material is made as accessible as possible, without an abundance of mathematical concepts. For detailed acquaintance with these directions made detailed references.

Keywords: cutting process, cutting tools, synergetic approach

Введение

Процесс обработки на металлорежущих станках определяет достаточно сложную управляемую систему, в которой имеют место взаимодействия через процесс обработки управляемых проводов движения исполнительных элементов станка, а также упругих подсистем со стороны режущего инструмента и обрабатываемой заготовки. При формообразовании детали из заготовки необходимо анализировать не только траектории движения исполнительных элементов станка, но и траектории упругих деформационных смещений инструмента относительно точки его закрепления на исполнительном элементе, а также траектории деформационных смещений обрабатываемой заготовки в точке или области контакта с ней инструмента. Таким образом, траектории формообразующих движений складываются из управляемых, например, от ЭВМ ЧПУ, траекторий движения исполнительных элементов станка и формируемых в результате взаимодействия инструмента и заготовки в процессе резания траекторий упругих деформационных смещений. Следовательно, свойства системы в целом отличаются от свойств изолированных подсистем, и, строго говоря, например, системы приводов исполнительных элементов, скалярные без резания, становятся системами связанного (векторного) управления в процессе обработки. Если принять во внимание, что на траектории формообразующих движений оказывают влияние и траектории упругих деформационных смещений, то важность анализа процесса обработки на станке, как единой

многосвязной системы управления становится очевидной. Системный подход опирается на сформированную в последние десятилетия синергетическую концепцию анализа и синтеза [1 - 6].

Синергетический подход к анализу и синтезу

Использование синергетической концепции для построения систем управления процессами обработки на станках рассмотрено в работах [7 - 11]. Принципиальным отличием синтеза управления от традиционного в этом случае является не принцип подчинения, который используется в настоящее время при управлении процессами обработки на станках, а принцип согласования. Согласно этому принципу управление (например, программа ЧПУ) строится на основе определения желаемого многообразия траекторий формообразующих движений инструмента относительно обрабатываемой заготовки и выбора на этом многообразии оптимальных траекторий, минимизирующих приведенные затраты на изготовление партии деталей. Для этого многообразия определяются траектории движения исполнительных элементов станка, а также управление (программа ЧПУ). Поэтому синергетический синтез опирается также на свойства преобразования траекторий движения исполнительных элементов в траектории формообразующих движений [12, 13]. В этом случае для определения упругих деформационных смещений рассматривается взаимодействие подсистем через процесс резания. Процесс резания представляется в виде модели сил в координатах состояния системы, которая фактически задает свойства динамической связи, формируемой процессом резания [14 - 16].Программа управления в этом случае определяется на основе решения обратной задачи динамики на основе определения управления, обеспечивающего желаемые траектории движения исполнительных элементов станка.

Все проектируемые траектории должны обладать важным свойством, они должны быть асимптотически устойчивыми, то есть характеризовать притягивающее множество. При этом анализ опирается на построение иерархии систем дифференциальных уравнений, основанной на асимптотических свойствах нелинейных дифференциальных уравнений, имеющих малые параметры при производных[7, 8, 17, 18]. Декомпозиция уравнений динамики имеет ясное физическое представление. Траектории «медленных» движений исполнительных элементов станка, частотные свойства которых ограничены полосой пропускания приводов движения исполнительных элементов, учитывают установившиеся упругие деформационные смещения и задают траекторию формообразующих движений. Эта траектория должна быть устойчивой. Для этого рассматривается также подсистема «быстрых» движений, уравнения которых характеризуют вариации упругих деформационных движений, которые рассматриваются в подвижной системе координат, задаваемой траекториями «медленных» движений.

Синергетический синтез и динамика процесса резания

Изучение свойств подсистемы «быстрых» движений фактически связаны с проблемой динамики процесса резания, которая являлась предметом исследований практически со времени создания металлорежущих станков. Частотный состав упругих деформационных смещений в этом случае лежит в диапазоне пропускания подсистем инструмента и обрабатываемой детали, то есть лежит в диапазоне (0,5 – 5,0) кГц. Здесь принципиальное значение имеет моделирование динамической связи, формируемой процессом резания. Эти модели зависят от рассматриваемого процесса (точение, фрезерование, обработка отверстий многолезвийным инструментом, например, сверлом).

Вначале проанализируем процесс точения. Здесь в процессе становления знаний о динамике процесса резания предложено четыре типа моделей. **Первый** рассматривает запаздывание вариаций сил резания в зависимости от изменения площади срезаемого инструментом слоя [20 - 25]. Причем, это запаздывание имеет двоякую природу. Во-первых, оно определяется переходными процессами установления новой поверхности скольжения в зоне стружкообразования, а также переходными процессами в области вторичной пластической деформации. Во-вторых, запаздывание определяется законами образования новой площади срезаемого слоя. Например, при точении с постоянной скоростью вращения заготовки запаздывание определяться временем оборота. Это регенеративное самовозбуждение системы [26, 27]. **Второй** учитывает гистерезисные свойства изменения сил в зависимости от направления деформационных смещений инструмента относительно заготовки [28]. **Третий** учитывает известное свойство зависимости сил от скорости в среднескоростном диапазоне (40 - 120) м/мин при обработке конструкционных материалов [29] . **Четвертый** тип моделей учитывает, что в системе всегда существуют периодические изменения параметров, например, равные или кратные частоте вращения заготовки [30 - 32]. В этом случае при анализе устойчивости используется теория Флоке и модифицированные уравнения типа уравнений Матье-Хила [33, 34].

Как показано нами в работах [35 - 37], при рассмотрении линеаризованного уравнения в вариациях относительно равновесия все эти способы моделирования приводят к трансформации суммарных матриц скоростных и упругих коэффициентов из симметричных в несимметричные. В результате симметричная составляющая матрицы скоростных коэффициентов может трансформироваться из положительно определенной в отрицательно определенную. Так как кососимметричная составляющая этой матрицы, формирующая гироскопические силы, не может стабилизировать равновесие [38 - 40], то преобразование симметричной составляющей матрицы скоростных коэффициентов из положительно определенной в отрицательно определенную характеризует главный механизм потери устойчивости. Система может потерять устойчивость и за счет циркуляционных сил, формируемых кососимметричной составляющей матрицы упругости. В этом случае колебания инструмента развиваются в форме прецессионных колебаний.

При потере устойчивости в окрестности равновесия системы формируются различные притягивающие множества (предельные циклы, инвариантные торы, хаотические аттракторы). Прежде всего, было отмечено, что в динамической системе резания, как правило, формируются автоколебания, то есть орбитально асимптотически устойчивые предельные циклы. В этом случае была использована известная модель Ван дер Поля [41]. В дальнейшем были выявлены условия образования и показано, что в динамической системе резания могут формироваться притягивающие множества типа инвариантных торов [36, 42] и хаотических аттракторов [37, 44 - 50]. Причем, формирование инвариантных торов является скорее исключением, чем правилом, так как они как правило, вырождаются в предельные циклы. Что касается хаотических аттракторов, то, во-первых, во всех рассмотренных случаях их формирование наблюдается через каскад удвоения периода колебаний, то есть по сценарию Feigenbaum M.J.[51]. Таким образом, динамическая система процесса точения может служить примером системы со сложной нелинейной динамикой.

Если рассматривать другие процессы обработки резанием, то сложность системы может существенно увеличиваться. Здесь, в ходе становления взглядов на динамику процесса резания необходимо отметить многочисленные исследования, посвященные процессу фрезерования [52 - 73]. Принципиальным отличием динамической системы процесса фрезерования от точения являются свойства стационарного состояния системы. Если при точении равновесие динамической системы определяется точкой, которая движется в пространстве состояния по траекториям, определяемым движением исполнительных элементов станка, то при фрезеровании существует замкнутая траектория, которая фактически характеризует стационарное состояние системы. Таким образом, точка, которая движется вдоль траектории, формируемой исполнительными движениями при точении, вырождается в замкнутую траекторию в случае фрезерования. Если систему координат, в которой рассматривать свойства подсистемы «быстрых» движений, выбрать с учетом не только перемещения центра вращения фрезы, но и угла его поворота, то свойства системы являются аналогичными со свойством точения с периодически изменяющейся толщиной и шириной срезаемого слоя.

Здесь принципиально рассмотреть два режима. **Первый режим** относительно медленных вращений шпинделя, в котором установлена фреза. В этом случае систему фрезерования можно считать замороженной. Динамическая связь, формируемая процессом резания, является нелинейной. Поэтому в пределах периода установившихся периодических деформационных смещений, определяемого периодом вариаций ширины и толщины срезаемого слоя, свойства системы фрезерования в вариациях изменяются. В тех случаях, когда на некоторых участках траектории система становится неустойчивой, то этот участок характеризует отталкивающее множество. Чередование устойчивых и неустойчивых участков, как правило, приводит к формированию детерминированного хаоса в деформационных смещениях инструмента относительно заготовки при

фрезеровании. **Второй режим** относится к случаю, когда частота периодических контактов зубьев приближается к одной из собственных частот подсистемы инструмента и (или) обрабатываемой детали. Здесь дополнительно к отмеченным особенностям необходимо считаться с параметрическими явлениями, например, с параметрическим самовозбуждением системы, вызывающими нелинейное взаимодействие нескольких осцилляторов. Здесь наблюдается эффекты синхронизации, асинхронного взаимодействия, а также образования хаотических аттракторов. Мы имеем дело со сложной динамикой, в которой заметны бифуркации гибели инвариантных торов и преобразование их в предельные циклы. Характерно, что по мере изменения частоты торы и предельные циклы чередуются с хаотическими аттракторами.

Отклонение управляемых траекторий за счет возмущений

Динамическая система резания является возмущенной. Главные возмущения связаны со следующими воздействиями, которые характерны для станков и зависят от их качества: кинематические возмущения со стороны приводов исполнительных элементов; радиальные биения шпинделя и заготовки, биения которой зависит от точности установки детали и свойств приспособлений; статистических свойств вариации припуска [74].Показано, что кинематические возмущения влияют не непосредственно на траектории формообразующих движений, а через механизмы вариаций площади срезаемого слоя и нелинейные преобразования динамической связью, формируемой процессом резания. В частности, преобразование скорости продольной подачи в силы резания фактически определяются оператором скользящего среднего, причем время усреднения зависит от периода вращения детали. Все возмущения представляются случайными последовательностями. Законы их преобразования предстоит еще раскрыть. Для осцилляторов Ван дер Поля и Дуффинга приведены модели оценивания статистических свойств при их возмущениях случайными гармоническими осцилляторами [75 - 77].

Эволюционные преобразования динамической системы

Уникальность динамической системы резания определяется свойством ее эволюционных преобразований. Внешнее проявление эволюционных преобразований хорошо известны и изучены экспериментально: это развитие износа инструмента, изменение точности и параметров микрорельефа в процессе обработки и др. Подчеркнем, что в данном случае под эволюцией понимается не изменение траекторий в связи с априорно заданными изменениями режимов или параметров взаимодействующих подсистем, а их изменение за счет процессов, протекающих в зоне резания и вызывающих изменения уравнений связи. Нами предложено эволюционные преобразования динамической системы резания моделировать в функции изменения мощности необратимых преобразований по совершенной работе в зоне резания. В связи с этим параметры в уравнениях динамики рассматриваются в виде интегральных операторов Вольтера второго рода

относительно траектории мощности необратимых преобразований по совершенной работе [7 – 9,78 - 80].Предложены методы анализа интегро-дифференциальных уравнений динамики системы резания на примере точения с учетом эволюционных изменений системы. Разработанные алгоритмы анализа, основанные на асимптотических методах нелинейной динамики, позволили на основе математического моделирования выяснить основные закономерности эволюционных преобразований в динамической системе резания, в том числе проанализировать бифуркации системы в ходе эволюции. В частности, показано, что эволюция системы резания зависит не только от технологических режимов и физико-механических свойств обрабатываемого материала, но и от динамических свойств взаимодействующих подсистем, геометрии инструмента и ядер интегральных операторов Вольтера. Показано, что за счет эволюции все известные в науке о резании металлов и технологии машиностроения параметры (износ инструмента, параметры точности, качества поверхности) эволюционируют к некоторому предельному множеству, которое и определяет координату переключения циклов обработки.

Проблемы динамического мониторинга

Вся идеология исследований основана на анализе управляемой динамической системы в целом с учетом ее эволюции. Поэтому все координаты состояния системы являются взаимосвязанными. Следовательно, существуют отображения параметров состояния процесса резания и качества изготовления деталей в некоторых измеримых координатах преобразующей системы станка. Системный подход открывает новое направление динамического мониторинга процессов обработки на металлорежущих станках [81 - 87]. В цитированных работах предложены информационные модели состояния процесса резания и режущих инструментов, которое оценивается интенсивностью изнашивания инструмента и величиной износа, а также поломкой и (или) выкашиванием режущих лезвий инструмента. Также предложены информационные модели для оценивания параметров точности и качества формируемой резанием поверхности. Построение моделей основано на байесовском распределении и построении в пространстве информационных признаков множеств, разделенных вероятностными гиперповерхностями, для целей классификации. Рассматривается также проблема анализа упругой системы станка как зашумленного информационного канала.

Заключение

Приведенный в обзоре анализ основан на исследованиях, в основном, выполненных в научной школе кафедры автоматизации производственных процессов Донского государственного университета. Системный подход к анализу и синтезу управляемого процесса обработки на металлорежущих станках позволил обнаружить многие свойства системы резания, практически не рассматриваемые в других исследованиях, например, свойства динамической самоорганизации в

ходе эволюции. Этот анализ открывает новое направление синергетического системного синтеза управления, основанного на согласовании внешнего управления с внутренним, формируемым представлением сил резания в координатах состояния системы с учетом траекторий движения исполнительных элементов станка и упругих деформационных смещений инструмента относительно обрабатываемой заготовки.

Библиографический список

1. Пригожин, И., Стенгерс, И. Порядок из хаоса: Пер. с англ. / Общ. ред. В. И. Аршинова, Ю. Л. Климонтовича и Ю. В. Сачкова. — М.: Прогресс, 1986. — 193 с.

2. Пригожин, И., Стенгерс, И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 312 с.

3. Хакен, Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. — М.: Мир, 1985. — 424 с.

4. Хакен, Г. Тайны природы. Синергетика: учение о взаимодействии. — М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. — 320 с.

5. Колесников, А.А. Синергетическая теория управления. — М.: Энергоатомиздат, 1994. — 344 с.

6. Синергетика и проблемы теории управления. / Под ред. А.А. Колесникова. — М.: Физматлит, 2004. — 504 с.

7. Заковоротный, В.Л. Динамика процесса резания. Синергетический подход. /В. Л. Заковоротный, М. Б. Флек //. — Ростов н/Д: Терра, 2006. — 880 с.

8. Заковоротный, В.Л., Лукьянов, А.Д., Нгуен, Д.- А., Фам, Д.- Т. Синергетический системный синтез управляемой динамики металлорежущих станков с учетом эволюции связей. — Ростов н/Д: изд-во ДГТУ, 2008. — 324 с.

9. Zakovorotny, V. L., Lukyanov, A.D. The Problems of Control of the Evolution of the Dynamic System Interacting with the Medium // Int. J. of Mechanical Engineering and Automation. — 2014. — Vol. 1, № 5. — P. 271 – 285.

10. Заковоротный В.Л., Флек М.Б., Фам Д.Т. Синергетическая концепция при построении систем управления точностью изготовления деталей сложной геометрической формы. Вестник Донского государственного технического университета. 2011. Т. 11. № 10 (61). С. 1785-1797.

11. Заковоротный В.Л., Лапшин В.П., Туркин И.А. Управление процессом сверления глубоких отверстий спиральными сверлами на основе синергетического подхода. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2014. № 3 (178). С. 33-41.

12. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т. Частотные свойства преобразования траекторий исполнительных элементов токарного станка в траектории формообразующих движений

инструмента относительно заготовки. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2011. № 5. С. 30-37.

13. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т. Особенности преобразования траекторий исполнительных элементов токарного станка в траектории формообразующих движений инструмента относительно заготовки. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2011. № 4. С. 69-75.

14. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Нгуен С.Т., Рыжкин М.Н. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (скоростная связь). Вестник Донского государственного технического университета. 2011. Т. 11. № 2 (53). С. 137-146.

15. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Нгуен С.Т., Рыжкин М.Н. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (позиционная связь).Вестник Донского государственного технического университета. 2011. Т. 11. № 3 (54). С. 301-311.

16. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Нгуен С.Т. Моделирование деформационных смещений инструмента относительно заготовки при точении. Вестник Донского государственного технического университета. 2010. Т. 10. № 7 (50). С. 1005-1015.

17. Понтрягин, Л.С. Избранные труды. Т.2— М., Наука, 1988. —576 с.

18. Тихонов, А.Н., Васильев, А.Б., Волосов, В.М. Дифференциальные уравнения, содержащие малый параметр// Труды международного симпозиума по нелинейным колебаниям. — Киев : Изд-во АН УССР, 1963. — С. 56 – 61.

19. Кудинов В.А. Динамика станков. — М.: Машиностроение, 1967. — 359 с.

20. Эльясберг, М.Е. Автоколебания металлорежущих станков: Теория и практика. — СПб.: ОКБС, 1993. — 182 с.

21. Тлустый И. Автоколебания в металлорежущих станках / Пер. с чешск. —М.: Машгиз, 1956. —395 с.

22. Tlusty, I., Polacek, M., Danek, O., Spacek, L. Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen. Veb Verlag Technik, Berlin, 1962. — 320 p.

23. Tobias, S. A. Machine Tool Vibrations. Blackie, London, 1965. — 350 p.

24. Вейц, В.Л., Васильков, Д.В. Задачи динамики, моделирования и обеспечения качества при механической обработке маложестких заготовок // СТИН. — 1999. —№ 6.— С. 9 – 13.

25. Заковоротный, В.Л., Фам Д.- Т., Нгуен С.- Т. Математическое моделирование и параметрическая идентификация динамических свойств подсистемы инструмента и заготовки. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. — 2011. — № 2. — С. 38 – 46.

26. Tobias, S.A., Fishwick W. Theory of regenerative machine tool chatter // The Engineer. —1958. — Vol. 205. — P. 199 – 203.

27. Merritt, H.E. Theory of self-excited machine tool chatter // ASME Journal of Engineering for Industry. — 1965. — Vol. 205, №11. — P. 447 – 454.

28. Соколовский, А.П. Вибрации при работе на металлорежущих станках / Исследование колебаний при резании металлов. — М.: Машгиз,1958. — С. 15 – 18.

29. Мурашкин, Л.С., Мурашкин, С.Л. Прикладная нелинейная механика станков. — Л.: Машиностроение, 1977. — 192 с.

30. Zakovorotnyi V.L., Lukyanov A.D. Parametric phenomena in processing control in machine-tools/ 6th International Scientific Conference “Applied Sciences and technologies in the United States and Europe: common challenges and scientific findings” 2014, p. 113-118.

31. Заковоротный В.Л., Фам Т.Х. Параметрическое самовозбуждение динамической системы резания. Вестник Донского государственного технического университета. 2013. Т. 13. № 5-6 (74). С. 97-103.

32. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Фам Т.Х. Параметрические явления при управлении процессами обработки на станках. Вестник Донского государственного технического университета. 2012. Т. 12. № 7 (68). С. 52-61.

33. Mathieu, E. "Memoire sur le mouvement vibratoire d'une membrane de forme elliptique," J. Math. Pure Appl. 13, (1868), pp 137-203.

34. Floquet, MG Equations differentielles lineaires a coefficients peridiques, Ann. Scientifiques de l'Ecole Normale Suprerieure 12, (1883), pp. 47-89.

35. Zakovorotny, V.L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools. Journal of Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. — 2015. —Vol. 10. — P. 102 – 116.

36. Заковоротный, В.Л., Фам, Д.- Т., Быкадор, В.С. Самоорганизация и бифуркации динамической системы обработки металлов резанием. // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. — 2014. —Т. 22, № 3. —С. 26 – 40.

37. Заковоротный, В.Л., Фам Д.- Т., Быкадор, В.С. Влияние изгибных деформаций инструмента на самоорганизацию и бифуркации динамической системы резания металлов.//Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. — 2014. — Т. 22, № 3. —С. 40 – 53.

38. Меркин Д.Р. Введение в теорию устойчивости движения. М.: «Наука», 1971, 495 с.

39. Лиходанов В.М. О влиянии структуры сил на устойчивость движения./ ПММ, 1974, т.38, с. 246 – 253.

40. Лиходанов В.М. О стабилизации потенциальных систем/ ПММ, 1975, т.39, с.53 – 56.

41. Van der Pol, F. & Strutt, MJO."On the stability of the solutions of Mathieusequation" Philos. Mag. J. Sci. 5, (1928), pp 18-38.

42. Заковоротный В.Л., Губанова А.А., Христофорова В.В. Бифуркации стационарных многообразий, формируемых в окрестности равновесия в динамической системе резания. Вестник Донского государственного технического университета. 2015. Т. 15. № 1 (80). С. 11-22.

43. Заковоротный В.Л., Губанова А.А., Христофорова В.В. Один случай формирования хаотических аттракторов в динамической системе резания. Вестник Донского государственного технического университета. 2015. Т. 15. № 2 (81). С. 11-21.

44. Litak G. Chaotic vibrations in a regenerative cutting process. Chaos, Solutions & Fractals (2002), pp 1531-1535.

45. Grabbed I. Chaotic dynamics of the cutting process. J Mach Tools Manufact (1988), pp 19-32.

46. Wiercigroch M. Chaotic vibrations of a simple model of the machine tool-cutting system. ASME J. Vibr. Acoust. (1997); 119: pp 468-75.

47. Wiercigroch M, Cheng AH-D. Chaotic and stochastic dynamics of orthogonal metal cutting. Chaos, Solitons & Fractals, (1997), 8: pp 715-26.

48. Zakovorotny V.L., Anh N.D., Tung P.D. Mathematical modeling and control of the evolution of dynamic systems interacting with medium. Vietnam Journal of Mechanics. 2011. T. 33. № 3, c. 148-161.

49. Zakovorotnyi V.L., Lukyanov A.D., Bykador V.S. Dynamic self-organization cutting process evolution. 6th International Conference on Mechanics and Materials in Design, M2D 2015, 2015, c. 119-134.

50. Заковоротный В.Л., Быкадор В.С. Влияние связи, формируемой процессом резания, на динамику системы. СТИН, 2015, №12, с. 18 – 24.

51. Feigenbaum M.J. Quantitative universality for a class of nonlinear transformations. J. Stat. Phys., (1978), v. 19, pp. 25 - 52.

52. Altintas, Y., Budak E. Analytical prediction of stability lobes in milling // Annals of the CIRP. — 1995. — Vol. 44, №1. — P. 357 – 362.

53. Tlusty, J., Ismail, F. Special aspects of chatter in milling // ASME Journal of Vibration, Stress, and Reliability in Design. — 1983. — Vol. 105, №1. — P. 24 – 32.

54. Minis, I., Yanushevsky, T. A new theoretical approach for the prediction of machine tool chatter in milling // Trans. ASME Journal of Engineering for Industry. — 1993. — Vol. 115, № 2. —P. 1 –8.

55. Insperger T., Stepan, G. Stability of the milling process // Periodical Polytechnic-Mechanical Engineering. — 2000. — Vol. 44, №1. — P. 47 – 57.

56. Budak, E., Altintas, Y. Analytical prediction of chatter stability in milling. Part I: General formulation // ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control. — 1998. — Vol. 120, № 6(1). — P. 22 – 30.

57. Budak, E., Altintas, Y. Analytical prediction of chatter stability conditions for multi-degree of systems in milling. Part II: Applications // ASME J. Dyn. Syst., Meas., Control. — 1998. — Vol. 120, № 6 (1) — P. 31 – 36.

58. Merdol, D., Altintas, Y. Multi-frequency solution of chatter stability for low immersion milling // ASME J. Manuf. Sci. Eng. — 2004. — Vol. 126, № 3. — P. 459 – 466.

59. Insperger, T., Mann, B., Stepan, Bayly, P.V. Stability of up-milling and down-milling. Part 1: Alternative analytical methods // Int. J. of Machine Tools and Manufacture. — 2003. — Vol. 43, № 1 — P. 25 – 34.

60. Kline, W.A., Devor, R. E., Shareef I. A. The prediction of surface accuracy in end milling // ASME J. Eng. Ind. — 1982. — Vol. 104, № 5. — P. 272 – 278.

61. Elbestawi, M. A., Sagherian, R. Dynamic modeling for the prediction of surface errors in milling of thin-walled sections // Theor. Comput. Fluid Dyn. — 1991. — Vol. 25, № 2 — P. 215 – 228.

62. Campomanes, M.L., Altintas, Y. An improved time domain simulation for dynamic milling at small radial immersions // Trans. ASME. J. of Manuf. Sci. and Eng. — 2003. — Vol. 125, №3. — P. 416 – 425.

63. Paris, H., Peigne, G., Mayer, R. Surface shape prediction in high-speed milling // Int. J. of Machine Tools and Manufacture. — 2004. — Vol. 44, №15. — P. 1567 – 1576.

64. Altintas, Y., Lee, P. A general mechanics and dynamics model for helical end mills // Annals of the CIRP. — 1996. — Vol. 45, № 1. — P. 59 – 64.

65. Ozturk, E., Budak, E. Modeling of 5-axis milling processes // Machining Science and Technology. — 2007. — Vol. 11, № 3. — P. 287 – 311.

66. Budak, E., Ozturk, E., Tunc, L.T. Modeling and simulation of 5-axis milling processes // Annals of CIRP. Manufacturing Technology. — 2009. — Vol. 58, № 1. — P. 347 – 350.

67. Bravo, U, Altuzarra, O, Lopez de Lacalle, L.N., Sanchez, J.A., Campa, F.J. Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine // Int. J. of Machine Tools and Manufacture. — 2005. — Vol. 45. — P. 1669 – 1680.

68. Weinert, K., Kersting, P., Surmann, T., Biermann D. Modeling regenerative workpiece vibrations in five-axis milling // Prod. Eng. Res. Devel. — 2008. — № 2. — P. 255 – 260.

69. Biermann, D., Kersting, P., Surmann, T. A general approach to simulating workpiece vibrations during five-axis milling of turbine blades // CIRP Annals. Manufacturing Technology. — 2010. — Vol. 59, № 1 — P. 125 – 128.

70. Воронов, С. А., Киселев, И.А., Аршинов, С.В. Методика применения численного моделирования динамики многокоординатного фрезерования сложнопрофильных деталей при проектировании технологического процесса // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер Машиностроение. — 2012. — Спец. Вып. № 6. — С. 50 – 69.

71. Воронов, С.А. Критерии оценки устойчивости процесса фрезерования нежестких деталей/ С.А. Воронов, А.В. Непочатов, И.А. Киселев // Изв. ВУЗов. Машиностроение. — 2011. — № 1 (610). — С. 50 – 62.

72. Voronov, S., Kiselev, I. Dynamics of flexible detail milling // Proc. of the Inst. of Mech. Eng. Part K: Journal of Multi-body Dynamics. — 2011. — Vol. 225, № 3. — P. 1177 – 1186.

73. Заковоротный В.Л., Губанова А.А., Лукьянов А.Д., Курская И.А. Анализ притягивающих множеств, формируемых в окрестности стационарных траекторий при фрезеровании концевыми фрезами. В сборнике: Системный синтез и прикладная синергетика Сборник научных трудов VII Всероссийской научной конференции. 2015. С. 167-184.

74. Заковоротный В.Л., Лукьянов В.Ф., Фам Д.Т., Фам Т.Х. Кинематические возмущения стационарных траекторий формообразующих движений в динамической системе резания. Вестник Донского государственного технического университета. 2011. Т. 11. № 9 (60). С. 1555-1563.

75. Anh N.D., Hieu N.N., Zakovorotny V.L., Diep D.V. A dual criterion of stochastic linearization method for multi-degree of freedoms subjected to random excitation. Acta Mechanica. 2012. Т. 223. № 12. С. 2667-2684.

76. Anh N.D., Zakovorotny V.L., Hao D.N. Van der Pol – Duffing oscillator under combined harmonic and random excitations. Vietnam Journal of Mechanics. 2014. Т. 36. № 3. С. 161-172.

77. Anh N.D., Zakovorotny V.L., Hao D.N. Response analysis of Van der Pol oscillator subjected to harmonic and random excitations. Probabilistic Engineering Mechanics. 2014. Т. 37. С. 51-59.

78. Заковоротный В.Л., Волошин Д.А Изучение эволюционных преобразований динамической системы резания. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2005. № S3. С. 11-23.

79. Заковоротный В.Л. Управляемая эволюция динамической системы, взаимодействующей со средой. Известия ЮФУ. Технические науки. 2006. № 6 (61). С. 84-103.

80. Заковоротный В.Л., Фам Динь Тунг. Перестройка динамической системы, взаимодействующей с процессом резания, в ходе ее эволюции. Известия ЮФУ. Технические науки. 2011. № 6 (119). С. 49-61.

81. Заковоротный В.Л., Ладник И.В. Построение информационной модели динамической системы металлорежущего станка для диагностики процесса обработки. Проблемы машиностроения и надежности машин. 1991. № 4. С. 75.

82. Заковоротный В.Л., Бордачев Е.В. Информационное обеспечение системы динамической диагностики износа режущего инструмента на примере токарной обработки. Проблемы машиностроения и надежности машин. 1995. № 3. С. 95.

83. Zakovorotny V.L., Ladnik I.V., Dhande S.G. A method for characterization of machine-tools dynamic parameters for diagnostic purpose. Journal of Materials Processing Technology. 1995. Т. 53. № 3-4. С. 588-600.

84. Заковоротный В.Л., Бордачев Е.В. Прогнозирование и диагностика качества обрабатываемой детали на токарных станках с ЧПУ. Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 1996. № 1. С. 95.

85. Заковоротный В.Л., Бордачев Е.В., Алексейчик М.И. Динамический мониторинг состояния процесса резания. СТИН. 1998. № 12. С. 6.

86. Заковоротный В.Л., Минаков В.С., Ханукаев М.М. Динамическая диагностика процесса обработки методами поверхностного пластического деформирования. Вестник Донского государственного технического университета. 2012. Т. 12. № 1-2 (62). С. 38-45.

87. Заковоротный В.Л., Ханукаев М.М. Виброакустическая диагностики процесса алмазного выглаживания. Вестник Донского государственного технического университета. 2013. Т. 13. № 3-4 (72-73). С. 33-40.

УДК 621.9:531.3

Параметрические явления в динамике процесса резания

*Заковоротный В.Л., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,*vzakovorotny@dstu.edu.ru,

Лукьянов А.Д., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, lex1998@rambler.ru

Лобов А.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Аннотация. В статье рассматривается проблема влияния периодически изменяющихся параметров в динамических моделях процесса резания на устойчивость равновесия. Анализируются факторы, вызывающие периодические изменения параметров. Они связаны с пространственной анизотропии свойств упругости в подсистеме обрабатываемой заготовки, с вариациями припуска по периметру вращения заготовки, с кинематическими возмущениями со стороны механической части приводов исполнительных элементов станка, с периодическими процессами в зоне резания. Приведена обобщенная динамическая модель системы с периодически изменяющимися параметрами. Выполнено изучение влияния периодически изменяющихся параметров на устойчивость траекторий. Раскрыты особенности потери устойчивости, специфические для динамических систем резания. В частности, показано, что за счет параметрических эффектов по мере увеличения скорости резания за счет возрастания частоты вращения шпинделя всегда существует критическая частота, при которой система теряет устойчивость.

Ключевые слова: процесс резания, устойчивость, динамика, параметрические явления.

Abstract. In the article the problem of influence of periodically varying parameters in dynamic models of the cutting process on the stability of equilibrium. Analyzes the factors that cause periodic changes of the parameters. They are associated with the spatial anisotropy of elastic properties in the subsystem of the workpiece, with variations in the seam allowance around the perimeter of the workpiece rotation, with a kinematic perturbations from the mechanical parts of the actuators of the machine, with periodic processes in the cutting zone. The generalized dynamic model of a system with periodically varying parameters. Conducted a study of the influence of the periodically changing parameters on the stability of the trajectories. The features of buckling, specific to dynamic systems of cutting. In particular, it is shown that due to the parametric effects of increasing cutting speed by increasing the rotational speed of the spindle there is always the critical frequency at which the system loses stability.

Keywords: the cutting process, stability, dynamics, parametric phenomena.

Постановка задачи

Проблема обеспечения устойчивости процесса резания является одной из важных при выборе технологических и конструктивных параметров взаимодействующих через процесс обработки подсистем инструмента и заготовки [1-3]. Существующие представления о потере устойчивости базируются на использовании математических моделей системы на основе их представления как линейной или нелинейных дифференциальных уравнений динамики. При этом анализируются различные притягивающие множества, которые образуются естественным образом в окрестностях равновесия системы [4 - 9]. Однако практика показывает, что существующие представления противоречат многим известным экспериментальным данным. Например, исходя из

существующих представлений, по мере увеличения скорости резания запас устойчивости в системе должен возрастать. Однако практика показывает, что это справедливо при относительно малых частотах вращения шпинделя. При увеличении частоты за некоторый порог всегда наблюдается увеличение вибраций, свидетельствующих о потере устойчивости траекторий. В настоящей статье, основываясь на известных представлениях о динамической системе резания, рассматривается практически не анализируемый ранее вопрос о самовозбуждении системы за счет периодического изменения параметров в математическом описании динамики системы.

Оснований для учета переменности параметров в динамической системе резания множество [10]. Во-первых, свойства упругости в подсистеме обрабатываемой детали не являются симметричными, и они зависят от угла поворота шпинделя. Это связано, по крайней мере, с изменениями радиальной жесткости детали, закрепленной, например, в трехкулачковом патроне. Во-вторых, при обработке заготовки, имеющей периодические изменения припуска, параметры динамической характеристики процесса резания также являются периодически изменяющимися. В-третьих, траектории исполнительных элементов станка всегда являются периодически изменяющимися за счет кинематических возмущений, зависящих от точности и конструктивных несовершенств механической части приводов. В-четвертых, при обработке большинства материалов имеет место периодическое изменение сопротивление резанию, связанное с периодическим формированием поверхности скольжения в области первичной пластической деформации. Наконец, многие технологические режимы принципиально имеют периодические изменения параметров, например, процесс фрезерования. Все перечисленные факторы вызывают, по крайней мере, периодические изменения суммарной жесткости в уравнениях взаимодействующих подсистем. В таких системах, как известно из теории колебаний, возможно параметрическое самовозбуждение системы, зависящее от частоты периодического изменения параметров [11].

Обобщенная математическая модель динамической системы резания, как системы с периодическими изменениями параметров.

Для изучения условий самовозбуждения динамической системы резания, параметры которой являются периодически изменяющимися функциями времени, необходимо рассмотреть обобщенную модель системы. Такая модель должна учитывать, с одной стороны, главные свойства системы. С другой, - она не должна быть излишне сложной. Ограничимся случаем, когда рассматриваются периодические изменения элементов матрицы жесткости. Кроме этого примем во внимание гипотезы, используемые ранее при анализе динамики системы с постоянными параметрами [12 - 14]. Они включают три положения: силы, формируемые в зоне резания пропорциональны площади срезаемого слоя; они имеют неизменную ориентацию в пространстве, задаваемую угловыми коэффициентами $\chi_i, i = 1,2,3$; модуль силы запаздывает по отношению к деформационными смещениями инструмента относительно заготовки. Таким требованиям

соответствует следующая модель, рассматривающая динамику системы в вариациях относительно точки равновесия,

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2y_1}{dt^2}+h_{1,1}\dfrac{dy_1}{dt}+h_{2,1}\dfrac{dy_2}{dt}+h_{3,1}\dfrac{dy_3}{dt}+ \\ +[c_{1,1}+\Delta_{1,1}\sin(\Omega_1 t)]y_1+[c_{1,2}+\Delta_{1,2}\sin(\Omega_1 t+\theta_{1,2})]y_2+ \\ +[c_{3,1}+\rho\chi_1 t_{p,0}(1+\mu\sin(\Omega_2 t))]y_3+\rho\chi_1 S_{p,0}z_1=0; \\ m\dfrac{d^2y_2}{dt^2}+h_{1,2}\dfrac{dy_1}{dt}+h_{2,2}\dfrac{dy_2}{dt}+h_{3,2}\dfrac{dy_2}{dt}+ \\ +[c_{1,2}+\Delta_{1,2}\sin(\Omega_1 t+\theta_{1,2})]y_1+[c_{2,2}+\Delta_{2,2}\sin(\Omega_1 t+\theta_{2,2})]y_2+ \\ +[c_{3,1}+\rho\chi_2 t_{p,0}(1+\mu\sin(\Omega_2 t))]y_3+\rho\chi_2 S_{p,0}z_1=0; \\ m\dfrac{d^2y_3}{dt^2}+h_{1,3}\dfrac{dy_1}{dt}+h_{2,3}\dfrac{dy_2}{dt}+h_{3,3}\dfrac{dy_3}{dt}+ \\ +c_{1,3}y_1+c_{2,3}y_2+[c_{3,3}+\rho\chi_3 t_{p,0}(1+\mu\sin(\Omega_2 t)]y_3+\rho\chi_3 S_{p,0}z_1=0; \\ T_1\dfrac{dz_1}{dt}+z_1=y_1, \end{cases} \quad (1)$$

где $y=\{y_1,y_2,y_3\}^T$ - вектор упругих деформационных смещений инструмента в пространстве;

ρ - давление стружки на переднюю поверхность инструмента, параметр, зависящий от физико-механических свойств обрабатываемого материала, геометрии инструмента и технологических режимов;

$S_{p,0}, t_{p,0}$ - соответственно величины подачи и глубины резания, не учитывающие упругие деформационные смещения;

$m=[m_{s,k}]; s,k=1,2,3; m_{s,k}=0, npu: s\neq k, h=[h_{s,k}]; s,k=1,2,3, c=[c_{s,k}]; s,k=1,2,3$ - соответственно матрицы инерционных, диссипативных и упругих коэффициентов (они являются симметричными и положительно определенными);

T_1 - постоянная времени, моделирующая запаздывание вариаций модуля силы резания по отношению к деформационному смещению y_1. Таким образом, при установившемся состоянии в точке равновесия $z_1=y_1=0$.

Кроме этого в (1) учитывается пространственная анизотропия упругости системы в виде матрицы

$$\Delta=\begin{bmatrix} \Delta_{1,1}\sin(\Omega_1 t) & \Delta_{2,1}\sin(\Omega_1 t+\theta_{2,1}) & 0 \\ \Delta_{1,2}\sin(\Omega_1 t+\theta_{1,2}) & \Delta_{2,2}\sin(\Omega_1 t+\theta_{2,2}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В (2) отсутствует переменная составляющая по направлению y_3, так как кинематические возмущения по направлению оси вращения шпинделя формируются на основе следующего

интегрального преобразования $y_3 = \int_{t-T}^{t} v_3(t)dt$ (здесь $v_3(t)$ - переменная составляющая скорости продольной подачи). Не трудно показать, что в $y_3(t)$ все переменные составляющие, равные или кратные периоду вращения шпинделя T равны нулю. К тому же в (1) учитывается переменные составляющие, обусловленные вариациями координаты суппорта в направлении, ортогональном к направлению его движения, а также вариации припуска, периодические с частотой вращения шпинделя

$$c_P(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \rho\chi_1 t_{p,0}(1+\mu\sin(\boldsymbol{\Omega}_2 t) \\ 0 & 0 & \rho\chi_2 t_{p,0}(1+\mu\sin(\boldsymbol{\Omega}_2 t) \\ 0 & 0 & \rho\chi_3 t_{p,0}(1+\mu\sin(\boldsymbol{\Omega}_2 t) \end{bmatrix}. \qquad (3)$$

В (1) частоты $\boldsymbol{\Omega}_1$ и $\boldsymbol{\Omega}_2$ равны или кратны частоте вращения шпинделя. Поэтому для анализа устойчивости системы (1) можно использовать теорию Флоке [4]. При изучении областей устойчивости использовался метод прямого цифрового интегрирования систем дифференциальных уравнений на основе использования метода Рунге-Кута 4-го порядка. Потеря устойчивости фиксировалась по траекториям решений дифференциальных уравнений.

Особенности параметрического самовозбуждения в динамической системе резания

Система (1) отличается от традиционно анализируемой системы следующими основными особенностями:

- в реальной динамической системе резания всегда имеет место изменение параметров, обусловленные различными перечисленными в постановке задачи причинами, поэтому, как правило, имеется несколько частотных составляющих изменения параметров, но все они кратны частоте вращения шпинделя;

- вариации сил запаздывают по отношению к изменениям упругих деформационных смещения, причем, запаздывание зависит, как от технологических режимов, так и от геометрии инструмента и физико-механических свойств обрабатываемого материала. Поэтому даже без параметрических эффектов система может потерять устойчивость. Периодические же изменения параметров, как правило, дополнительно способствуют потере устойчивости;

- упругие свойства подсистемы заготовки без процесса резания являются линейными и матрицы упругости являются симметричными и положительно определенными. Поэтому в пространстве для моделирования упругости можно на основе матрицы поворота выделить оси коллинеарного и ортогонального направлений, которые вращаются при повороте шпинделя при заданной анизотропии свойств упругости. Это обстоятельство может вызывать параметрическое самовозбуждение системы, которое дополняет условия самовозбуждения за счет влияния циркуляционных сил, формируемых динамической связью процесса обработки.

Для дальнейшего анализа приведем некоторые характерные примеры параметрического самовозбуждения системы. Для этого рассмотрим различные диаграммы параметрического самовозбуждения в плоскости $\eta = \omega/\omega_0 - \mu$. Здесь ω_0 - собственная частота основного колебательного контура системы, ω - частота параметрического возбуждения, μ - уровень параметрического возбуждения($\mu \le 1$).

Для более наглядного выяснения влияния различных особенностей системы на потерю устойчивости, вначале рассмотрим скалярный аналог системы (1). Проанализируем для этого случая влияние двухчастотного параметрического возбуждения для системы

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2y}{dt^2} + h\dfrac{dy}{dt} + c(1 + \mu_1 \sin\omega t + \mu_2 \sin 3\omega t)y = -c_P z; \\ T\dfrac{dz}{dt} + z = y, \end{cases} \qquad (4)$$

где m, h, c - соответственно масса, коэффициент демпфирования и жесткости подсистемы; c_P - жесткость процесса резания; T - постоянная времени стружкообразования.

Рассмотрим изменение области параметрического возбуждения системы на плоскости параметров (μ_1, η) при варьировании μ_2 от нуля до 0,8 и при заданных значениях параметров динамической системы $c_P = 500, кг/мм$, $T = 0{,}1мс$, $h = 0{,}10кгс/мм$. Соответствующие диаграммы параметрического возбуждения системы приведены на рис. 1. Приведенный пример вычислен для системы, имеющей собственную частоту консервативной системы $\omega_0 = 150{,}0c^{-1}$. Если рассматривать частоту вращения шпинделя равную 3000об/мин, то есть 50Гц, то вторая диаграмма уже находится в области параметрического самовозбуждения системы. Однако, если рассматривается скалярный случай, то параметрическое самовозбуждение системы наблюдается при высоких частотах вращения шпинделя, характерных лишь для скоростного резания. Ситуация принципиально меняется, если анализировать векторный случай пространственных колебательных смещений.

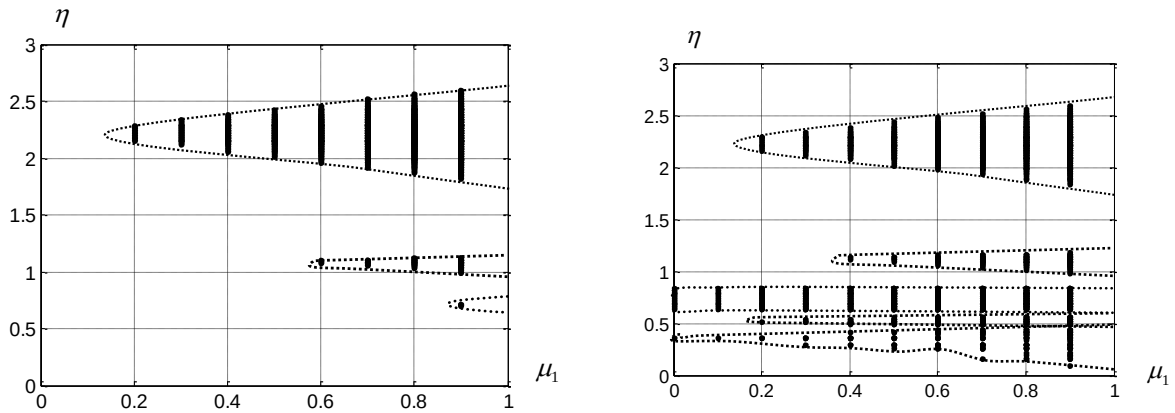


Рис 1. Пример изменения области параметрического возбуждения системы на плоскости параметров (μ_1, η) для случаев $\mu_2 = 0{,}0$ (левая диаграмма)и $\mu_2 = 0.8$ (правая диаграмма)

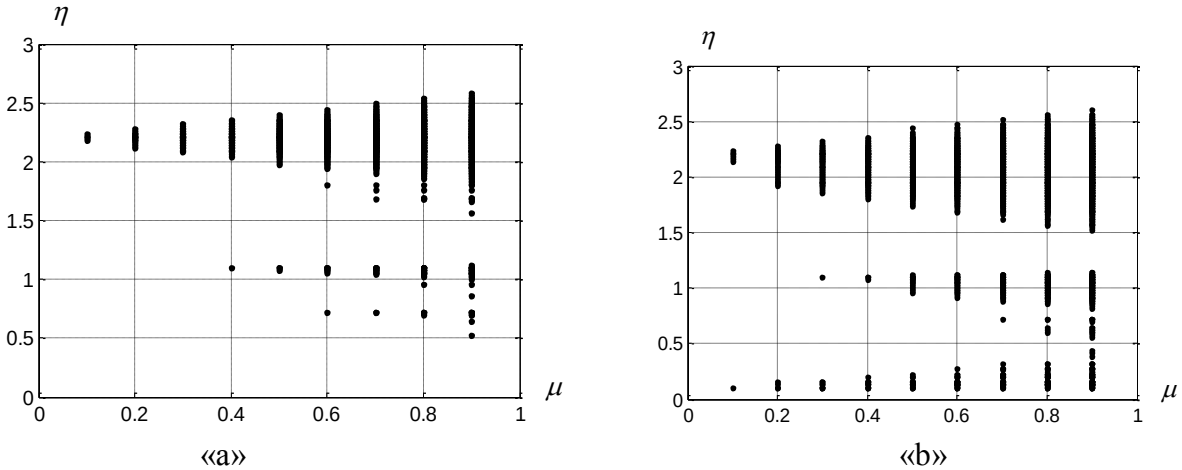
Приведем пример условий параметрического самовозбуждения системы для случая, когда деформационные смещения инструмента происходят в плоскости. Линеаризованное уравнение в вариациях для этого случая

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2y_1}{dt^2}+h\dfrac{dy_1}{dt}+c\cdot[1+\mu\sin(\omega t+\theta_{1,1})]y_1+\dfrac{1}{2}c\cdot\mu\sin(\omega t+\theta_{1,2})y_2=-\chi_1c_Pz_1; \\ m\dfrac{d^2y_2}{dt^2}+h\dfrac{dy_2}{dt}+\dfrac{1}{2}c\cdot\mu\sin(\omega t+\theta_{1,2})\cdot y_1+c\cdot[1+\mu\sin(\omega t+\theta_{2,2})]y_2=-\chi_2c_Pz_2; \\ T_1\dfrac{dz_1}{dt}+z_1=y_1; \\ T_2\dfrac{dz_2}{dt}+z_2=y_1, \end{cases} \qquad (5)$$

где $c_P=\rho S_P$.

В системе (5) дополнительно учитывается, что запаздывание сил по двум ортогональным направлениям отличаются. Обратим внимание на то, что в системе (5) имеет место вращение угла ориентации эллипса жесткости. Этот факт вызывает дополнительные условия параметрического самовозбуждения системы резания.

Рассмотрим конкретный пример (рис. 2).Исходные данные: матрица инерционных коэффициентов $m=5.63\cdot10^{-4},кГс^2/мм$; матрица диссипативных коэффициентов $h=0.1,кГс/мм$; матрица жесткости $c=2000,кГ/мм$; $c_P=500,кГ/мм$; первая собственная частота системы $\omega_0=150,Гц$; вектор коэффициентов ориентации сил $\chi=\{\chi_1,\chi_2\}^T=\{0.5,0.8\}^T$. Диаграмма построена по отношению к первой собственной частоте системы без резания. Угол ориентации эллипса жесткости рассматривается при $\mu=0$.



«a» «b»

Рис. 2.Изменение области параметрического возбуждения в плоскости (η,μ) при варьировании угла ориентации эллипса жесткости:

«a» - $\alpha=0^0$; «b» - $\alpha=45^0$.

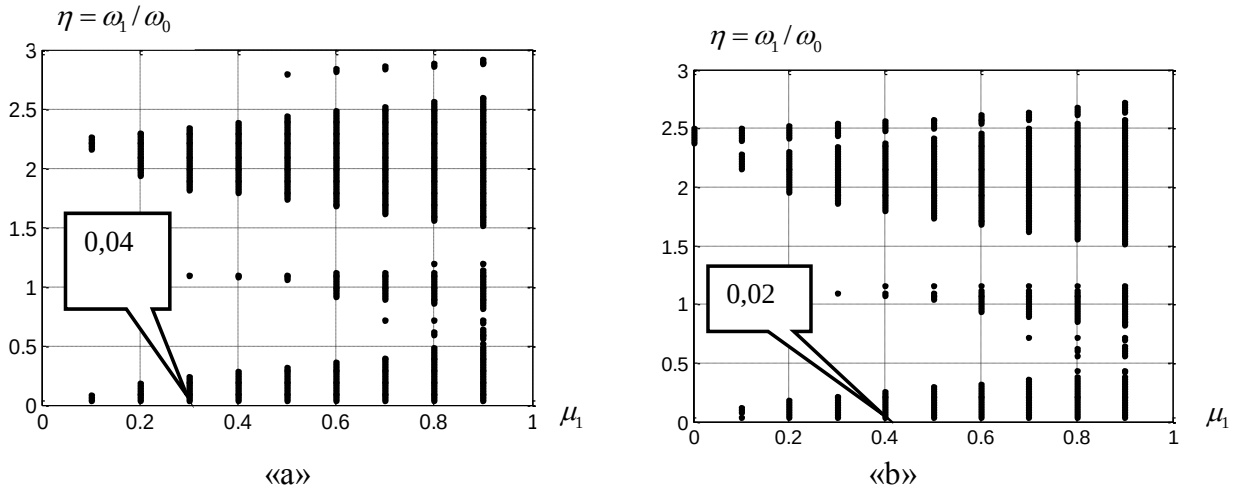
Здесь большое значение в механизме самовозбуждения имеют условия обмена силовыми потоками между подсистемами, рассматривающими колебательные смещения в двух ортогональных направлениях в плоскости, нормальной к оси вращения шпинделя. Приведенные данные показывают, что в рассматриваемой системе параметрическое самовозбуждение наблюдается уже при частотах вращения шпинделя, равных (400,0 – 500,0) об./мин. Более скрупулезный анализ показывает, что на условия самовозбуждения в этом случае оказывают влияние следующие факторы.

1). Известно [2], что за счет реакции со стороны процесса обработки суммарная матрица упругости становится несимметричной. Поэтому без параметрических эффектов ($\mu = 0$)в системе естественным образом формируются циркуляционные силы. В зависимости от направления действия циркуляционных сил (сил, ортогональных к направлению деформационных смещений) и направления вращения эллипса жесткости могут формироваться условия, способствующие самовозбуждению, или направленные на стабилизацию равновесия.

2). Рассматриваемая система имеет две резонансной частоты, которые разделены в частотной области антирезонансом. При сближении этих частот в системе формируются формы колебаний типа биений с частотой, равной разности резонансных частот. В результате может существенно снижаться частота вращения шпинделя, при которой наблюдается эффект параметрического самовозбуждения.

Аналогичный эффект наблюдается и в том случае, когда в динамической системе резания рассматривается влияние двух физических процессов, вызывающих изменения параметров. Как и ранее, рассмотрим пример (рис. 3). В этом примере в отличие от (5) матрица жесткости равна

$$c = c\begin{bmatrix} [1+\mu_1 \sin(\omega_1 t+\theta_{1,1})+\mu_2 \sin(\omega_2 t+\vartheta_{1,1})] & \frac{1}{2}[\mu_1 \sin(\omega_1 t+\theta_{2,1})+\mu_2 \sin(\omega_2 t+\vartheta_{1,2})] \\ \frac{1}{2}[\mu_1 \sin(\omega_1 t+\theta_{1,2})+\mu_2 \sin(\omega_2 t+\vartheta_{1,2})] & [1+\mu_1 \sin(\omega_1 t+\theta_{2,2})+\mu_2 \sin(\omega_2 t+\vartheta_{1,2})] \end{bmatrix}. \quad (6)$$



«a» «b»

Рис.3. Изменение области параметрического возбуждения в плоскости (η, μ_1) при варьировании частотного отношения $k_\omega = \dfrac{\omega_2}{\omega_1}$: «a» - $k_\omega = 0.2$; «b» - $k_\omega = 0.9$.

Здесь удобно ввести в рассмотрение коэффициент $k_\omega = \frac{\omega_2}{\omega_1}$, изменение которого определяет соотношение частот параметрического возбуждения. Приведенные на иллюстрации данные получены при $\mu_2 = 0.5$. На приведенных иллюстрациях не показана высокочастотная область, как менее интересная для рассматриваемой прикладной области.

Здесь также обнаруживается существенное снижение нижней частоты вращения шпинделя, при которой наблюдается параметрическое самовозбуждение системы, по мере сближения частот параметрического возбуждения. В реальной динамической системе резания, имеющей большее число степеней свободы и условий, вызывающих периодические изменения параметров, картина параметрического самовозбуждения существенно расширяется.

Заключение

Параметрические эффекты в динамической системе резания играют заметную роль в формировании области устойчивости траекторий формообразующих движений. Если следовать традиционному представлению о повышении устойчивости, то по мере увеличении скорости резания, связанной с возрастанием частоты вращения шпинделя, область устойчивости должна расширяться. На практике это не соответствует действительности. По мере увеличения частоты вращения шпинделя, начиная с некоторого ее критического значения, система вновь теряет устойчивость. Это обусловлено условиями параметрического самовозбуждения. Поэтому в зависимости от состояния станка, вызывающего кинематические возмущения траекторий, его конструктивных особенностей и пр. по мере увеличения скорости резания существует ограниченный частотный диапазон вращения шпинделя, при котором в низкочастотной области теряется устойчивость процесса резания за счет влияния, прежде всего, запаздывающих аргументов. В высокочастотной области устойчивость вновь теряется за счет параметрического самовозбуждения системы.

Литература

1. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. – 367 с.

2. Заковоротный В.Л., Флек М.Б. Динамика процесса резания. Синергетический подход. Ростов – на- Дону: «Терра»,2006. -876 с.

3. Заковоротный В.Л. Системный синергетический синтез управления динамикой металлорежущих станков с учетом эволюции связей. // Заковоротный В.Л., Лукьянов А.Д., Нгуен Донг Ань, Фам Динь Тунг. / Ростов – на – Дону: издательский центр ДГТУ, 2008. – 324 с.

4. Zakovorotny V. Bifurcations in the Dynamic System of the Mechanic processing in Metal-Cutting Tools. WSEAS. Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. 2015. T. 10. C. 102-116.

5. Заковоротный В.Л., Губанова А.А., Христофорова В.В. Бифуркации стационарных многообразий, формируемых в окрестности равновесия в динамической системе резания. Вестник Донского государственного технического университета. 2015. Т. 15. № 1 (80). С. 11-22.

6. Заковоротный В.Л., Губанова А.А., Христофорова В.В. Один случай формирования хаотических аттракторов в динамической системе резания. Вестник Донского государственного технического университета. 2015. Т. 15. № 2 (81). С. 11-21.

7. Заковоротный В.Л., Быкадор В.С. Влияние связи, формируемой процессом резания, на динамику системы. СТИН, 2015, №12, с. 18 -24.

8. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Быкадор В.С. Самоорганизация и бифуркации динамической системы обработки металлов резанием. Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22. № 3. С. 26-39.

9. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Быкадор В.С. Влияние изгибных деформаций инструмента на самоорганизацию и бифуркации динамической системы резания металлов. Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22. № 3. С. 40-54.

10. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Фам Т.Х. Параметрические явления при управлении процессами обработки на станках. Вестник Донского государственного технического университета. 2012. Т. 12. № 7 (68). С. 52-61.

11. Гартман Ф. Обыкновенные дифференциальные уравнения. М.: Мир, 1970. – 720 с.

12. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Нгуен С.Т., Рыжкин М.Н. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (скоростная связь). Вестник Донского государственного технического университета. 2011. Т. 11. № 2 (53). С.

13. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Нгуен С.Т., Рыжкин М.Н. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики (позиционная связь). Вестник Донского государственного технического университета. 2011. Т. 11. № 5. С. 30.

14. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Нгуен С.Т. Моделирование и идентификация инерционных и диссипативных свойств подсистемы инструмента и заготовки при точении. Вестник Донского государственного технического университета. 2010. Т. 10. № 8 (51). С. 1165-1178.

УДК 621.91.01

Математическое моделирование преобразования траекторий исполнительных элементов станка в траектории формообразующих движений

Бабенко Т.С., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,
Курская И.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Аннотация. Рассмотрены вопросы математического моделирования преобразования траекторий движения исполнительных элементов станка в траектории формообразующих движений вершины инструмента относительно обрабатываемой детали при точении с учетом упругих деформационных смещений. Получены зависимости позволяющие вычислить изменения деформационных смещений за счет перераспределения сил и упругих деформаций, влияющих на силы раскрытия основные закономерности преобразования.

Ключевые слова: процесс резания, траектории формообразующих движений, упругие деформации.

Abstract. The questions of mathematical modeling of the transformation of the trajectories of Executive machine elements in the trajectory movements of the tool tip relative to the workpiece in turning, taking into account the elastic deformation displacements. The dependences allowing to calculate the change in the deformation displacements due to the redistribution of forces and elastic deformations affecting the strength of the disclosure of the basic laws of conversion

Keywords: the cutting process, the trajectories of the movements, the elastic deformation

Введение.

В работе ставится задача изучения преобразования траекторий движения исполнительных элементов станка в траектории формообразующих движений вершины инструмента относительно обрабатываемой детали при точении. Изучение закономерностей этих преобразований определяется необходимостью использования синергетической концепции для построения программы ЧПУ станка. В отличие от традиционных принципов построения синергетическая концепция основана не на принципе подчинения траекторий формообразующих движений траекториям, представленным в программе ЧПУ в виде некоторого виртуального образа, а на принципе согласования. В этом случае траектории формообразующих движений согласовываются с траекториями движений исполнительных элементов, на основе знания которых определяется программа ЧПУ. В этом случае удается существенно повысить точность изготовления деталей, обладающих сложной геометрией, а также деталей, параметры жесткости которой изменяются вдоль траектории движения инструмента относительно обрабатываемой детали [1 - 6].

Математическое моделирование

Пусть заданы траектории движения исполнительных элементов (пространство $Z = \{Z_1, Z_2, Z_3\}^T \in Z$) (рис. 1).Введем в рассмотрение координаты деформационных смещений

вершины инструмента (пространство $X = \{X_1, X_2, X_3\}^T \in \mathrm{X}$) и детали в точке контакта с ней вершины инструмента (пространство $Y = \{Y_1, Y_2, Y_3\}^T \in \mathrm{Y}$). Заметим, что в традиционном конструктивном решении токарного станка перемещения по оси $Z_3 = 0$ отсутствуют. Однако деформационные смещения в этом направлении имеют место. На рис. 1 приведен пример программы ЧПУ обработки детали и введенные в рассмотрение траектории.

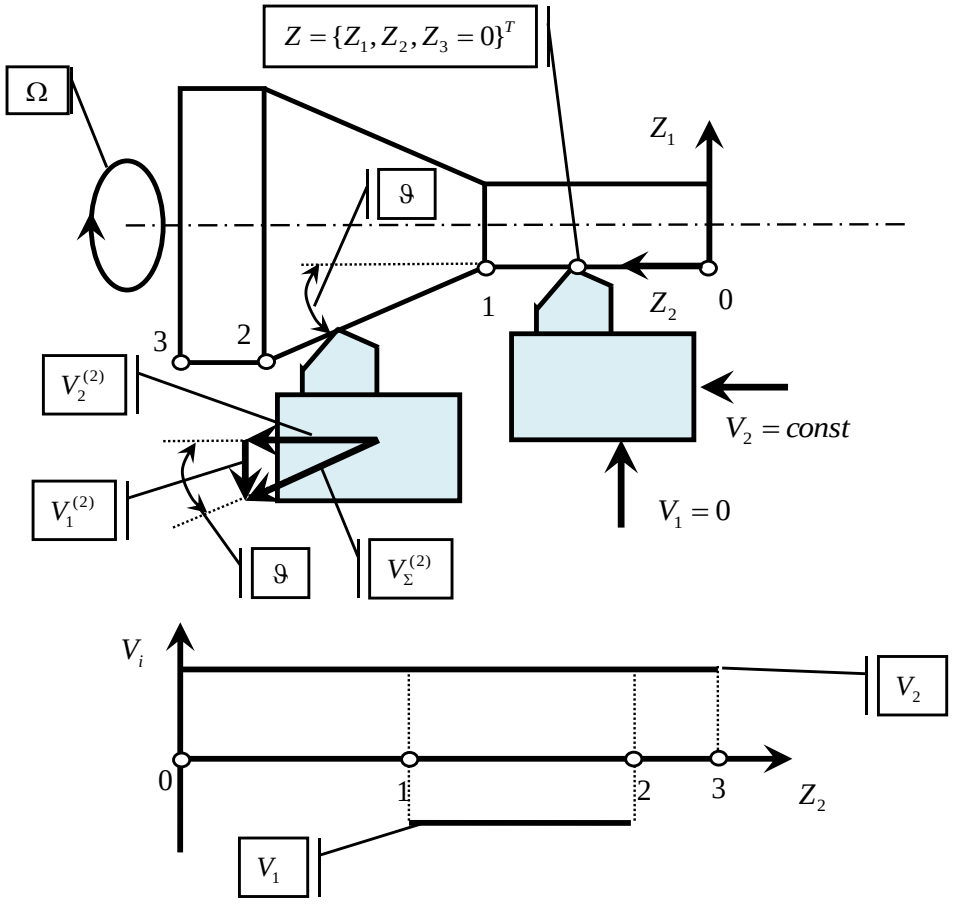


Рис. 1. Пример программы обработки типовой детали, программа ЧПУ которой строится по закону линейной интерполяции

Из приведенной иллюстрации ясно, что траектории формообразующих движений $Z^{(\Phi)}(t) = \{Z_1^{(\Phi)}(t), Z_2^{(\Phi)}(t), Z_3^{(\Phi)}(t)\}^T$ складываются из траекторий движения исполнительных элементов станка $Z = \{Z_1, Z_2, Z_3\}^T$ и траекторий упругих деформационных смещений вершины инструмента $X = \{X_1, X_2, X_3\}^T$, а также детали в точке контакта с ней вершины режущего инструмента $Y = \{Y_1, Y_2, Y_3\}^T$ (рис. 1). Таким образом,

$$Z^{(\Phi)}(t) = \{Z_1^{(\Phi)}(t), Z_2^{(\Phi)}(t), Z_3^{(\Phi)}(t)\}^T = \{Z_1, Z_2, Z_3\}^T - \{X_1, X_2, X_3\}^T - \{Y_1, Y_2, Y_3\}^T . \quad (1)$$

Как указано ранее $Z_3 = 0$, следовательно, траектории формообразующих движений в трех ортогональных направлениях связаны следующими соотношениями

$$\begin{aligned} Z_1^{(\Phi)}(t) &= Z_1(t) - X_1(t) - Y_1(t); \\ Z_2^{(\Phi)}(t) &= Z_2(t) - X_2(t) - Y_2(t); \\ Z_3^{(\Phi)}(t) &= -X_3(t) - Y_3(t). \end{aligned} \qquad (2)$$

Соответственно их скорости

$$\begin{aligned} V_1^{(\Phi)}(t) &= V_1 - dX_1(t)/dt - dY_1(t)/dt = V_1 - v_{x,1} - v_{y,1}; \\ V_2^{(\Phi)}(t) &= V_2 - dX_2(t)/dt - dY_2(t)/dt = V_2 - v_{x,2} - v_{y,2}; \\ V_3^{(\Phi)}(t) &= -\{dX_3(t)/dt + dY_3(t)/dt\} = -\{v_{x,3} + v_{y,3}\}. \end{aligned} \qquad (3)$$

Таким образом, в работе ставится задача изучения законов преобразования траекторий $Z = \{Z_1, Z_2, Z_3\}^T$ в $Z^{(\Phi)}(t) = \{Z_1^{(\Phi)}(t), Z_2^{(\Phi)}(t), Z_3^{(\Phi)}(t)\}^T$ при заданной динамической структуре станка.

Чтобы выяснить законы преобразования траекторий движения исполнительных элементов $Z = \{Z_1, Z_2, Z_3\}^T$ в траектории формообразующих движений $Z^{(\Phi)}(t) = \{Z_1^{(\Phi)}(t), Z_2^{(\Phi)}(t), Z_3^{(\Phi)}(t)\}^T$ необходимо вычислить деформационные смещения инструмента и детали в точке контакта с ней инструмента. В рамках настоящего исследования сделаем следующие допущения, которые фактически образуют систему гипотез, определяющую дальнейшее развитие представлений в данной работе [7 - 9] (рис. 2):

- модуль силы резания пропорционален площади срезаемого инструментом слоя обрабатываемой детали (рис. 2.3), то есть

$$F_0 = \rho S \quad , \qquad (4)$$

где S - площадь срезаемого слоя в $[мм^2]$, ρ -коэффициент, имеющий смысл давления стружки на переднюю поверхность инструмента в $[кг/мм^2]$;

- ориентация силы в пространстве при неизменных физико-механических свойствах обрабатываемой детали и геометрии инструмента остается неизменной и она задается угловыми коэффициентами $\chi = \{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$, то сеть

$$F = \{F_1, F_2, F_3\}^T = F_0\{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T \quad , \qquad (5)$$

причем, для угловых коэффициентов справедливо следующее условие нормировки

$$(\chi_1)^2 + (\chi_2)^2 + (\chi_3)^2 = 1, \qquad (6)$$

Заметим, что угловые коэффициенты при обработке на участках «0-1» и «1 - 2» отличаются, так как геометрия инструмента по отношению к образующей поверхности зависит от направления скорости подачи;

- площадь срезаемого слоя определяется произведением величины подачи на оборот S_P на величину глубины резания t_P, или произведением толщины срезаемого a слоя на его ширину b;

- деформации инструмента и детали существуют в пространстве, и связь между силами и деформационными смещениями инструмента и детали задается своими матрицами жесткости подсистемы инструмента и заготовки, то есть в общем виде

$$cX = F, \qquad (7)$$

где $X = \{X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_2, Y_3\}^T$ - вектор деформационных смещений вершины инструмента относительно суппорта и детали в точке контакта с ней вершины режущего инструмента;

$F = \{F_1, F_2, F_3, F_1, F_2, F_3\}^T$ - вектор сил, действующих на систему, таким образом, справедлива гипотеза о том, что силы, формируемые в зоне резания, действующие на инструмент и обрабатываемую деталь, равны между собой по модулю и направлению и они имеют противоположные направления;

$$c = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{2,1} & c_{3,1} & 0 & 0 & 0 \\ c_{1,2} & c_{2,2} & c_{3,2} & 0 & 0 & 0 \\ c_{1,3} & c_{2,3} & c_{3,3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{4,4} & c_{5,4} & c_{6,4} \\ 0 & 0 & 0 & c_{4,5} & c_{5,5} & c_{6,5} \\ 0 & 0 & 0 & c_{4,6} & c_{5,6} & c_{6,6} \end{bmatrix}$$ – матрица упругости подсистем инструмента и обрабатываемой детали в точке контакта с ней режущего инструмента. Коэффициенты $c_{s,k}$, $s,k = 1,2,3$ относятся к упругим свойствам инструмента, а коэффициенты $c_{s,k}$, $s,k = 4,5,6$ - к упругим свойствам обрабатываемой детали.

Без реакции со стороны процесса резания матрица c является симметричной и положительно определенной, то есть потенциальной. Методы определения и идентификации параметров матриц упругости подсистемы инструмента и заготовки хорошо известны и мы на них останавливаться не будем.

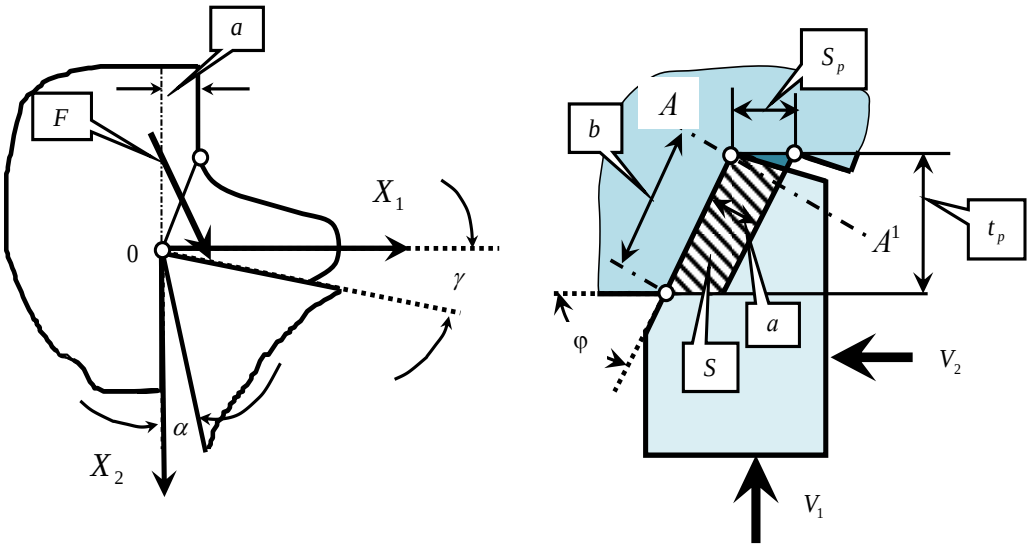


Рис. 2. Ориентация осей деформационных смещений и сил, действующих на переднюю грань режущего инструмента

Для выяснения преобразования $Z(t)$ в $Z^{(\Phi)}(t)$ воспользуемся синергетическим принципом анализа. Он включает в себя процедуру расширения размерности пространства состояния. Применительно к процессу резания он заключается в моделировании сил резания в координатах состояния системы. В нашем случае координатами состояния являются заданные программой ЧПУ координаты исполнительных элементов станка $Z(t)$, а также координаты упругих деформационных смещений $X(t)$ и $Y(t)$. Таким образом, для определения преобразования траекторий движения исполнительных элементов станка в траектории формообразующих движений фактически необходимо изучить свойства деформационных смещений. Рассмотрим эти свойства на участке обработки, параллельном оси вращения детали, то есть на участках «0-1» и «2-3» на рис.1. Это случай продольного точения. Пусть заданы траектории скоростей с учетом упругих деформационных смещений для случая продольного точения

$$V_1^{(\Phi)}(t) = -v_{x,1} - v_{y,1};$$
$$V_2^{(\Phi)}(t) = V_2 - v_{x,2} - v_{y,2};$$
$$V_3^{(\Phi)}(t) = -\{v_{x,3} + v_{y,3}\}. \qquad (8)$$

Рассмотрим выражение для площади срезаемого слоя в момент t. Вначале вычислим величину оборотной подачи, то есть путь, пройденный вершиной инструмента за время одного оборота $T = const$, то есть

$$S_P(t) = \int_{t-T}^{t} V_2^{(\Phi)}(t) = V_2 T - [X_2(t) - X_2(t-T) + Y_2(t) - Y_2(t-T)] \qquad (9)$$

где $V_2 T = S_P^{(0)}$ - величина подачи без учета упругих деформационных смещений. В (9) принято во внимание, что первообразной интеграла от скорости является перемещение. Вычислим также текущее значение глубины резания

$$t_P(t) = t_P(t-T) - \int_{t-T}^{t} V_1^{(\Phi)}(t)dt = t_P^{(0)} - [X_1(t) + Y_1(t)] \tag{10}$$

где $t_P^{(0)}$- глубина резания без учета упругих деформаций. Здесь принято во внимание, что $t_P(t-T) = t_P^{(0)} - X_1(t-T) - Y_1(t-T)$. Следовательно, модуль силы

$$\begin{aligned} F_0(t) = \rho[&S_P^{(0)} t_P^{(0)} + t_P^{(0)} X_2(t-T) + t_P^{(0)} Y_2(t-T) - \\ &- S_P^{(0)} X_1(t) - S_P^{(0)} Y_1(t) - t_P^{(0)} X_2(t) - t_P^{(0)} Y_2(t)] \end{aligned} \tag{11}$$

В (11) отброшены малые величины, определяемые произведениями малых деформационных смещений. Таким образом, с учетом (7), (10) и (11) имеем систему, для вычисления деформационных смещений вершины режущего инструмента и обрабатываемой детали в точке контакта с ней инструмента при условии, что деформационные смещения в момент $(t-T)$ заданы

$$c_\Sigma X = F^*, \tag{12}$$

где $F^*(t) = \rho[S_P^{(0)} t_P^{(0)} + t_P^{(0)} X_2(t-T) + t_P^{(0)} Y_2(t-T)]\{\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$;

$X = \{X_1, X_2, X_3, Y_1, Y_2, Y_3\}^T$;

$$c_\Sigma = \begin{bmatrix} c_{1,1} + \chi_1 \rho S_P^{(0)} & c_{2,1} + \chi_1 \rho t_P^{(0)} & c_{3,1} & \chi_1 \rho S_P^{(0)} & \chi_1 \rho t_P^{(0)} & 0 \\ c_{1,2} + \chi_2 \rho S_P^{(0)} & c_{2,2} + \chi_2 \rho t_P^{(0)} & c_{3,2} & \chi_2 \rho S_P^{(0)} & \chi_2 \rho t_P^{(0)} & 0 \\ c_{1,3} + \chi_3 \rho S_P^{(0)} & c_{2,3} + \chi_3 \rho t_P^{(0)} & c_{3,3} & \chi_3 \rho S_P^{(0)} & \chi_3 \rho t_P^{(0)} & 0 \\ \chi_1 \rho S_P^{(0)} & \chi_1 \rho t_P^{(0)} & 0 & c_{4,4} + \chi_1 \rho S_P^{(0)} & c_{5,4} + \chi_1 \rho t_P^{(0)} & c_{6,4} \\ \chi_2 \rho S_P^{(0)} & \chi_2 \rho t_P^{(0)} & 0 & c_{4,5} + \chi_2 \rho S_P^{(0)} & c_{5,5} + \chi_2 \rho t_P^{(0)} & c_{6,5} \\ \chi_3 \rho S_P^{(0)} & \chi_3 \rho t_P^{(0)} & 0 & c_{4,6} + \chi_3 \rho S_P^{(0)} & c_{5,6} + \chi_3 \rho t_P^{(0)} & c_{6,6} \end{bmatrix} -$$

- суммарная матрица жесткости системы с учетом упругой реакции со стороны процесса резания.

Анализ (12) позволяет сделать следующие наиболее важные заключения о формировании деформационных смещений и их связи с траекториями движения исполнительных элементов станка.

1. Матрица c_Σ, в отличие от c не является симметричной, то есть потенциальной. Поэтому ее можно представить в виде суммы симметричной и кососимметричной составляющих. Кососимметричная составляющая формирует силы не направленные в сторону равновесия системы и поэтому может вызывать отклонение координат состояния от точки равновесия. Более того симметричная ее составляющая может стать отрицательно определенной. Все зависит от параметров системы, как будет показано ниже, прежде всего, от коэффициентов ориентации сил $\{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}$.

Поэтому только за счет структуры матрицы c_Σ координаты состояния системы могут отходить от точки равновесия, причем, отходить неограниченно.

2. В принятой схематизации деформационные смещения в направлениях $\{X_3, Y_3\}$ и не вызывают изменения сил резания. Поэтому они могут не приниматься во внимание при анализе деформационных смещений в системе.

3. При неизменных технологических режимах и параметрах системы упругие деформационные смещения изменяются во времени. Это связано с тем, что F^* в (12) есть функция времени, которая определяет перераспределение сил, влияющих на деформационные смещения, и самих деформаций от которых зависят силы. Поэтому от оборота к обороту при вращении детали установление стационарного значения деформаций является функцией времени. Принимая во внимание отмеченный выше п.1, можно сделать вывод о возможности такой ситуации, при которой стационарного состояния в системе не существует.

Эволюция стационарного состояния деформационных смещений

Рассмотрим закономерности эволюции стационарного состояния в системе на наиболее важном примере. Примем во внимание п.2 в изложенных выше особенностях деформаций, вытекающих из (11). Кроме этого отметим, что параметры жесткости в направлении оси вращения заготовки на несколько порядков больше, чем в направлении, ортогональном оси вращения. К тому же учтем, что деформации в направлениях X_3 и Y_3 не влияют на силы и текущие значения диаметра обработки. Тогда в качестве вектора деформационных смещений необходимо рассматривать $X = \{X_1, X_2, Y_1\}^T$. Следовательно, суммарная матрица жесткости в (11) преобразуется к виду

$$c_\Sigma = \begin{bmatrix} c_{1,1} + \chi_1 \rho t_P & c_{2,1} + \chi_1 \rho S_P & \chi_1 \rho t_P \\ c_{1,2} + \chi_2 \rho t_P & c_{2,2} + \chi_2 \rho S_P & \chi_2 \rho t_P \\ \chi_1 \rho t_P & \chi_1 \rho S_P & c + \chi_1 \rho t_P \end{bmatrix}. \qquad (13)$$

а правая часть в системе (11) будет

$$F = \rho t_P [S_P + X_2 (t - T)] \{\chi_1, \chi_2, \chi_1\}^T \ . \qquad (14)$$

Для нас главное значение имеет суммарная деформация инструмента и обрабатываемой детали в направлении, нормальном к оси вращения детали, то есть $X_1 + Y_1$. Деформация инструмента определяется

$$X_1 = \frac{\Delta X_1}{\Delta}, \qquad (15)$$

где

$$\Delta_{X_1} = \rho t_P [S_P + X_2 (t - T)] \begin{bmatrix} \chi_1 & c_{2,1} + \chi_1 \rho S_P & \chi_1 \rho t_P \\ \chi_2 & c_{2,2} + \chi_2 \rho S_P & \chi_2 \rho t_P \\ \chi_1 & \chi_1 \rho S_P & c + \chi_1 \rho t_P \end{bmatrix}; \quad \Delta = \begin{bmatrix} c_{1,1} + \chi_1 \rho t_P & c_{2,1} + \chi_1 \rho S_P & \chi_1 \rho t_P \\ c_{1,2} + \chi_2 \rho t_P & c_{2,2} + \chi_2 \rho S_P & \chi_2 \rho t_P \\ \chi_1 \rho t_P & \chi_1 \rho S_P & c + \chi_1 \rho t_P \end{bmatrix}.$$

Деформация заготовки определяется

$$Y_1 = \frac{\Delta Y}{\Delta}, \qquad (16)$$

где $\Delta_Y = \rho t_P [S_P + X_2(t-T)] \begin{bmatrix} c_{1,1} + \chi_1 \rho t_P & c_{2,1} + \chi_1 \rho S_P & \chi_1 \\ c_{1,2} + \chi_2 \rho t_P & c_{2,2} + \chi_2 \rho S_P & \chi_2 \\ \chi_1 \rho t_P & \chi_1 \rho S_P & \chi_1 \end{bmatrix}$.

Таким образом, суммарная деформация инструмента относительно детали ΔR равна

$$\Delta R = X_1 + Y_1 =$$

$$= \frac{\rho t_P [S_P + X_2(t-T)]}{\begin{bmatrix} c_{1,1} + \chi_1 \rho t_P & c_{2,1} + \chi_1 \rho S_P & \chi_1 \rho t_P \\ c_{1,2} + \chi_2 \rho t_P & c_{2,2} + \chi_2 \rho S_P & \chi_2 \rho t_P \\ \chi_1 \rho t_P & \chi_1 \rho S_P & c + \chi_1 \rho t_P \end{bmatrix}} \left\{ \begin{bmatrix} \chi_1 & c_{2,1} + \chi_1 \rho S_P & \chi_1 \rho t_P \\ \chi_2 & c_{2,2} + \chi_2 \rho S_P & \chi_2 \rho t_P \\ \chi_1 & \chi_1 \rho S_P & c + \chi_1 \rho t_P \end{bmatrix} + \right.$$

$$\left. + \begin{bmatrix} c_{1,1} + \chi_1 \rho t_P & c_{2,1} + \chi_1 \rho S_P & \chi_1 \\ c_{1,2} + \chi_2 \rho t_P & c_{2,2} + \chi_2 \rho S_P & \chi_2 \\ \chi_1 \rho t_P & \chi_1 \rho S_P & \chi_1 \end{bmatrix} \right\}$$

(17)

Суммарная деформация фактически характеризует приращение текущего значения диаметра обрабатываемой детали ΔR от заданного по установке инструмента без процесса резания. Для определения эволюции деформационных смещений рассмотрим изменение X_1, X_2, Y_1 при постоянном значении скорости продольной подачи инструмента и неизменных параметрах системы.

В этом случае в (15) $A = \dfrac{\begin{bmatrix} \chi_1 & c_{2,1} + \chi_1 \rho S_P & \chi_1 \rho t_P \\ \chi_2 & c_{2,2} + \chi_2 \rho S_P & \chi_2 \rho t_P \\ \chi_1 & \chi_1 \rho S_P & c + \chi_1 \rho t_P \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} c_{1,1} + \chi_1 \rho t_P & c_{2,1} + \chi_1 \rho S_P & \chi_1 \rho t_P \\ c_{1,2} + \chi_2 \rho t_P & c_{2,2} + \chi_2 \rho S_P & \chi_2 \rho t_P \\ \chi_1 \rho t_P & \chi_1 \rho S_P & c + \chi_1 \rho t_P \end{bmatrix}} = const$. Следовательно,

$$X_1 = \rho t_P A [S_P + X_2(t-T)]. \qquad (18)$$

Определим также деформационное смещение в направлении скорости подачи

$$X_2 = \rho t_P B [S_P + X_2(t-T)], \qquad (19)$$

$$B = \frac{\begin{bmatrix} c_{1,1}+\chi_1\rho t_P & \chi_1 & \chi_1\rho t_P \\ c_{1,2}+\chi_2\rho t_P & \chi_2 & \chi_2\rho t_P \\ \chi_1\rho t_P & \chi_1 & c+\chi_1\rho t_P \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} c_{1,1}+\chi_1\rho t_P & c_{2,1}+\chi_1\rho S_P & \chi_1\rho t_P \\ c_{1,2}+\chi_2\rho t_P & c_{2,2}+\chi_2\rho S_P & \chi_2\rho t_P \\ \chi_1\rho t_P & \chi_1\rho S_P & c+\chi_1\rho t_P \end{bmatrix}} = const$$

где .

Наконец, деформационные смещения обрабатываемой детали в направлении, нормальном к образующей формируемой поверхности

$$Y_1 = \rho t_P C[S_P + X_2(t-T)], \qquad (20)$$

$$C = \frac{\begin{bmatrix} c_{1,1}+\chi_1\rho t_P & c_{2,1}+\chi_1\rho S_P & \chi_1 \\ c_{1,2}+\chi_2\rho t_P & c_{2,2}+\chi_2\rho S_P & \chi_2 \\ \chi_1\rho t_P & \chi_1\rho S_P & \chi_1 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} c_{1,1}+\chi_1\rho t_P & c_{2,1}+\chi_1\rho S_P & \chi_1\rho t_P \\ c_{1,2}+\chi_2\rho t_P & c_{2,2}+\chi_2\rho S_P & \chi_2\rho t_P \\ \chi_1\rho t_P & \chi_1\rho S_P & c+\chi_1\rho t_P \end{bmatrix}} = const$$

где

Следовательно,

$$\begin{cases} X_1 = \dfrac{A}{B} X_2; \\ Y_1 = \dfrac{C}{B} X_2; \\ \Delta R = \dfrac{A+C}{B} X_2. \end{cases} \qquad (21)$$

Поэтому главное значение имеет эволюция упругого деформационного смещения X_2. Рассмотрим эволюцию деформационных смещений при врезании инструмента. Деформационные смещения будем определять на каждом обороте $N = 0,1,2,...K...$. На первом обороте

$$X_2(1) = \rho t_P B S_P;$$

на втором обороте

$$X_2(2) = \rho t_P B[S_P + \rho t_P B S_P] = \rho t_P B S_P (1 + \rho t_P B);$$

на третьем обороте

$$X_2(3) = \rho t_P B S_P [1 + (\rho t_P B) + (\rho t_P B)^2].$$

Переходя от $(K-1)$-го оборота к K - мы, получаем

$$X_2(K) = \rho t_P B S_P \sum_{i=0}^{i=k} (\rho t_P B)^i. \qquad (22)$$

Выражение (22) представляет геометрическую прогрессию. Поэтому можно определить сумму (22)

$$X_2(i) = \rho t_P B S_P \frac{(\rho t_P B)^i - 1}{\rho t_P B - 1}. \qquad (23)$$

Полученное выражение (23) позволяет, не только легко вычислить деформации инструмента на каждом обороте детали, но и определить асимптоту, к которой стремится упругая деформация инструмента. Для этого положим в (23) $i \to \infty$. Тогда получаем

$$X_2(\infty) = \rho t_P B S_P \frac{-1}{\rho t_P B - 1}. \qquad (24)$$

Полученные выражения также позволяют определить условия, при которых последовательности деформационных смещений инструмента относительно заготовки сходятся

$$|\rho t_P B| \langle 1. \qquad (25)$$

Если условие (25) не выполняется, то точка стационарного состояния деформационных смещений инструмента относительно детали не существует. В этом случае деформационные смещения представляют расходящуюся последовательность, то есть равновесие деформационных смещений является неустойчивым. Это следует также из изложенных ранее свойств матрицы c_Σ .

Полученные выражения позволяют вычислить последовательности, которые характеризуют приращение диаметра обрабатываемой детали от оборота к обороту. Здесь справедливо соотношение

$$\Delta R(i) = \rho t_P S_P (A + C) \frac{(\rho t_P B)^i - 1}{\rho t_P B - 1}, \qquad (26)$$

а также точка, к которой асимптотически приближаются значения радиуса обрабатываемой детали

$$\Delta R(\infty) = \frac{\rho t_P S_P (A + C)}{1 - \rho t_P B}. \qquad (27)$$

Заключение.

Выполненный анализ позволяет выяснить условия сходимости последовательности, определяемой изменение диаметра обработки от оборота к обороту. Параметр $\rho t_P B$, определяющий сходимость последовательности и его скорость, является, как это очевидно, безразмерным. Здесь B характеризует податливость всей системы в направлении подачи с учетом упругих свойств инструмента и детали, а также параметров процесса резания и геометрии инструмента. Геометрия инструмента, как уже отмечено, определяет угловые коэффициенты χ_1 и χ_2. Параметр ρt_P характеризует жесткость процесса резания по модулю. Очевидно, если податливость всей системы резания B в направлении подачи стремится к нулю, то стационарное состояние устанавливается уже

после первого оборота детали. При уменьшении суммарной податливости B и одновременном увеличении глубины резания и давления стружки на переднюю поверхность инструмента время установления стационарного состояния возрастает, и при условии $\rho t_p B \geq 1$в системе резания не существует устойчивой точки равновесия упругих деформационных смещений. Это случай так называемого подрыва режущего инструмента. Таким образом, как условия сходимости, так и его скорость, определяющая время установления стационарного состояния, зависят от матриц жесткости подсистемы инструмента, его геометрии и физико-механических свойств обрабатываемого материала.

Библиографический список

1.Синергетика и проблемы теории управления. / Под ред. А.А. Колесникова. – Физматлит, 2004. – 504 с.

3. Заковоротный В.Л., Лукьянов А.Д., Нгуен Д.А., Фам Д.Т. Синергетический системный синтез управляемой динамики металлорежущих станков с учетом эволюции связей. Монография / В. Л. Заковоротный [и др.] . Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение Высш. проф. образования Донской гос. технический ун-т. Ростов-на-Дону, 2008.

4. Заковоротный В.Л., Флек М.Б., Фам Д.Т. Синергетическая концепция при построении систем управления точностью изготовления деталей сложной геометрической формы. Вестник Донского государственного технического университета. 2011. Т. 11. № 10 (61). С. 1785-1797.

5. Заковоротный В.Л., Лапшин В.П., Туркин И.А. Управление процессом сверления глубоких отверстий спиральными сверлами на основе синергетического подхода. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2014. № 3 (178). С. 33-41.

6. Заковоротный В.Л., Санкар Т., Бордачев Е.В. Система оптимального управления процессом глубокого сверления отверстий малого диаметра. СТИН. 1994. № 12. С. 22.

7. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Нгуен С.Т. Моделирование деформационных смещений инструмента относительно заготовки при точении. Вестник Донского государственного технического университета. 2010. Т. 10. № 7 (50). С. 1005-1015.

8. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Нгуен С.Т., Рыжкин М.Н. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (позиционная связь).Вестник Донского государственного технического университета. 2011. Т. 11. № 3 (54). С. 301-311.

9. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Нгуен С.Т., Рыжкин М.Н. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (скоростная связь). Вестник Донского государственного технического университета. 2011. Т. 11. № 2 (53). С. 137-146.

УДК 621.9.06

Оценивание состояния режущих поверхностей поликристаллических алмазных инструментов по сигналу виброакустической эмиссии

Заковоротный В.Л., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Бобрешов Р.И., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Аннотация. В статье излагается методика анализа распределения кристаллов алмазов на режущей поверхности поликристаллических алмазных инструментов при обработке хрупких труднообрабатываемых материалов. В основе методики лежит анализ спектральных характеристик сигнала виброакустической эмиссии процесса резания. Для этого рассматривается динамическая модель формирования сигнала, включающая два этапа. На первом этапе рассматривается модель случайной силовой последовательности, параметры которой зависят от распределения кристаллов алмазов на поверхности инструмента. На втором – анализируются свойства механической системы как канала по которому передается информация о статистических свойствах силовой последовательности. Результаты исследования применяются для диагностирования обрабатываемости поликристаллическими алмазными инструментами непосредственно в процессе обработки ситаллов.

Ключевые слова: поликристаллический алмазный инструмент, распределение кристаллов алмазов на поверхности инструмента, диагностика, случайная импульсная последовательность.

Abstract. The article describes the method of analysis of distribution of diamond crystals on the cutting surface of polycrystalline diamond tools when machining brittle hard materials. The methodology is the analysis of the spectral characteristics of the signal vibro-acoustic emission of the cutting process. For this purpose the mathematical model of signal formation, consisting of two phases. The first stage considers the model of random power sequence, the parameters of which depend on the distribution of diamond crystals on the instrument. The second one analyzes the properties of the mechanical system as a channel to transmit information about the statistical properties of the power sequence. The results of the study are used to diagnose the workability of polycrystalline diamond tools directly in the process of signal processing

Keywords: polycrystalline diamond tools, the diamond crystals distribution on the surface of tool, diagnostics, random pulse sequence

Введение.

При обработке труднообрабатываемых хрупких материалов (техническая керамика, ситалл, кварц, специальные марки стекла, рубин и пр.) получил большое распространение поликристаллический алмазный инструмент. Диспергирование материала заготовки в этом случае осуществляется в результате взаимодействия кристаллов алмазов, находящихся в связки на инструменте, с обрабатываемым материалом. При этом инструмент совершает тангенциальные движения со скоростью V_0 и движения в направлении заготовки со скоростью V_s (рис. 1). Поликристаллический алмазный инструмент выполняется таким образом, что при

электролитическом осаждении подложки на слой алмазов наблюдается периодическое изменение концентрации алмазов в подложке. В результате наступает такой момент, когда инструмент контактирует с поверхностью заготовки практически только слоем подложки. В исходном состоянии плотность алмазов равна $(70-80)\%$. После удаления алмазов с поверхности плотность уменьшается до величин $(25-30)\%$.

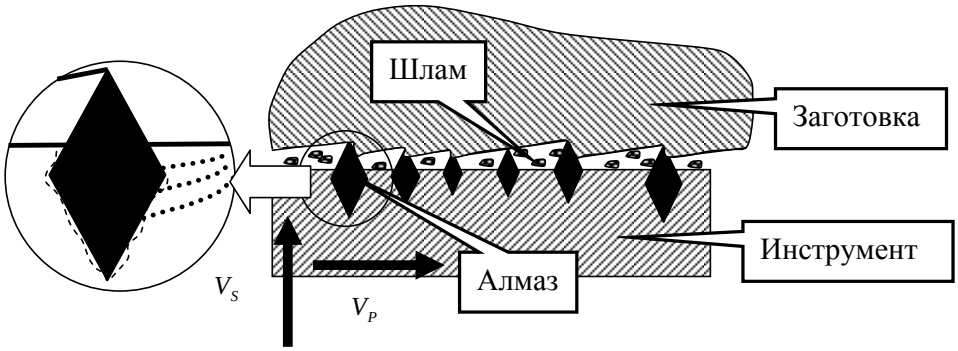


Рис. 1. Схема обработки поликристаллическим алмазным инструментом

Это вызывает резкое нарушение условий резания, которое продолжается до тех пор, пока не вступят во взаимодействие вторые и так далее слои кристаллов алмазов. Это периодическое нарушение режущих свойств поликристаллического алмазного инструмента, как правило, приводит к дефектам и резкому снижению качества поверхности, если обработка ведётся с неизменными режимами. Поэтому важной проблемой при создании оборудования для рассматриваемого класса деталей является разработка методов диагностирования состояния режущей поверхности инструмента. На этой основе осуществляется автоматическое изменение режимов, обеспечивающих требуемые выходные показатели качества изделий. В статье ставится задача разработки методов диагностирования статистических характеристик распределения кристаллов алмазов на режущей поверхности по легко измеримому сигналу виброакустической эмиссии и суммарным значениям сил, формируемых на ней. Таким образом, метод диагностирования основан на изучении динамики обработки поликристаллическими алмазными инструментами. Изучение динамической системы резания является традиционным для процессов обработки [1 - 12]. В статье мы ограничимся случаем сверления отверстий трубчатыми поликристаллическими алмазными инструментами. На основе использования динамики процесса известны исследования в области управления этим процессом [13, 14]. Однако эти исследования посвящены обработке лезвийным инструментом. Для диагностирования состояния процесса резания на основе анализа вибрационных процессов используются различные модели [15, 16]. Однако они не касаются процесса обработки хрупких материалов поликристаллическими алмазными инструментами. Для выяснения методов диагностирования рассмотрим, прежде всего математическую модель динамики.

Математическая модель формирования силовой эмиссии процесса.

Если заданы силы, формируемые в зоне резания, то для определения колебательных смещений инструмента необходимо знать преобразование сил упругой системой. Если ограничиться осевыми и крутильными колебаниями, то необходимо, прежде всего, разработать модель формирования осевого усилия и крутящего момента. Силы формируются на основе независимого суммирования элементарных взаимодействий каждым из N кристаллов. Таким образом, суммарные силы по направлению k, воспринимаемые режущим инструментом, определяются как суммы сил элементарных взаимодействий

$$F^{(k)} = \sum_{i=1}^{i=M} F_i^{(k)}(t). \qquad (1)$$

Причём, в (1) M - количество кристаллов алмазов, вступающих во взаимодействие. Если количество кристаллов на режущей поверхности равно N, то всегда выполняется условие $M \langle N$, так как выступающие высоты кристаллов различны. Очевидно, что значение крутящего момента определяется

$$M_{кр.}(t) = \sum_{i=1}^{i=M} R_i F_i^{(V)}(t), \qquad (2)$$

где R_i - радиус окружности описываемой i - ым кристаллом алмаза при вращении сверла.

По своим свойствам рассматриваемые взаимодействия близки к процессу трения [17 - 20]. Рассмотрим принципиальные стадии формирования каждого силового акта контактного взаимодействия независимо от его природы (фрикционное взаимодействие двух микро- или макронеровностей, т. е. упругое, упруго-пластическое, микрорезание, молекулярное взаимодействие, формирование адгезионных связей и др.). Вначале уделим внимание нормальной составляющей силы. В процессе диспергирования каждый такой акт имеет две стадии: первая стадия накопления потенциальной энергии (временной отрезок $0-\tau_1$) в микрообъеме (на рис.2);вторая стадия -ее выделения (временной отрезок $\tau_1 - \tau_2$), например, необратимые преобразования энергии в формирование трещин и процесс элементарного диспергирования. Что касается тангенциальной составляющей силы, то её изменение имеет некоторое запаздывание, но эта сила также имеет две стадии. В результате действия тангенциальной составляющей силы происходит отделение микрообъёма поверхности от материала. Для того чтобы микрообъём отделился необходимо внедрённому кристаллу пройти некоторое расстояние. Важно подчеркнуть, что время контакта и высота стандартного импульса зависит от объёма диспергированного материала (сравните фрагменты «А» и «В»).

Свойства такого стандартного силового импульса можно раскрыть, если его аппроксимировать треугольной формой. Тогда он будет характеризоваться тремя параметрами:

временем нарастания импульса $\tau_{01} = \tau_1$; временем его спада $\tau_{02} = \tau_2 - \tau_1$; амплитудой i-го импульса $F_{s,i}^{(0)}$. Причем параметры τ_{01}, τ_{02} и $F_{s,i}^{(0)}$ для нормальных и тангенциальных сил могут быть различными. Рассмотрим свойства стандартного импульса и связь его параметров с характеристиками процесса диспергирования единичным зерном. Этапы нарастания и спада импульсов имеют различную природу. Время нарастания во многом определяется скоростью относительного скольжения инструмента относительно заготовки V_0 и зависит от объема материала, вовлекаемого во взаимодействие (например при перемещении точки контакта от В к А (рис. 2) объем будет возрастать), от характеристик предельного состояния материала контактируемых поверхностей, от величины упругой деформации зерна в подложке и пр. Таким образом, можно упрощённо считать, что параметры переднего фронта импульса определяются, в основном, режимами резания и приходящимся микрообъёмом материала, а заднего - в большей степени зависят от свойств материала в контактной области. Очевидно, что увеличение объёма диспергирования материала амплитуда и время контакта будут возрастать.

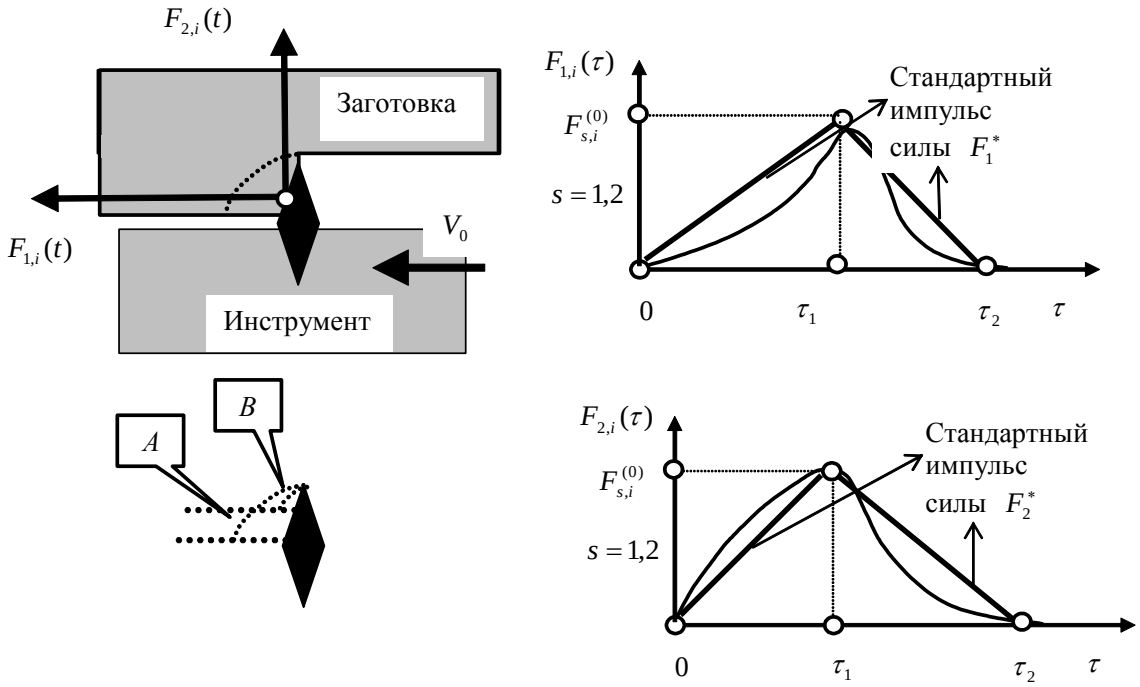


Рис.2.Форма и параметры стандартного силового импульса

Таким образом, например, для нормальных составляющих сил (рис. 3), соответствующих k-му элементарному участку

$$F_{1,k}^*(t) = \sum_{i=1}^{i=N(t)} F_{1,k}^*(t_i, \tau_i^{(0)}, T_i^{(0)}, F_{1,k}^{(0)}). \qquad (3)$$

На случайные параметры $F^*_{s,k}(t)$ можно наложить следующие ограничения: параметры $\tau_i^{(0)}, T_i^{(0)}, F_{1,k}^{(0)}$ являются статистически независимыми между собой; вероятность возникновения импульса в момент t_i в каком-либо интервале равномерна (условие стационарности процесса); известны функции распределения каждого из перечисленных выше случайных процессов; характеристики распределения для каждого из параметров всех элементарных процессов равны между собой, если условия резания остаются неизменными.

Фактически указанные требования являются справедливыми, если акты элементарных взаимодействий на поверхностях контактируемых тел (инструмента и заготовки) равновероятны по группе, расположенной вдоль некоторой прямой, совпадающей со скоростью относительного скольжения (рис. 3). Обратим внимание на следующее важное обстоятельство. Если процесс резания является стационарным, то случайные характеристики во времени и пространстве должны совпадать. Следовательно, случайные оценки процесса по всем замкнутым траекториям, совпадающим с направлением скорости резания также должны быть идентичными.

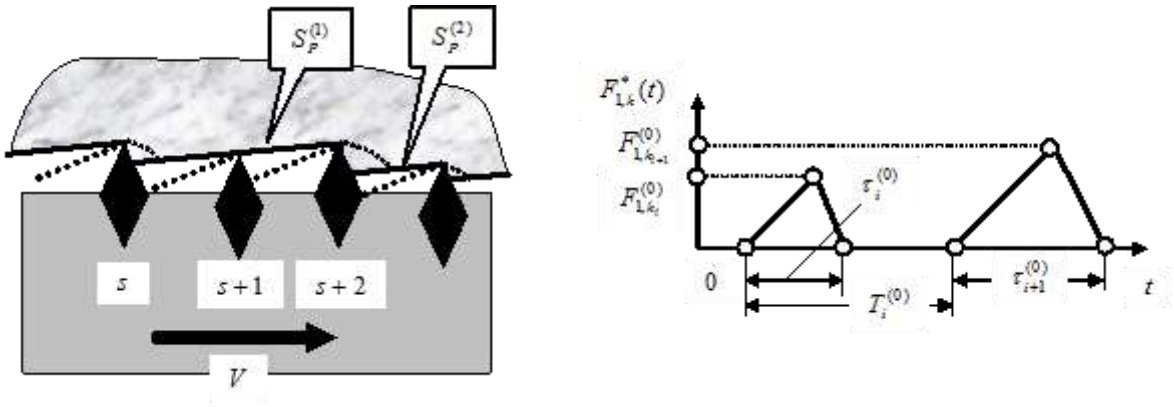


Рис. 3. Формирование случайной импульсной последовательности силового шума и его параметров

Тогда спектральная плотность силового шума по направлению s будет[19]

$$S_{F_s^*,F_s^*}(\omega) = \frac{2\pi nN}{\Delta T}\{(\sigma^2 + a^2)K(\omega) + 2a^2\left|H(\omega)\right|^2 \mathrm{Re}[\frac{\varphi(\omega)}{1-\varphi(\omega)}]\}, \qquad (4)$$

где N - число элементарных взаимодействий на инструменте; n - число импульсов на элементарной поверхности взаимодействий на временном отрезке ΔT; σ - среднеквадратическое отклонение амплитуд случайных силовых импульсов $F_{s,k}^{(0)}$; a - математическое ожидание отклонение амплитуд случайных силовых импульсов $F_{s,k}^{(0)}$; $\varphi(\omega) = \int_0^\infty e^{j\omega\tau}p(\tau)d\tau$ - характеристическая функция интервалов между импульсами, $p(\tau)$ является функцией распределения вероятностей случайной величины интервалов между импульсами $T_i^{(0)}$.

Очевидно, что при заданных характеристиках распределения анизотропии свойств поверхности инструмента (например, ее микрорельефа) увеличению скорости относительного скольжения должно соответствовать уменьшение математического ожидания времени между импульсами. При этом не принимается во внимание зависимость свойств и статистического поля анизотропии по поверхности контакта. На расстояние между импульсами оказывает также влияние величина скорости подачи при неизменной частоте вращения шпинделя (сравните на диаграмме рис. 3 кривые вариаций припусков на кристаллы «s»,«$s+1$» и «$s+2$»). При подаче на оборот $S_P^{(1)}$ кристалл «$s+1$» не вступает во взаимодействие, поэтому расстояние между импульсами будет больше, чем при $S_P^{(2)}$.

Неопределённость выступающих частей кристаллов приводит к возрастанию дисперсии максимальных значений импульсов и их длительности. Другими словами, статистические характеристики распределения кристаллов алмазов на режущей поверхности отображаются в изменениях параметров случайной импульсной последовательности и в спектральных их характеристиках. В (4) входят также функции частоты $K(\omega)$ и $H(\omega)$, которые зависят от спектрального представления стандартного единичного импульса и связаны следующими интегральными соотношениями:

$$K(\omega)=\int_0^{\infty}(\tau^{(0)})^2\left|S(\omega,\tau^{(0)})\right|^2 p(\tau^{(0)})d(\tau^{(0)}), \qquad (5)$$

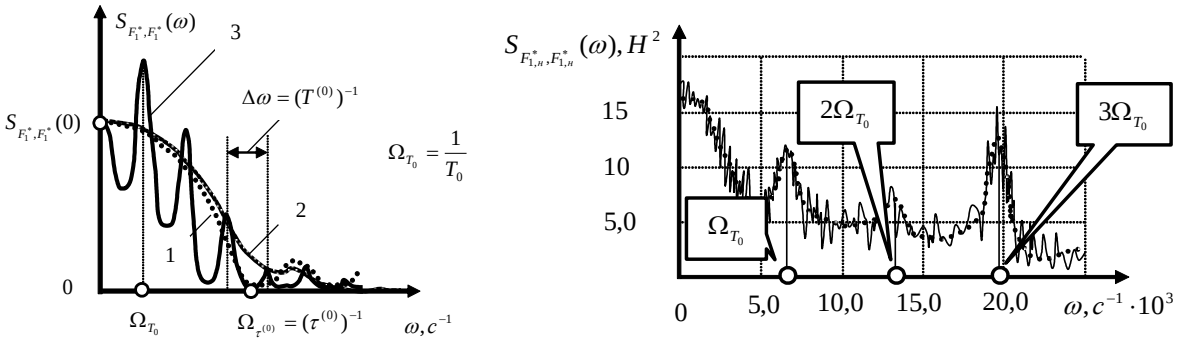
где $S(\omega,\tau^{(0)})$ - спектральная плотность стандартного единичного импульса; $p(\tau^{(0)})$ - функция распределения вероятностей случайной величины – длительности импульса $\tau^{(0)}$;

$$H(\omega)=\int_0^{\infty}(\tau^{(0)})S(\omega,\tau^{(0)})p(\tau^{(0)})d(\tau^{(0)}). \qquad (6)$$

Как показывает (5) и (6), на спектральное разложение случайной импульсной последовательности оказывают влияние следующие ее особенности: статистически усреднённая форма единичного импульса, определяющая общий закон изменения спектральной плотности сигнала и определяемая функциями $H(\omega)$ и $K(\omega)$. Среднестатистические характеристики нормального и тангенциального импульсов существенно отличаются, но характеристики их распределения во времени остаются неизменными. Статистические оценки частоты следования импульсов (математическое ожидание и дисперсия расстояния между двумя соседними импульсами), учитывается вещественной частью от выражения, зависящего от характеристической функции $\mathrm{Re}\left[\dfrac{\varphi(\omega)}{1-\varphi(\omega)}\right]$. Это выражение преобразуется в решетчатую функцию, затухающую по мере увеличения частоты, если дисперсия времени следования случайных импульсов стремится к нулю.

Необходимо отметить, что эта функция имеет принципиальное значение при формировании $\delta(\omega)$-образных частотно зависимых участков общего спектра силовой эмиссии. Общая интенсивность случайной силовой последовательности, определяемая $a_u = \frac{2\pi nN}{\Delta T}$, а также величинами математического ожидания и дисперсии амплитуды.

Рассмотрим качественный вид спектральной плотности случайного процесса, моделируемого как импульсного (рис.4) с учетом указанных выше ограничений. Сравним его с примерами реальных автоспектров, полученных после вычисления автокорреляционных функций для наблюдаемых $F^*_{1,u}(t)$ и определения для них Фурье-изображений. В дальнейшем спектры наблюдаемой силовой последовательности $F^*_{1,u}(t)$ будем обозначать $S_{F^*_{1,u},F^*_{1,u}}(\omega)$ в отличии от спектра $S_{F^*_1,F^*_1}(\omega)$, получаемого на основе модельного рассмотрения импульсной случайной последовательности. После цифрового моделирования выявлены следующие особенности отображений варьирования параметров этого процесса в спектральной плотности. 1. Спектральное разложение типового импульса (1 на рис. 4) определяет общую тенденцию частотного разложения интенсивности силовой эмиссии как случайного импульсного процесса, причем этот спектр сглаживается (2 на рис. 4) по мере увеличения дисперсии длительности импульсов σ_τ по отношению к их математическому ожиданию $\tau^{(0)}$ и дисперсии варьирования амплитуды σ по отношению к ее математическому ожиданию a. 2. В зависимости от дисперсии интервалов между импульсами σ_T по отношению к их математическому ожиданию $T^{(0)}$ спектр преобразованного типового импульса трансформируется на основе перемножения преобразованного спектра (2 на рис. 4) и спектра, определяемого характеристической функцией интервалов между импульсами, в результате чего формируется общий спектр силового шума как случайного импульсного процесса, который представляет собой по мере увеличения частоты совокупность $\alpha(i)\delta(\omega - i\Delta\omega)$-образных импульсов ($i$=1, 2, 3,…) и их интенсивность $\alpha(i)$ по мере увеличения частоты асимптотически стремится к нулю. Характерными точками рассматриваемого спектра являются частота затухающих периодически изменяющихся всплесков Ω_{T_0}, определяемая математическим ожиданием расстояния между импульсами. Необходимо отметить, что при увеличении дисперсии σ_T проявление всплесков в спектре становится все менее заметным, кратные частоты исчезают и при $\sigma_T \Rightarrow T^{(0)}$ форма спектра 3 приближается к 2.



«a» «b»

Рис. 4. Спектральные характеристики силовых воздействий при обработк оликристаллическим алмазным инструментом: а - качественная характеристика автоспектр илового шума как случайного импульсного процесса; “b”- пример автоспектра нормальнс оставляющей сил контактного взаимодействия при сверлении кварца инструменто: лмазный порошок которого соответствует классу $40/50$

Дисперсия спектральной характеристики ($\int_0^\infty S_{F_i^*,F_i^*}(\omega)d\omega$) при постоянной интенсивности импульсной последовательности остаётся неизменной. Особенности амплитудной модуляции импульсной последовательности окрашивают низкочастотную часть спектра частотным составом этой модуляции. Приведенная модель формирования силового шума процесса резания является гипотетической, но она основана, по мнению автора, на реальной картине формирования актов контактного взаимодействия поверхностей при резании поликристаллическим алмазным инструментом, не связанных с координатами состояния системы. Если же условие $K_{\substack{F_{1,s,n}^*,F_{1,s,n}^* \\ npu s\neq n}}(\tau) \Rightarrow 0$ не является справедливым, то его нарушение вызывает уширение спектральной линии каждого частотного всплеска и снижение его амплитуды.

Важно отметить, что формирование на сопрягаемых поверхностях регулярных периодически повторяющихся по пространству перемещения зон активации поверхности (при диспергировании – это периодически повторяющиеся участки съёма микрообъёмов) отображается в спектре силовой эмиссии процесса резания в виде всплесков интенсивности, приближение которых к δ-образной функции свидетельствует о их регуляризации. Эти отображения должны проявляться при частотном разложении сигнала не во временной, а в пространственной области. При неизменной скорости резания временной и пространственный спектры должны совпадать. При большей, но неизменной скорости они должны смещаться в высокочастотную область. Поэтому при изучении особенностей изменения силового шума процесса резания важно на основе прямого рассмотрения его спектральных характеристик уметь оценивать параметры импульсной случайной

последовательности, которые являются более информативными и прямо связаны с физическими процессами контактного взаимодействия.

Если проанализировать спектр, построенный на основе определения скользящего среднего по частоте с окном 200,0 Гц (на рис. 4b выделен жирной линией), то можно отметить наличие двух явно выраженных периодичностей ($\frac{1}{T_{0,1}} = \Delta\omega_1$, $\frac{1}{T_{0,2}} = \Delta\omega_2$), первая из которых имеет кратную частоту $2\Delta\omega_1$. Кроме этого низкочастотная часть спектра скорее напоминает спектральное разложение рассмотренного выше случайного импульсного процесса для $\sigma_T \Rightarrow T^{(0)}$. Все акты контактного взаимодействия, приводящие к силовым реакциям в контактируемых поверхностях, зависят от сближения реальных микро или макронеровностей поверхностей инструмента и заготовки.

Алгоритмы диагностирования

Приведённые выше материалы показывают, что при рассмотрении сил контактного взаимодействия при обработке хрупких неметаллических материалов поликристаллическим алмазным инструментом возможно два подхода. Первый, традиционный, основан на изучении силовой реакции системы СПИД на суммарные силы. Здесь, прежде всего, рассматриваются значения осевого давления со стороны процесса резания, крутящего момента и неуравновешенной радиальной составляющей силы. Такой подход не позволяет выявить распределения сил между отдельными кристаллами алмазов. Например, суммарная осевая сила может формироваться 20% - ми алмазов и 80% - ми кристаллов алмазов. Однако реальная нагрузка на конкретные кристаллы при этом может существенно отличаться. Поэтому характеристики интенсивности износа инструмента и показатели качества формируемой поверхности будут существенно отличаться. Второй позволяет не только определить распределение сил по всему ансамблю формируемых взаимодействий конкретных кристаллов алмазов, но также оценить статистические характеристики распределения кристаллов на режущей поверхности инструмента. Важно отметить два важных свойства частотного представления сил, формируемых в виде случайной импульсной последовательности.

Первое. По мере увеличения дисперсии расстояний между реально взаимодействующими кристаллами наблюдается уширение спектральной линии сигнала на математическом ожидании частоты следования этих импульсов. На рис. 4 это область в окрестности частоты Ω_{T_0} или кратных частот. Именно уширение спектральной линии сигнала силовой эмиссии в окрестности этой частоты несёт информацию об увеличении дисперсии расстояний между вступающими во взаимодействие кристаллами алмазов. Заметим, что это более важная информация, чем характеристики микрорельефа режущей поверхности, так как она отражает реальные взаимодействия, зависящие от технологических режимов и условий обработки, в том числе от условий подачи СОЖ в зону резания.

Второе. ПО мере увеличения дисперсии распределения высоты выступающих из подложки кристаллов алмазов происходит увеличение не только спектральной линии, но и дисперсии амплитуды сигнала силовой эмиссии. Важно подчеркнуть, что форма сигнала каждого импульса лишь несколько смещает спектральные характеристики, но не меняет существа сформулированных выше отображений. Здесь главное значение имеют распределения амплитуды и скважности импульсной последовательности.

Приведём алгоритм оценивания статистических характеристик распределения сил между отдельными кристаллами алмазов (рис. 5). Оценивание в ходе обработки одновременно кроме осевого усилия и крутящего момента дополнительно математических ожиданий сил и их дисперсий существенно дополняет информацию о силовой нагруженности инструмента. Эта информация также позволяет при построении алгоритмов управления процессом обработки выбирать скорость подачи не из условия, например, постоянства осевого усилия или крутящего момента, как это осуществляется в настоящее время [3], а на основе регламентации сил, приходящихся на отдельные кристаллы алмазов. Тем самым обеспечивается существенное увеличение долговечности инструмента, уменьшаются приведённые затраты на изготовление партии изделий и повышаются показатели геометрического качества изготовления отверстий.

Рис. 5. Алгоритм оценивания статистических характеристик распределения сил между отдельными кристаллами алмазов в поликристаллическом алмазном инструменте при сверлении трубчатыми свёрлами

Заключение.

Предложена модель сил контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемой заготовки при сверлении трубчатыми сверлами, поверхность которых представляет поликристаллический алмазный инструмент, в виде импульсной случайной последовательности. В частотной области такая последовательность позволяет определить по характеристикам спектра оценки распределения алмазов в контакте инструмента и обрабатываемой детали. Это открывает не только новую информационную базу для создания систем диагностирования состояния инструмента, но и определять управление на основе изменения технологических режимов процессом не по параметрам общей нагрузки на инструмент, а по распределению ее между алмазами. Это позволяет повысить качество формируемой поверхности.

Благодарности и признательности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-08-00206а.

Библиографический список

1. Заковоротный, В.Л. Динамика процесса резания. Синергетический подход. /В. Л. Заковоротный, М. Б. Флек //. — Ростов н/Д: Терра, 2006. — 880 с.

2. Заковоротный, В.Л., Лукьянов, А.Д., Нгуен, Д.- А., Фам, Д.- Т. Синергетический системный синтез управляемой динамики металлорежущих станков с учетом эволюции связей. — Ростов н/Д: изд-во ДГТУ, 2008. — 324 с.

3. Zakovorotny, V. L., Lukyanov, A.D. The Problems of Control of the Evolution of the Dynamic System Interacting with the Medium // Int. J. of Mechanical Engineering and Automation. — 2014. — Vol. 1, № 5. — P. 271 – 285.

4. Тлустый И. Автоколебания в металлорежущих станках / Пер. с чешск. —М.: Машгиз, 1956. —395 с.

5. Tlusty, I., Polacek, M., Danek, O., Spacek, L. Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen. Veb Verlag Technik, Berlin, 1962. — 320 p.

6. Tobias, S. A. Machine Tool Vibrations. Blackie, London, 1965. — 350 p.

7. Кудинов В.А. Динамика станков. — М.: Машиностроение, 1967. — 359 с.

8. Эльясберг, М.Е. Автоколебания металлорежущих станков: Теория и практика. — СПб.: ОКБС, 1993. — 182 с.

9. Вейц, В.Л., Васильков, Д.В. Задачи динамики, моделирования и обеспечения качества при механической обработке маложестких заготовок // СТИН. — 1999. —№ 6.— С. 9 – 13.

10. Соколовский, А.П. Вибрации при работе на металлорежущих станках / Исследование колебаний при резании металлов. — М.: Машгиз,1958. — С. 15 – 18.

11. Мурашкин, Л.С., Мурашкин, С.Л. Прикладная нелинейная механика станков. — Л.: Машиностроение, 1977. — 192 с.

12. Zakovorotny, V.L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools. Journal of Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. — 2015. —Vol. 10. — P. 102 – 116.

13. Заковоротный В.Л., Панов Е.Ю., Потапенко П.Н. Свойства формообразующих движений при сверлении глубоких отверстий малого диаметра. Вестник Донского государственного технического университета. 2001. Т. 1. № 2. С. 81-93.

14. Заковоротный В.Л., Санкар Т., Бордачев Е.В. Система оптимального управления процессом глубокого сверления отверстий малого диаметра. СТИН. 1994. № 12. С. 22.

15. Заковоротный В.Л., Ладник И.В. Построение информационной модели динамической системы металлорежущего станка для диагностики процесса обработки. Проблемы машиностроения и надежности машин. 1991. № 4. С. 75.

16. Заковоротный В.Л., Бордачев Е.В. Информационное обеспечение системы динамической диагностики износа режущего инструмента на примере токарной обработки. Проблемы машиностроения и надежности машин. 1995. № 3. С. 95

17. Заковоротный В.Л., Шаповалов В.В. Исследование комплексного коэффициента трения. Трение и износ. 1987. № 12. С. 22.

18. Zakovorotnyi V.L., Marchak M., Usikov I.V., Lukyanov A.D. Interrelation between tribosystem evolution and parameters of dynamic friction system. Journal of Friction and Wear. 1998. Т. 19. № 6. С. 54-64.

19. Заковоротный В.Л. Нелинейная трибомеханика. Ростов-на-Дону, изд-во ДГТУ, 2000. 293 с.

20. Заковоротный В.Л., Шаповалов В.В. Динамика транспортных трибосистем. Сборка в машиностроении, приборостроении. 2005. № 12.

УДК 612.821:007

Синергетический системный синтез управления динамикой сверления глубоких отверстий

Туркин И.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,tur805@mail.ru

Семко И.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия.

Аннотация. В работе рассматриваются вопросы синтеза системы управления формообразующими движениями при сверлении глубоких отверстий с учетом динамической связи, формируемой процессом резания. Определены технологические инварианты системы, на основе которых определены основные цели управления. Проведен синтез системы управления сверлением глубоких отверстий на основе синергетического подхода к управлению, обеспечивающий, не только асимптотическую устойчивость процесса обработки, но и необходимый запас, позволяющий достичь максимального заглубления инструмента в заготовку за один цикл обработки. По результатам проведенной работы представлены сравнительные характеристики производительности процесса обработки с применением синергетического подхода и без, сделаны выводы.

Ключевые слова: сверление глубоких отверстий, синергетика, момент сопротивления, модель, привод подачи, стружка.

Abstract. The paper deals with the synthesis of management formative movements when drilling deep holes, taking into account the dynamic link formed by the cutting process. Defined technological invariants of the system on which the basic management objectives. The synthesis of a control system by drilling deep holes on the basis of the synergistic approach to management, which provides not only the asymptotic stability of the treatment process, but also the necessary reserve, allowing to achieve maximum penetration into the workpiece tool for one cycle of treatment. According to the results of the work presented the comparative performance data processing using a synergistic approach and without conclusions.

Keywords: drilling deep holes, synergy, the moment of resistance, the model, the drive feed chips.

Наиболее эффективные метод синтеза нелинейных систем связанного (векторного) автоматического управления, основан на использовании синергетической теории управления, разработанной А.А. Колесниковым и его учениками [1]. Применительно к процессам обработки на металлорежущих станках синергетическая концепция развита благодаря работам В.Л. Заковоротного и его учеников [2].

Однако реализация этой концепции при обработке сверлением глубоких отверстий до настоящего времени не выполнена. Перспективы использования синергетической теории управления для построения эффективных систем для сверления глубоких отверстий основаны на том, что функция управления строится с учетом внутренних связей, существующих в объекте. В данном случае внутренняя связь есть динамическая связь, формируемая процессом резания и представляющая силы резания в координатах пространства состояния системы. Внутренняя связь формирует внутренний регулятор, действие которого необходимо направить на достижение целей

управления. Тогда внешнее управление, осуществляемое управляемыми приводами вращения шпинделя и подачи пиноли, лишь корректирует обеспечение цели управления.

1. Модель, описывающая динамику системы сверления

В большинстве конструктивных исполнений приводов исполнительных элементов станков для сверления глубоких отверстий можно в приводе подачи пиноли не принимать во внимание реакцию со стороны процесса резания. Это обусловлено большим передаточным отношением редуктора, установленного между серводвигателем и пинолью, обеспечивающей осевую подачу инструмента. Кроме этого, в ограниченном диапазоне изменения скорости подачи можно квадратичный член в функциональной зависимости крутящего момента от скорости подачи заменить линейным, то есть использовать обычно используемую зависимость сил от площади срезаемого слоя.

Тогда уравнение динамики системы (1) сверления глубоких отверстий малого диаметра[3].

$$\begin{cases} \omega_{0,1}(t) - k_{1,\Sigma}\{\dfrac{\omega_2}{\omega_1} + T_Э^{(1)}[\dfrac{1}{\omega_1}\dfrac{d\omega_2}{dt} - \dfrac{\omega_2}{(\omega_1)^2}\dfrac{d\omega_1}{dt}]\} = T_{ЭМ}^{(1)}T_Э^{(1)}\dfrac{d^2\omega_1(t)}{dt^2} + T_{ЭМ}^{(1)}\dfrac{d\omega_1(t)}{dt} + \omega_1(t); \\ \omega_{0,2}(t) - k_{2,\Sigma}\{\dfrac{(\omega_2)^2}{\omega_1} + T_Э^{(2)}[\dfrac{2\omega_2}{\omega_1}\dfrac{d\omega_2}{dt} - \dfrac{(\omega_2)^2}{(\omega_1)^2}\dfrac{d\omega_1}{dt}]\} = T_{ЭМ}^{(2)}T_Э^{(2)}\dfrac{d^2\omega_2(t)}{dt^2} + T_{ЭМ}^{(2)}\dfrac{d\omega_2(t)}{dt} + \omega_2(t), \end{cases} \quad)$$

можно несколько упростить и рассматривать в виде

$$\begin{cases} \omega_{0,1}(t) - k_1\{\omega_2 + T_Э^{(1)}[\dfrac{d\omega_2}{dt} - k_2\omega_2\dfrac{d\omega_1}{dt}]\}e^{-k_2\omega_1} - \\ - k_C\{\int_0^t \omega_2(t)dt + T_Э^{(1)}[\omega_2(t) - \omega_2(0)]\} = \\ = T_{ЭМ}^{(1)}T_Э^{(1)}\dfrac{d^2\omega_1(t)}{dt^2} + T_{ЭМ}^{(1)}\dfrac{d\omega_1(t)}{dt} + \omega_1(t); \\ \omega_{0,2}(t) = T_{ЭМ}^{(2)}T_Э^{(2)}\dfrac{d^2\omega_2(t)}{dt^2} + T_{ЭМ}^{(2)}\dfrac{d\omega_2(t)}{dt} + \omega_2(t). \end{cases} \quad (2)$$

Для дальнейшего анализа удобно систему (2) представить в форме Коши. Для удобства и единообразия выражений сделаем следующую замену переменных: $\omega_1 = x_1$; $d\omega_1/dt = x_2$; $\omega_2 = x_3$; $d\omega_2/dt = x_4$; $x_5 = k_1\omega_2\exp(-k_2\omega_1) + k_C x_6$; $dx_6/dt = x_3$. Тогда имеем

$$\begin{cases} dx_1/dt = x_2; \\ dx_2/dt = \dfrac{1}{T_{ЭМ}^{(1)}T_Э^{(1)}}\{\omega_{0,1} - k_M(x_5 + T_Э^{(1)}\dfrac{dx_5}{dt}) - T_{ЭМ}^{(1)}x_2 - x_1\}; \\ dx_3/dt = x_4; \\ dx_4/dt = \dfrac{1}{T_{ЭМ}^{(2)}T_Э^{(2)}}\{\omega_{0,2} - T_{ЭМ}^{(2)}x_4 - x_3\}; \\ x_5 = k_1\omega_2\exp(-k_2\omega_1) + k_C x_6; \\ dx_6/dt = x_3, \end{cases} \quad (3)$$

где $k_M = \dfrac{R_1}{c_e^{(1)}c_M^{(1)}}$ - коэффициент приведения крутящего момента, формируемого в зоне резания, к электрической стороне серводвигателя.

2. Синтез системы управления

Если принять во внимание систему (2) и (3), то условие постоянства момента формирует первую технологическую инварианту, то есть

$$\psi_1 = x_5^{(0)} - \{k_1 x_3 \exp(-k_2 x_1) + k_C x_6\} = 0, \qquad (4)$$

где $x_5^{(0)}$ - задаваемое значение крутящего момента. Координата ψ_1 - есть агрегированная координата, представленная в координатах пространства состояния. Если подобрать управление таким образом, что условие $\psi_1 = 0$ есть точка притяжения динамической системы, то будет выполнено первое из рассматриваемых технологических условий.

2) В ходе функционирования динамической системы процесса сверления угловая скорость вращения шпинделя может меняться. В системе (3) – это координата x_1. Она может существенно меняться, как показано в третьей главе, за счет реакции со стороны процесса обработки. Необходимость стабилизации угловой скорости вращения шпинделя имеет два основания. Во-первых, скорость вращения шпинделя выбирается из условия оптимального значения скорости резания, при которой минимизируются приведенные затраты на изготовление партии деталей. Во-вторых, угловая скорость вращения шпинделя связана с осевым усилием и крутящим моментом положительной обратной связью. Необходимо учитывать, что при увеличении момента угловая скорость уменьшается, что вызывает увеличение сил, в том числе фактора, вызвавшего увеличение крутящего момента. Поэтому второй технологической инвариантой можно считать заданное и неизменное значение угловой скорости вращения шпинделя, то есть

$$\psi_2 = x_{1,0} - x_1 = 0, \qquad (5)$$

где $x_{1,0}$ - желаемая угловая скорость вращения шпинделя.

3) Существует предельное значение осевого усилия. Оно определяется условиями потери осевой устойчивости тела сверла. При потере осевой устойчивости за счет изгиба инструмента резко возрастает радиальная неуравновешенная составляющая сил, действующих на вершину инструмента. В результате формируется новое, отличное от оси вращения шпинделя, направление движения инструмента. Таким образом, потеря осевой устойчивости сверла вызывает увод оси формируемого отверстия и приводит к неустранимому браку. Если принять во внимание (1), то на координаты состояния системы необходимо наложить дополнительные ограничения

$$k_{2,0}(x_3)^2 \exp(-k_1 x_1) = k_{2,0}(\omega_2)^2 \exp(-k_1 \omega_1) \le F_0. \qquad (6)$$

При всех условиях, первая задача, которая стоит при синтезе управления процессом сверления глубоких отверстий спиральными сверлами, является задача синтеза управления по критерию (5). Для этого воспользуемся прямым управлением угловой скорости вращения шпинделя на основе варьирования напряжения якоря серводвигателя.

После выполнения синтеза управления, который подробно представлен в предыдущей работе[3], синтезированное управление примет следующий вид:

$$U_1 = \alpha_0\omega_{0,1} + \alpha_1\omega_1 + \alpha_2 I_1 + \alpha_3 \exp(-k_1\omega_1) + \alpha_4 \exp(-2k_1\omega_1) - \alpha_5 I_1 \exp(-k_1\omega_1), \quad (7)$$

где $\alpha_0 = \frac{1}{a_0 T T_0}$; $\alpha_1 = \frac{1}{a_0}(a_{1,1} + \frac{1}{TT_0})$; $\alpha_2 = \frac{1}{a_0}(a_{1,1} - \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})$; $\alpha_3 = \frac{a_{2,2}}{a_0 a_{1,2}}(\frac{1}{T} + \frac{1}{T_0})$; $\alpha_4 = \frac{a_{2,2}}{a_0 a_{1,2}}\frac{a_{2,2}}{k_1}$; $\alpha_5 = \frac{a_{2,2}}{k_1 a_0}$.

Полученное выражение фактически определяет закон синергетического управления угловой скоростью вращения шпинделя путем варьирования напряжения якоря. Полученный закон управления обеспечивает выполнение технологического инварианта (3). При этом условие (3) характеризует притягивающее многообразие, выход на которое осуществляется через время (3-4)*(T+T0)*. Как видно, закон управления является существенно нелинейным.

Для согласования условий постоянства угловой скорости вращения шпинделя, и момента, действующего на инструмент, необходимо уточнить параметры, входящие в (3), так как, исходя из (3), коэффициент $k_{\Sigma}(t) = k_{1,1}\omega_{2,0}\exp(-k_0 t)$. В свою очередь, коэффициент k_{Σ} входит в параметр $a_{2,2}$ в управлении (3). Раскроем связь параметров подсистемы управления приводом вращения инструмента с приводом подачи

$$U_1 = \alpha_0\omega_{0,1} + \alpha_1\omega_1 + \alpha_2 I_1 + \phi(\omega_1, \omega_2), \quad (8)$$

где $\phi(\omega_1, \omega_2) = \frac{k_{\Sigma}\exp(-k_0 t)}{L_1 a_0 a_{2,1}}\exp(-k_1\omega_1) + \frac{(k_{\Sigma})^2\exp(-k_0 t)}{(L_1)^2 a_0 a_{2,1} k_1}\exp(-2k_1\omega_1) - \frac{k_{\Sigma}\exp(-k_0 t)}{L_1 k_1 a_0} I_1 \exp(-k_1\omega_1)$.

Закон (8) будет учитывать программное изменение скорости подачи, обеспечивающее неизменное значение момента на сверле.

3. Эффективность синтезированной системы управления

Приведем некоторые примеры производительности системы на основе результатов цифрового моделирования. На рис. 1 приведены функции изменения сил и величины единичного заглубления при сверлении. Как видно на рис. 1, процесс обработки необходимо останавливать уже через восемь секунд. Глубина обработанного отверстия, приведенная к количеству оборотов якоря двигателя подачи, не достигает 350об. На рис. 2 приведены траектории моментов и величины заглубления, полученные при обеспечении стабилизации сил на основе введения обратной связи по крутящему моменту.

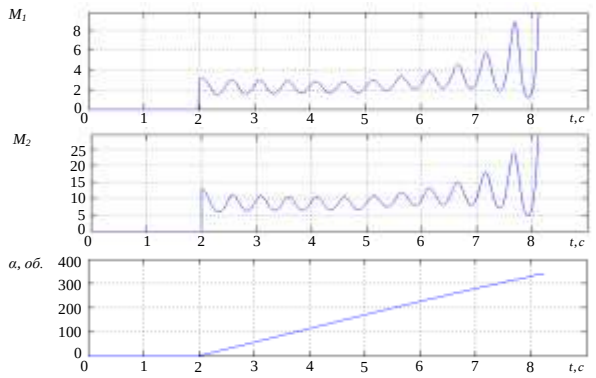


Рис. 1. Траектории координат состояния без управления процессом обработки.

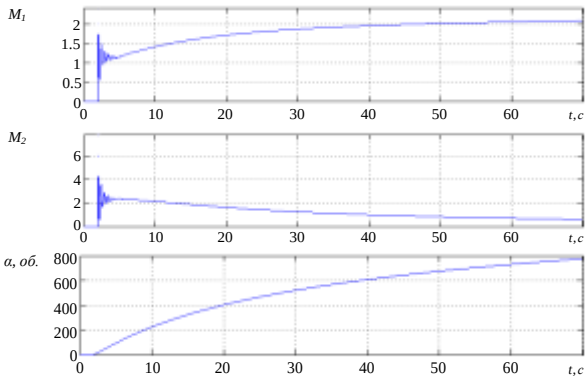


Рис. 2. Траектории координат с введением обратной связи по крутящему моменту.

Здесь величина единичного заглубления существенно возрастает и достигает величин (800 – 850) оборотов якоря двигателя подачи. Что касается времени заглубления, то оно может быть равно бесконечности, так как за счет уменьшения скорости подачи вплоть до нуля накопление стружки в стружкоотводящих канавках прекращается.

Сравнение полученных осциллограмм процесса обработки с применением синергетического подхода к управлению и без него, позволяет сделать вывод об увеличении единичного заглубления при использовании синтезированного управления. С точки зрения физики происходящих событий, то увеличение единичного заглубления происходит за счет снижения скорости подачи, которая зависит от момента сопротивления, обусловленного накоплением стружки в стружкоотводящих канавках инструмента.

Библиографический список

1. Колесников А.А. Аналитическое конструирование нелинейных агрегированных регуляторов по заданной совокупности инвариантных многообразий. I. Скалярное управление /А.А. Колесников // Известия вузов Электромеханика. - 1987. №1-3.

2. Заковоротный В.Л. Система оптимального управления процессом глубокого сверления отверстий малого диаметра /В.Л. Заковоротный, Т.С. Санкар, Е.В. Бордачев // СТИН.- 1994г.- №12. С.22-25.

3. Туркин И.А. Самоорганизация динамической системы резания на примере сверления глубоких отверстий. / И.А. Туркин, В.П. Лапшин // Междунар. науч. конф. «Системный синтез и прикладная синергетика»: сб. науч. тр. / СКФУ. Пятигорск - 2013г.

УДК 531.54

Математическая модель упругого проскальзывания в контакте колесо-дорога

Чувейко М. В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, chuveyko@gmail.com,
Носачев С. В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, nosachev-s@yandex.ru
Семко И.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, dstu@ka.pp.ru

Аннотация. Рассматривается проблема упругого скольжения в контакте колесо-поверхность дороги. Представляется математическая модель взаимодействия поверхностей. В разработанной математической модели предположено, что деформационными процессами поверхности дороги можно пренебречь. Колесо моделируется в виде совокупности секторов упругого обода, закрепленных на упругом диске. На динамику модели основное влияние оказывают: сила взаимодействия секторов обода с центром колеса, сила межсекторного взаимодействия и сила контактного взаимодействия с поверхностью. В работе проведены экспериментальные исследования с использованием методов численного моделирования. Результаты работы представляют интерес для решения задач управления движением колеса с позиции предотвращения срыва контакта. Примененный целостный подход позволит выявить эмерджентность, оказывающую влияние на результирующую траекторию системы.

Ключевые слова: система «колесо–поверхность дороги», деформация, сила трения, упругое скольжение.

Abstract. The problem of elastic sliding in contact wheel-road surface considers. The interaction of surfaces mathematical model is presented. In the developed mathematical model suggested that the road surface deformation processes can be neglected. The wheel is modeled as a set of the elastic rim mounted sectors on an elastic disc. The dynamics model mainly influenced by: interaction force sectors rims with wheel center, intersectional interaction force, the contact surface interaction force. In this paper experimental studies using numerical simulation methods conducted. To solve the objective of motion control wheel with position prevent the disruption of contact are of interest. Holistic approach will identify synergistic effects influencing the resulting trajectory of the system.

Key words: “wheel-road surface” system, deformation, friction force, elastic slip.

Описание математической модели

С момента появления колесного транспорта в машиностроительной области возникла задача обоснования природы сил сцепления системы «колесо-поверхность дороги». В известных исследованиях динамическая характеристика фрикционного узла рассматривается заданной, параметры которой не зависят от упругих свойств колеса[1-4].В отличие от этих работ в предлагаемом исследовании доказывается, что свойства формируемой фрикционной связи не являются инвариантными к упругим характеристикам колеса. Тем самым уточняются и дополняются многие известные свойства системы. Рассмотрим задачу о качении колеса по поверхности дороги (см. рис. 1). Будем полагать, что жесткость дороги достаточно велика, в связи с чем, ее

деформациями можно пренебречь. Здесь в качестве колеса рассматривается упругий обод, закрепленный на диске. При этом динамика радиальных деформаций не рассматривается

.

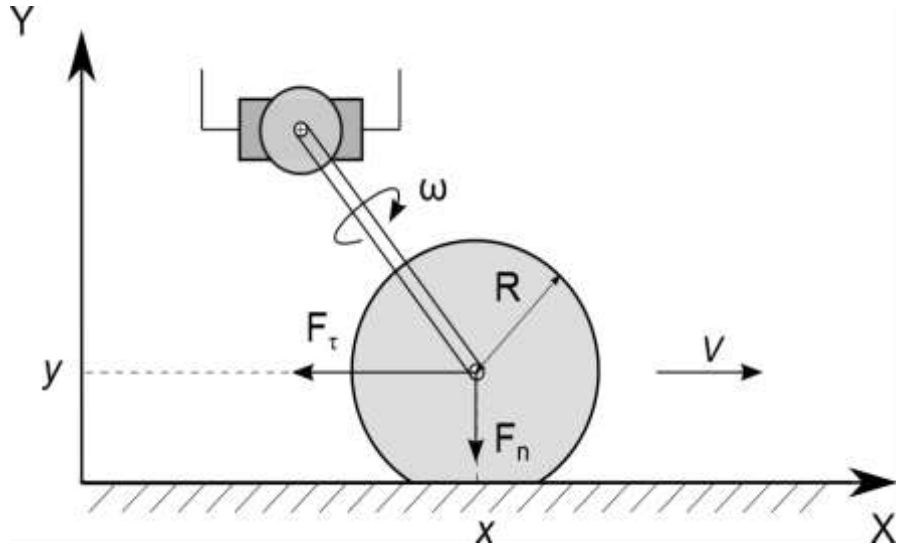


Рис. 1 – Система «колесо-поверхность дороги»

Ось колеса вращается с некоторой фиксированной угловой скоростью ω.К колесу приложены внешние силы нормального давления (т.е. сила прижимающая колесо к поверхности дороги), тангенциальная сила (сила препятствующая движению колеса) и силы контактного взаимодействия с поверхностью дороги. Силы контактного взаимодействия с поверхностью дороги определяются процессами, протекающими в пятне контакта. Согласно современным представлениям о процессе трения, условно можно выделить два режима функционирования трибоконтакта: “режим зацепления” и “режим скольжения”:

“Режим зацепления” характеризуется наличием физико-механических связей между элементами взаимодействующих поверхностей. Эти связи препятствуют относительному движению поверхностей, что математически может быть выражено посредством силовой функции F в координатах состояния. Исследования показали, что с вид силовой функции идентичен закону Гука: $F = k_3 \Delta x$.

“Режим скольжения” характеризуется отсутствием постоянных физико-механических связей между контактирующими поверхностями, при этом поверхности находятся в постоянном движении друг относительно друга. Процесс формирования и разрушения новых связей приводит к появлению силы взаимодействия, которую называют силой трения скольжения. Величина этой силы определяется по формуле: $F = k_4 N$.В это выражение входит величина коэффициента трения k_4. Величина коэффициента трения определяется свойствами взаимодействующих поверхностей, а также скоростью относительного скольжения. Качественная зависимость коэффициента от скорости приведена на рис.2. По мере уменьшения скорости относительного скольжения, интенсивность

формирования связей увеличивается, в то время как интенсивность их разрушения падает, и при снижении скорости ниже порогового значения этот процесс приводит к формированию устойчивых связей и переходу в режим зацепления.

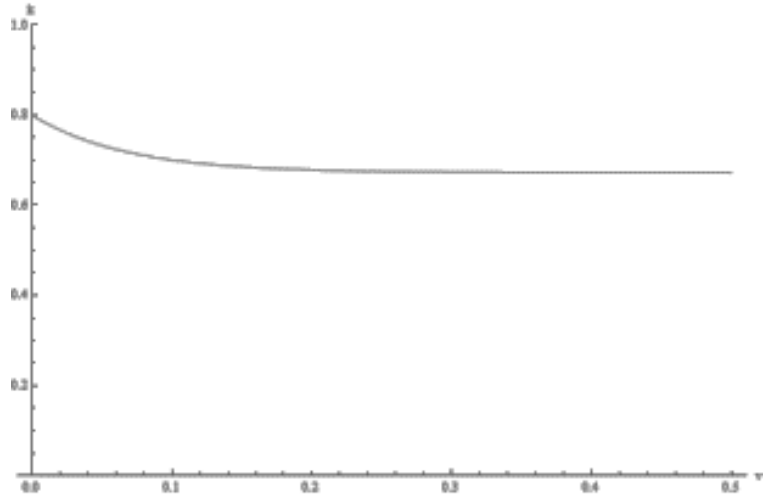


Рис.2 – Зависимость коэффициента трения от скорости.

Эмпирическая зависимость коэффициента трения может быть представлена в виде следующего выражения:

$$k(v) = k_0\left(1 - \xi\left(1 - e^{-\chi v}\right)\right),$$

где ξ и χ – некоторые эмпирические коэффициенты.

Само колесо моделируется совокупностью секторов упругого обода, закрепленных на упругом диске. Таким образом, математическая модель всей системы представляет собой набор дифференциальных уравнений в частных производных. Более подробный вывод уравнений модели приведен в статье [5].

$$\begin{cases} \dfrac{dS}{dt} = k_2 \dfrac{\partial}{\partial l}\dfrac{1}{\tau} - h_2 \dfrac{\partial}{\partial l}\left(\dfrac{1}{\tau^2}\dfrac{d\tau}{dt}\right) - \dfrac{1}{H\overline{Q}}\left(k_1 N + h_1 \dfrac{dN}{dt}\right) + f_{S,\tau} \\ \dfrac{dN}{dt} = S - \overline{S} \\ \dfrac{d\tau}{dt} = -\dfrac{1}{H\overline{Q}}\dfrac{dS}{dl} \\ \dfrac{dx}{dt} = v \\ \dfrac{dv}{dt} = \dfrac{1}{m}\int_D f_{S,\tau}\, dl - F_n \end{cases}$$

где: S - поток, кг/с; $\overline{S}$ - заданная величина потока, кг/с; H - площадь сечения цилиндра, м^2; $\overline{Q}$ - исходная объемная плотность цилиндра кг/м^3; k_1 - удельная тангенциальная упругость диска, кг/(с^2·м); h_1 - удельная тангенциальная диссипация диска, кг/(с·м); k_2 - удельная продольная упругость, (кг·м)/с^2; h_2 - удельная продольная диссипация, (кг·м)/с; N - величина натяжения, кг; τ -

коэффициент уплотнения материала; x - горизонтальная координата центра колеса, м; v - поступательная скорость центра колеса, м/с; m - масса колеса, кг; $f_{S,\tau}$ - удельная сила контактного взаимодействия, кг/с^2; D - протяженность пятна контакта, м; F_n - сила внешнего воздействия, (кг·м)/с^2.

Компьютерное моделирование

Из классических предположений динамики поведения колеса следовало бы предполагать, что скорость движения центра колеса, должна определяться произведением угловой частоты на радиус. Однако результаты моделирования показали иное. Фактическая скорость движения центра колеса ниже ожидаемой скорости. Это объясняется деформационными процессами в колесе. Такое явление получило условное название «упругого проскальзывания». Чтобы численно охарактеризовать это явление, введем величину – коэффициент относительно проскальзывания:

$$\gamma_v = \frac{v - \bar{v}}{v} \cdot 100\%,$$

где: v - поступательная скорость центра колеса, м/с;

$\bar{v}$ - идеальная поступательная скорость центра колеса (определяется произведением угловой частоты колеса на его радиус), м/с.

Численный эксперимент дал следующую зависимость коэффициента относительно проскальзывания от тангенциальной нагрузки – показать график.

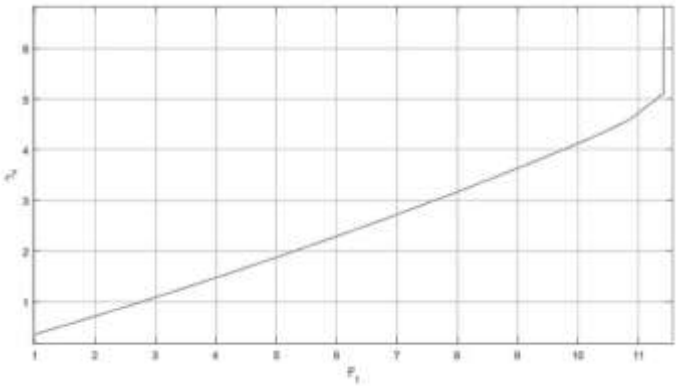


Рис. 3 Зависимость коэффициента относительно проскальзывания от нагрузки.

Здесь имеет место практически линейная зависимость до некоторого порогового значения. После которого коэффициент резко возрастает, что объясняется полной потерей сцепления. Наклон линейной части графика, главным образом, определяется жесткостными характеристиками колеса.

Согласно результатам приведенным в статье подобный «целостный» подход к анализу и проектированию трибологических систем позволит выявить эмерджентность оказывающую влияние на поведение системы, а следовательно и на ее результирующую траекторию.

Библиографический список

1. Заковоротный В.Л. Динамика трибосистем. Самоорганизация, эволюция // В.Л. Заковоротный. — Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2003. — 502с.

2. Заковоротный В.Л. Динамика транспортных трибосистем // В.Л. Заковоротный, В.В. Шаповалов. — Сборка в машиностроении, приборостроении 2005. — 502с.

3. Заковоротный В.Л. Исследование комплексного коэффициента трения. // В.Л. Заковоротный, В.В. Шаповалов. — Трение и износ 1987. — № 12. — С. 22-24.

4. Джонсон, К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. — Москва, Мир, 1989. — 509с.

5. Чувейко М.В. Носачев С.В. Математическое моделирование упругого скольжения в контакте колесо - поверхность дороги. Вестник Донского государственного технического университета. 2014. Т. 14. № 3 (78).

УДК 539.21

Влияние упругости подложки на термоупругодинамическую неустойчивость скользящего фрикционного контакта тел с покрытием

Митин Б.И., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, bmitrin@dstu.edu.ru

Зеленцов В.Б., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Айзикович С.М, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Кэ Л.Л., Пекинский транспортный университет, Пекин, КНР,

Аннотация. Неустойчивость скользящего фрикционного контакта, возникающая при эксплуатации узлов трения, приводит к возникновению аварийных ситуаций. Возникновение неустойчивости зависит от конструктивных особенностей узла трения (таких, как свойства составляющих его материалов), так и от условий его эксплуатации (например, скорость скольжения). Для определения условий возникновения неустойчивости была исследована задача о скольжении жесткого тела по поверхности покрытия на упругой подложке из другого материала. Показано, что соотношение упругих характеристик материала покрытия и подложки оказывает решающее влияние на возникновение термоупругодинамической неустойчивости контакта.

Ключевые слова: трение, скольжение, термоупругая неустойчивость, динамика, покрытие.

Abstract. Instability of frictional sliding during operation of friction pairs leads to failures and accidents. Appearance of instability in a friction pair depends on both its design (e.g. properties of materials) and operating conditions (e.g. sliding speed). To determine parametric conditions leading to instability of sliding friction pairs operation, we considered sliding of a rigid body over the surface of a coating bonded to an elastic substrate, with different materials of the coating and the substrate. We show that correlation between elastic properties of the coating and the substrate plays important role in originating of thermoelastodynamic instability of sliding contact.

Keywords: friction, sliding, thermoelastic instability, dynamics, coating.

При функционировании триботехнических систем возникают неустойчивые режимы работы, сопровождающиеся интенсивным фрикционным разогревом. Для определения условий возникновения неустойчивости, порождаемой термоупругой деформацией контактирующих тел, исследуют устойчивость решений задач термоупругости (см. [1–7] и др.) В работах [6, 7] было показано, что область неустойчивых решений динамических задач отличается от таковой в квазистатических задачах и охватывает более широкий диапазон значений параметров задач. Это означает, что анализ решений задач термоупругости в динамической постановке позволяет выявить новые неустойчивые режимы работы узла трения.

Основным методом для исследования неустойчивости скользящего фрикционного контакта на сегодняшний день остается метод малых возмущений [8], а для нахождения решения задачи применяются численные методы, например, метод конечных элементов [9]. В работе [7] метод

преобразования Лапласа был использован для решения термоупругодинамической контактной задачи о скольжении жесткого тела по упругому покрытию на жестком основании. Здесь метод работы [7] использован для решения и анализа устойчивости задачи о скольжении жесткого тела по поверхности упругого покрытия, сцепленного с упругой полуплоскостью. Постановка задачи обусловлена широким распространением покрытий различного назначения (антифрикционные, противоизносные и др.) на контактирующих поверхностях, свойства которых могут существенно отличаться от свойств подложки.

Рассматривается динамическая задача термоупругости в рамках плоской деформации о скольжении с постоянной скоростью V жесткой полуплоскости I $(h \le x < \infty)$ по поверхности $(x = h)$ упругого покрытия толщины $h(0 \le x \le h)$,нижняя грань которой $(x = 0)$ сцеплена с упругой полуплоскостью $(-\infty < x \le 0)$ из другого материала. Скольжение недеформируемой полуплоскости I по поверхности упругого покрытия происходит с учетом кулоновского трения, но без учета износа покрытия. В начальный период времени полуплоскость I деформирует упругое покрытие, смещаясь вдоль вертикальной оси по закону $u(h,t) = -\Delta(t)$. Движущаяся полуплоскость I теплоизолирована, а поток тепла, образующийся за счет трения, направлен в упругое покрытие: $K\,\partial T(h,t)/\partial x = -fV\sigma(h,t)$, где $\sigma(x,t)$ — нормальные напряжения в покрытии. На границе покрытия и полуплоскости II выполняются условия идеального теплового контакта. Начальная температура полуплоскости II, как и покрытия, равна нулю. В начальный момент покрытие и полуплоскость II находятся в покое. На бесконечности $(x \to -\infty)$ в полуплоскости II смещения $u_1(x,t)$, напряжения $\sigma_1(x,t)$ и температура $T_1(x,t)$ исчезают. Задача сводится к решению дифференциальных уравнений динамической несвязанной термоупругости совместно с уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{a^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1+\nu}{1-\nu}\alpha\frac{\partial T}{\partial x} \qquad 0 < x < h,\ t > 0 \qquad a = \sqrt{\frac{2\mu(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)}} \qquad (1)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\kappa}\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \qquad (2)$$

где a — скорость продольной упругой волны, ν — коэффициент Пуассона, α — коэффициент линейного теплового расширения, μ — модуль сдвига, ρ — плотность, κ — коэффициент температуропроводности материала покрытия, а в полуплоскости II $(0 < x < h, t > 0)$ — теми же уравнениями (1), (2), в которых a, ν, α, μ, ρ, κ заменяются на параметры a_1, ν_1, α_1, μ_1, ρ_1, κ_1 материала подложки.

Решения поставленной задачи $T(x,t)$, $u(x,t)$, $\sigma(x,t)$ с учетом описанных выше граничных условий и нулевых начальных условий были построены в виде контурных квадратур обратного

преобразования Лапласа, подынтегральные функции которых содержат восемь безразмерных параметров: $\gamma, \tilde{V}$, μ_*, ν_*, K_*,. a_*, α_*, κ_*, задающихся формулами

$$\gamma = \frac{\kappa}{ah}, \quad \tilde{V} = \frac{fV\alpha}{K}\frac{2\mu(1+\nu)}{1-2\nu}\cdot\frac{\kappa}{a}, \quad \mu_* = \frac{2\mu(1-\nu)/(1-2\nu)}{2\mu_1(1-\nu_1)(1-2\nu_1)}, \quad \nu_* = \frac{1+\nu}{1-\nu}\Big/\frac{1+\nu_1}{1-\nu_1}$$

$$K_* = K/K_1, \quad a_* = a/a_1, \quad \alpha_* = \alpha/\alpha_1, \quad \kappa_* = \kappa/\kappa_1$$

где K, K_1 — коэффициенты теплопроводности материалов покрытия и подложки, соответственно. Для большинства современных материалов значение $\gamma > 1$ будет соответствовать толщине покрытия $h < 30$ нм, поэтому в рамках принятой модели анализировались только случаи $\gamma < 1$. Остальные параметры изменяются в интервале $(0, \infty)$. Отметим, что при фиксированных свойствах материала покрытия параметр γ зависит только от толщины покрытия, а $\tilde{V}$ — от коэффициента трения и скорости скольжения.

Решения будут неустойчивы по Ляпунову при $t \to \infty$ при наличии в комплексной плоскости $z = \xi + i\eta$ полюсов подынтегральных функции с положительной действительной частью ($\xi > 0$).Исследование подынтегральных функций показало, что при $\tilde{V} = 0$ решение устойчиво, а неустойчивым является при $\tilde{V} \in (\tilde{V}_{crit}, \infty)$, где $\tilde{V}_{crit} > 0$ соответствует приобретению положительной действительной части одним из полюсов подынтегральной функции.

На рис. 1 представлены параметрические границы области устойчивых и неустойчивых решений в зависимости от параметров $\tilde{V}$ и μ_* при различных значениях γ и неизменных остальных параметрах задачи: $K_*, a_*, \alpha_*, \ldots$.

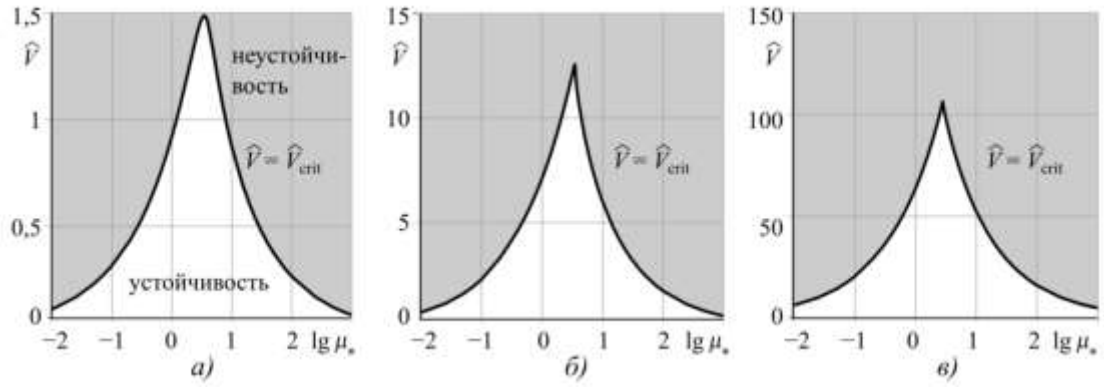
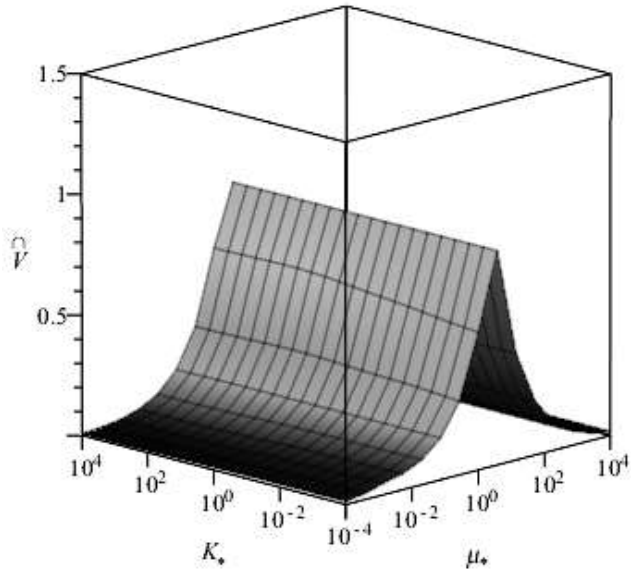


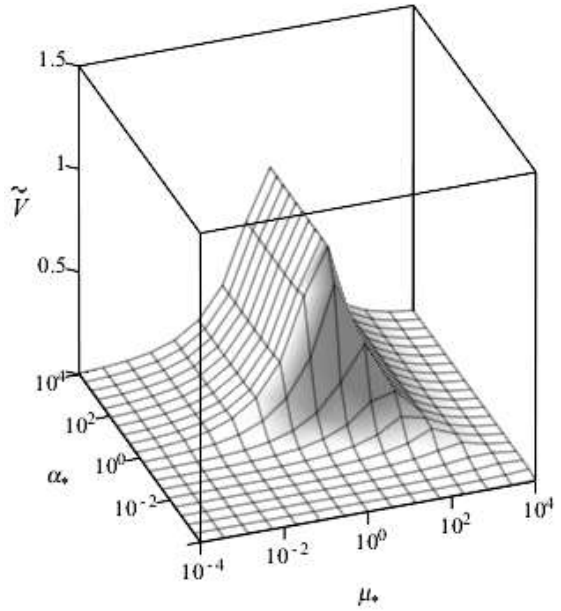
Рис. 1.Безразмерная критическая скорость скольжения $\tilde{V}_{crit}$ в зависимости от μ_* при K_*=6,5, κ_*=5, ν_*=1,2, α_*=2,2, ρ_*=0,4, $a_* = \sqrt{\mu_*/\rho_*}$ и различных γ :а) 1, б) 10^{-1}, в) 10^{-2}

Из графиков рис. 1 следует, что при $\mu_* \to 0$ и $\mu_* \to \infty$ решения задачи II неустойчивы при сколь угодно малых $\tilde{V} > 0$, аналогично рассмотренному ранее в [7] случаю покрытия на

недеформируемой подложке. При близких значениях упругих характеристик покрытия и подложки ($\mu_* \approx 1$) решение будет устойчивым в большем диапазоне скоростей скольжения, соответствующих различным значениям $\tilde{V}$.Влияние параметров K_*и α_* на критическую скорость скольжения иллюстрируют рис. 2 и рис. 3.



ис. 2. Безразмерная критическая скорость скольжени $\tilde{V}_{\text{crit}}$ для различных μ_* и K_* при $\rho_* = 0{,}4,\ C_* = 3{,}25,\ \nu_* = 2{,}2,\ \nu_* = 1{,}2,$ $a_* = \sqrt{\mu_* \rho_*^{-1}}$, $\kappa_* = \sqrt{K_* C_*^{-1} \rho_*^{-1}}$, $\gamma = 10^{-4}$



ис. 3. Безразмерная критическая скорость скольжени $\tilde{V}_{\text{crit}}$ для различных μ_* и α_* при $\rho_* = 0{,}4, C_* = 3{,}25, \nu_* = 1{,}2,\ a_* = \sqrt{\mu_* \rho_*^{-1}}$, $K_* = 0{,}5, \kappa_* = \sqrt{K_* C_*^{-1} \rho_*^{-1}} = 0{,}39$ $\gamma = 10^{-4}$

Таким образом, из рассмотренных параметров наибольшее влияние на критическую скорость скольжения при $\gamma << 1$ оказывают параметры μ_* и α_*, первый из которых характеризует соотношение упругих свойств покрытия и подложки, а второй является отношением их коэффициентов линейного теплового расширения.

На основе полученных результатов становится возможным анализ условий возникновения термоупругодинамической неустойчивости в узлах трения скольжения, в которых используются покрытия различного назначения. Важность полученных результатов обуславливается тем, что возникновение неустойчивости при работе узла трения может привести к преждевременному выходу его из строя и, как следствие, к опасным аварийным ситуациям. Подбор материалов покрытия и полуплоскости на этапе конструирования триботехнических устройств позволяет улучшить эксплуатационные характеристики триботехнических устройств, исключить возможность возникновения термоупругодинамической неустойчивости и обеспечить безаварийную эксплуатацию триботехнических устройств.

Благодарности и признательности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-08-91166-ГФЕН_а,14-07-00271-а). Митрин Б.И. поддержан стипендией Президента РФ № СП-137.2015.1. Айзикович С.М. благодарит Министерство образования и науки за финансовую поддержку в рамках выполнения работы «Организация проведения научных исследований» Государственного задания.

Библиографический список

1. Barber J.R. Thermoelastic instabilities in the sliding of conforming solids // Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 1969. Т. 312. С. 381–394.

2. Александров В.М., Аннакулова Г.К. Взаимодействие покрытий тел с учетом деформируемости, износа и тепловыделения от трения // Трение и износ. 1992. Т. 13. № 1. С. 154–160.

3. Евтушенко А.А., Пырьев Ю.А. Влияние изнашивания на развитие термоупругой неустойчивости фрикционного контакта // Известия РАН. Механика твердого тела. 1997. № 1. С. 114–121.

4. Коваленко Е.В. Контактные задачи с учетом тепловыделения от трения // Механика контактного взаимодействия / под ред. И.И. Ворович, В.М. Александров. Москва: Физматлит, 2001. С. 476–490.

5. Mao J.-J., Ke L.-L., Wang Y.-S. Thermoelastic instability of a functionally graded layer interacting with a homogeneous layer // Int. J. Mech. Sci. 2015. Т. 99. С. 218–227.

6. Afferrante L., Ciavarella M., Barber J.R. Sliding thermoelastodynamic instability // Proc. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 2006. Т. 462. № 2071. С. 2161–2176.

7. Зеленцов В.Б. и др. Термоупругодинамическая неустойчивость решения контактной задачи для покрытия с учетом тепловыделения от трения // Вестник ДГТУ. 2014. Т. 14. № 4. С. 17–29.

8. Dow T.A., Burton R.A. Thermoelastic instability of sliding contact in the absence of wear // Wear. 1972. Т. 19. № 3. С. 315–328.

9. Yi Y.-B., Bendawi A. Effect of convective cooling on frictionally excited thermoelastic instability // Wear. 2012. Т. 296. № 1-2. С. 583–589.

УДК 539.3

Гранично-элементное моделирование поверхностных волн на пороупругом полупространстве на основе шаговой схемы

Петров[1] А.Н., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, andrey.petrov@mech.unn.ru

Айзикович[1] С.М., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, saizikovich@gmail.com.

Игумнов Л.А., Научно-исследовательский институт механики Национального Исследовательского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, igumnov@mech.unn.ru

Аннотация. Рассматриваются задачи распространения волн по дневной поверхности пороупругого полупространства. В качестве теории, описывающей динамические свойства пороупругого материала, используется теория Био для полностью насыщенного материала. Математическая модель записывается в терминах четырех базовых функций – перемещения упругого скелета и порового давления. Совместно с методом граничных интегральных уравнений (ГИУ) используется интегральное преобразование Лапласа и шаговый метод его численного обращения. Методика исследований основана на ГИУ прямого подхода трехмерной изотропной линейной теории пороупругости.

Ключевые слова: модель Био, пороупругость, полупространство, преобразование Лапласа, метод граничных элементов

Abstract. Problems of wave propagation on a surface of poroelastic half-space are considered. The behavior of the poroelastic medium is described by Biot theory for fully saturated material. Mathematical model is written in term of four basic functions – elastic skeleton displacements and pore pressure. Boundary integral equation (BIE) method is used with step method of numerical inversion of Laplace transform to obtain the solution. Research is based on direct BIE of three-dimensional isotropic linear theory of poroelasticity.

Keywords: Biot's model, poroelasticity, half-space, Laplace transform, boundary element method.

Использование теории Био в сочетании с обобщенными формулами Грина – Бетти – Сомильяны и интегральным преобразованием Лапласа позволяет строить шаговые гранично-элементные схемы решения начально-краевых задач трехмерной теории пороупругости однородных тел, а также и с учетом блочного характера распределения механических свойств изотропного материала составных тел. В основу получения шаговых схем положен шаговый метод численного обращения преобразования Лапласа, который опирается на квадратурные формулы для интеграла, получаемого из теоремы операционного исчисления об интегрировании оригинала.

Система дифференциальных уравнений в изображениях по Лапласу для полной модели Био имеет вид [1]:

$$G\tilde{u}_{i,jj} + \left(K + \frac{1}{3}G\right)\tilde{u}_{j,ij} - (\alpha - \beta)\tilde{p}_{,i} - s^2(\rho - \beta\rho_f)\tilde{u}_i = -\tilde{F}_i,$$

$$\frac{\beta}{s\rho_f}\tilde{p}_{,ii} - \frac{\phi^2 s}{R}\tilde{p} - (\alpha - \beta)s\tilde{u}_{i,i} = -\tilde{a},$$

$$\beta = \frac{k\rho_f \phi^2 s^2}{\phi^2 s + s^2 k(\rho_a + \phi\rho_f)}.$$

где s – параметр преобразования Лапласа, G, K – константы упругости, ϕ – пористость, k – проницаемость, α – эффективный коэффициент напряжений, ρ, ρ_a, ρ_f – плотности пористого скелета, присоединенной массы и наполнителя, $\tilde{F}_i, \tilde{a}$ – плотности источников.

Чтобы ввести ГЭ-дискретизацию, рассматривается регуляризованное уравнение [2-4]:

$$\alpha_\Omega \tilde{\upsilon}_k(x,t) + \int_0^\Gamma \int_\Gamma \left(\tilde{T}_{ik}(x,y,t-\tau)\tilde{\upsilon}_i(y,\tau) - \tilde{T}^0_{ik}(x,y,t-\tau)\tilde{\upsilon}_i(x,\tau) - \tilde{U}_{ik}(x,y,t-\tau)\tilde{t}_i(y,\tau)\right)d\Gamma\tau = 0,$$

$$(x \in \partial\Gamma), \quad \tilde{t} = [t_1, t_2, t_3, q]^T, \quad \tilde{\upsilon}(u_1, u_2, u_3, p)$$

где $\tilde{U}_{ik}, \tilde{T}_{ik}$ – матрицы фундаментальных и сингулярных решений; $\tilde{T}^0_{ik}$ – матрица слагаемых компонент $\tilde{T}_{ik}$, содержащих особенности.

Базовый процесс ГЭ-дискретизации состоит в разбиении поверхности Γ на граничные элементы: четырехугольные и треугольные восьмиузловые биквадратичные элементы. При этом треугольные элементы рассматриваются как вырожденные четырехугольные элементы. Обобщенные перемещения аппроксимируются билинейно, обобщенные поверхностные силы – постоянно [3]. Для получения дискретного аналога ГИУ применяется метод коллокации. В качестве узлов коллокации выбираются узлы аппроксимации обобщенных граничных функций. Дискретные аналоги ГИУ формируются в виде систем линейных алгебраических уравнений.

Шаговый метод численного обращения преобразования Лапласа основан на теореме об интегрировании оригинала. Применим эту теорему к производной оригинала искомой функции, чтобы в результате интегрирования получить сам искомый оригинал:

$$f(t) = \int_0^t f'(\tau)d\tau. \qquad (1)$$

Заменим интеграл (1) квадратурной суммой, весовые множители которой определяются с помощью изображения по Лапласу $\bar{f}$ и линейного многошагового метода:

$$f(0) = 0, \quad f(n\Delta t) = \sum_{k=1}^{n} \omega_k(\Delta t), \quad n = 1,...N, \qquad (2)$$

где

$$\omega_n(\Delta t) = \frac{R^{-n}}{L}\sum_{l=0}^{L-1} \bar{f}(s)se^{-in\varphi}, \quad s = \frac{\gamma(z)}{\Delta t}, \quad z = Re^{i\varphi}, \quad \varphi = 2\pi\frac{l}{L}, \qquad (3)$$

N – количество шагов по времени, L – количество расчётных узлов для численного интегрирования по аргументу φ, $\gamma(z) = 3/2 - 2z + z^2/2$ – характеристическая функция

Рассмотрим гранично-элементные решения задачи о действии вертикальной силы $t_3(t) = t^0 f(t)$, $t^0 = -1000 H/м^2$ на поверхность однородного пороупругого полупространства (рис. 1). В качестве закона изменения приложенной нагрузки возьмем функцию Хевисайда $f(t) = H(t)$. Дневная поверхность полупространства свободная и проницаемая: на дневной поверхности задано поровое давление $p=0$ и поверхностные силы $t_i(t) = 0$ $(i = \overline{1,3})$, кроме участка $abcd$, где $t_3(t) = t^0 f(t)$. Площадь участка $abcd$ составляет $1м^2$.

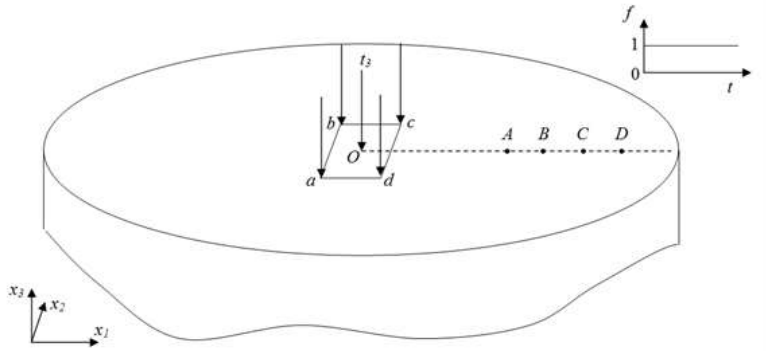
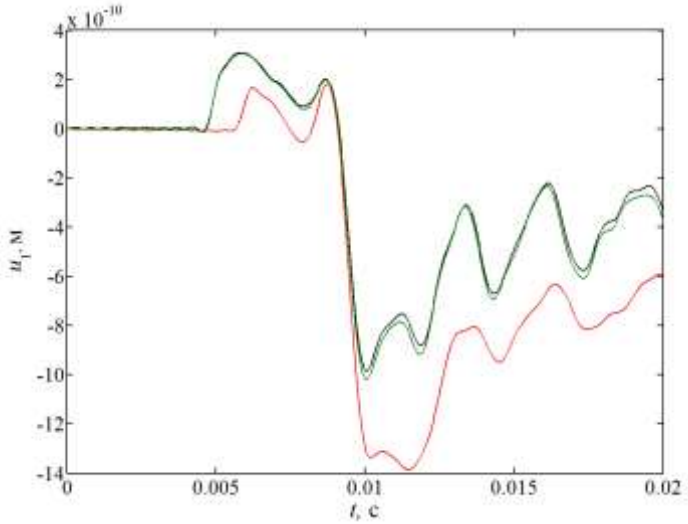


Рис. 1

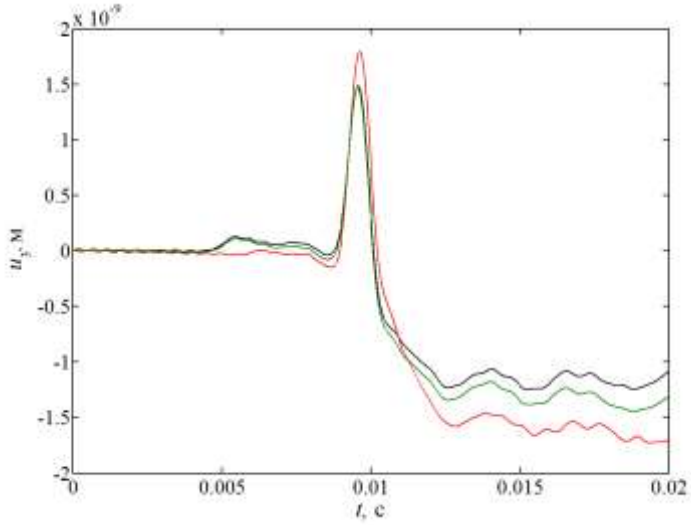
Выбраны следующие параметры пороупругого материала: $K = 8 \cdot 10^9\ H/м^2$, $G = 6 \cdot 10^9\ H/м^2$, $\rho = 2458\ кг/м^3$, $\phi = 0.19$, $K_s = 3.6 \cdot 10^9\ H/м^2$, $\rho_f = 1000\ кг/м^3$, $K_f = 3.3 \cdot 10^9\ H/м^2$, $k = 1.9 \cdot 10^{-10}\ м^4/(H \cdot c)$. Рассмотрим точку D на расстоянии $15\,м$ от места нагружения. На рис. 2-3 представлены динамические отклики перемещений в точке D.



Параметры шагового метода
N=1000, L=1000, Δt=2.10-5

—— пороупругая модель
—— дренированная модель
—— недренированная модель

Рис. 2



Параметры шагового метода
N=1000, L=1000, Δt=$2 \cdot 10^{-5}$

—— пороупругая модель
—— дренированная модель
—— недренированная модель

Рис. 3

Для апостериорного анализа гранично-элементного пороупругого решения приводились гранично-элементные расчеты по дренированной и недренированной моделям материала. На графиках ярко выражены приходы продольной волны первого рода ($t_1 \approx$ 0,0047), поперечной волны ($t_2 \approx$ 0,0096) и волны Рэлея ($t_3 \approx$ 0,0087).

Благодарности и признательности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант № 15-19-10056).

Библиографический список

1. SchanzM. Wave Propagationin Viscoelasticand Poroelastic Continua. Berlin: Springer, 2001. 170 p.

2. Аменицкий А.В., Белов А.А., Игумнов Л.А., Карелин И.С. Граничные интегральные уравнения для решения динамических задач трехмерной теории пороупругости. // Проблемы прочности и пластичности: Межвузовский сборник. Н.Новгород, Изд-во ННГУ, 2009. Вып. 71. С. 164-171.

3. Аменицкий А.В., Игумнов Л.А., Карелин И.С. Развитие метода граничных элементов для решения проблемы распространения волн в пористых средах // Проблемы прочности и пластичности: Межвузовский сборник. Н.Новгород: Изд-во ННГУ, 2008. Вып. 70. С. 71-78.

4. Белов А.А. Гранично-элементный расчет динамики составных вязкоупругих тел // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сборник. Н.Новгород: Изд-во ННГУ,2008. Вып. 70. С. 162-168.

УДК 539.21

Использование наноиндентирования и атомно-силовой микроскопии для исследования механических и микрогеометрических характеристик покрытия TiN, нанесенного методом ионно-плазменного напыления

Садырин Е.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, evgeniy.sadyrin@gmail.com

Ширяева Т.И., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Кренев Л.И., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, lkrenev@yandex.ru

Айзикович С.М., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, saizikovich@gmail.com.

Аннотация. В работе представлены результаты исследования покрытия из нитрида титана (TiN), нанесенного методом ионно-плазменного напыления на подготовленную поверхность образца стали 40Х. Свойства и характерные особенности микрорельефа поверхности образца до и после нанесения покрытия исследовались с помощью атомно-силовой микроскопии (АСМ). Измерены модуль Юнга покрытия и твердость с использованием наноиндентирования. Продемонстрирована важность точного определения толщины и средней шероховатости для корректного измерения характеристик покрытия с помощью наноиндентирования.

Ключевые слова: шероховатость, твердость, модуль Юнга, наноиндентирование, сканирующая зондовая микроскопия.

Abstract. In the present work we present the results of the investigation of the ion-plasma deposited titanium nitride (TiN) coating on the 40Cr prepared steel substrate. The properties and characteristics of the sample surface microtopography before and after coating deposition were studied using atomic-force microscopy (AFM). The mechanical properties of the coating are measured using nanoindentation technique. The importance of an accurate determination of the correct thickness and the average roughness for measuring the characteristics of a coating using nanoindentation is shown.

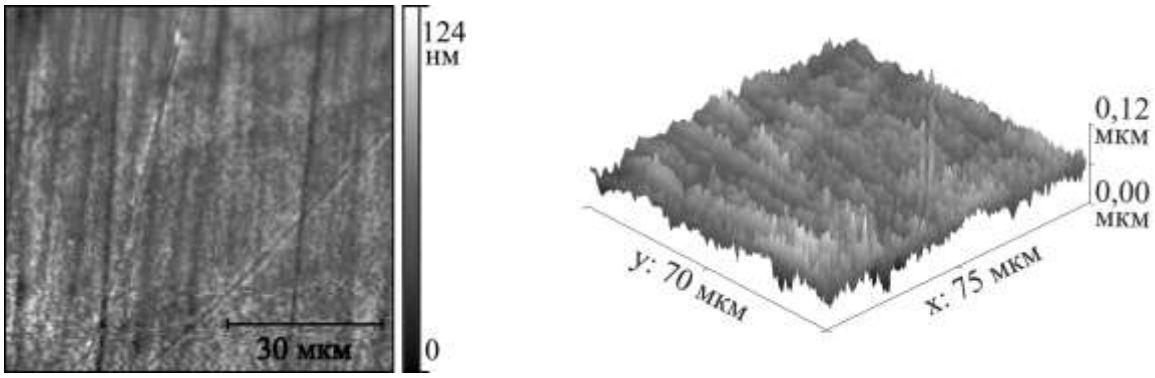
Keywords: roughness, hardness, Young's modulus, nanoindentation, scanning probe microscopy.

Нитрид титана (TiN) широко используется как материал для износостойких, коррозионностойких, защитно-декоративных покрытий в различных отраслях промышленности, а также в ортопедии и ортопедической стоматологии. Это обусловлено высокими значениями прочностных характеристик нитрида титана, его химической стабильностью, низким коэффициентом трения, высоким сопротивлением коррозии и износостойкостью, биологической совместимостью, а также высокой термостабильностью и адгезией к подложке [1,2]. В настоящее время активно исследуется структура подобных покрытий, её зависимость от условий нанесения, а также механические свойства полученных покрытий при данных условиях [3,4].

Целью настоящего исследования является изучение структуры и особенностей микрогеометрии покрытия TiN на подложке из стали 40Х при помощи атомно-силового микроскопа, а также определение механических свойств покрытия при помощи техники наноиндентирования,

обладающей рядом преимуществ перед традиционными методиками диагностики материалов [5]. Подготовка образца для исследования и эксперименты проводились на оборудовании РЦКП НОЦ «Материалы» ДГТУ [6].

Перед нанесением покрытия была осуществлена пробоподготовка подложки из стали 40Х в несколько этапов с использованием компонентов и оборудования компании Buehler, США.В результате была получена зеркальная поверхность образца с максимальной высотой шероховатости R_t = 39,5 нм, и средней шероховатостью R_a = 5,8 нм (рис. 1). Исследование рельефа поверхности проводилось на атомно-силовом микроскопе Nanoeducator (рис.2).



а) б)

Рис.1. Рельеф поверхности подложки из стали 40Х: а) двумерное изображение; б) трехмерное изображение

Покрытие TiN наносилось на установке Булат 6М (рис.3) лаборатории прецизионного литья и вакуумно-плазменных технологий НОЦ «Материалы» ДГТУ. Перед нанесением покрытия для лучшей адгезионной способности подложки производился нагрев образцов до температуры 550–600 °С и ионная очистка поверхности. Осаждение осуществлялось при напряжении питания подложки 60-65 В и токе 130-140 А. Перед напылением в вакуумной камере создавалось давление ~$1{,}5 \cdot 10^{-8}$ Па, а затем для протекания плазмохимической реакции в камеру подавался азот (до давления ~$1{,}5 \cdot 10^{-7}$ Па). Напыление осуществлялось посредством двух электродуговых испарителей-катодов (верхняя и боковая пушка).

Рис.2. ACMNanoeducator (NT-MDT, Россия)

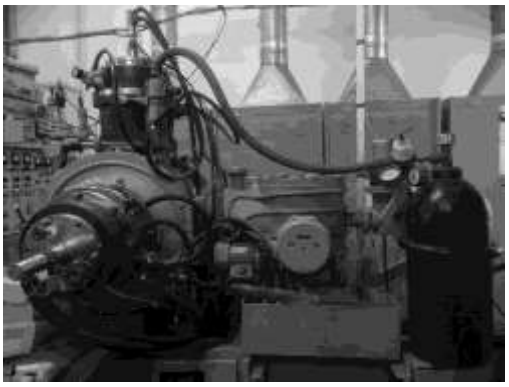
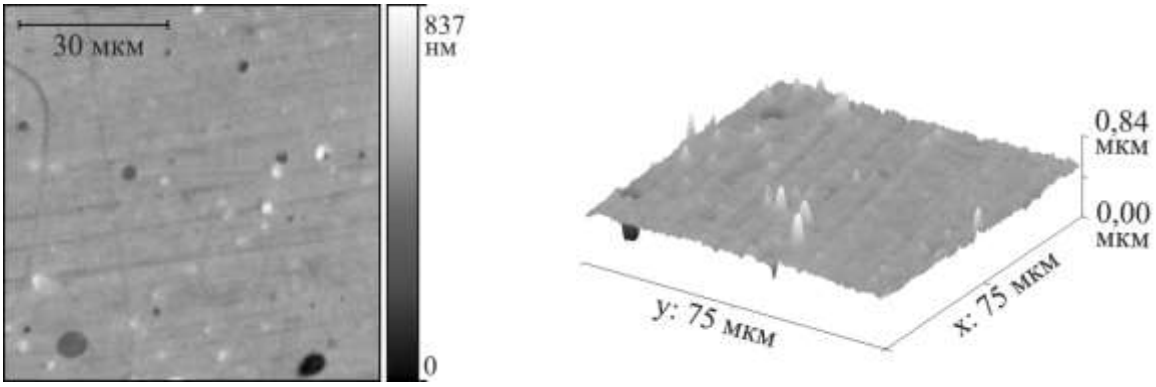


Рис.3. Установка Булат 6М

С помощью ACM Nanoeducator также была исследована микрогеометрия поверхности покрытия TiN. Максимальная высота шероховатости составила R_t = 81,5 нм, при этом средняя шероховатость R_a = 10,7 нм (рис. 4). Толщина покрытия составила h = 1,557 ± 0,013 мкм.



а) б)

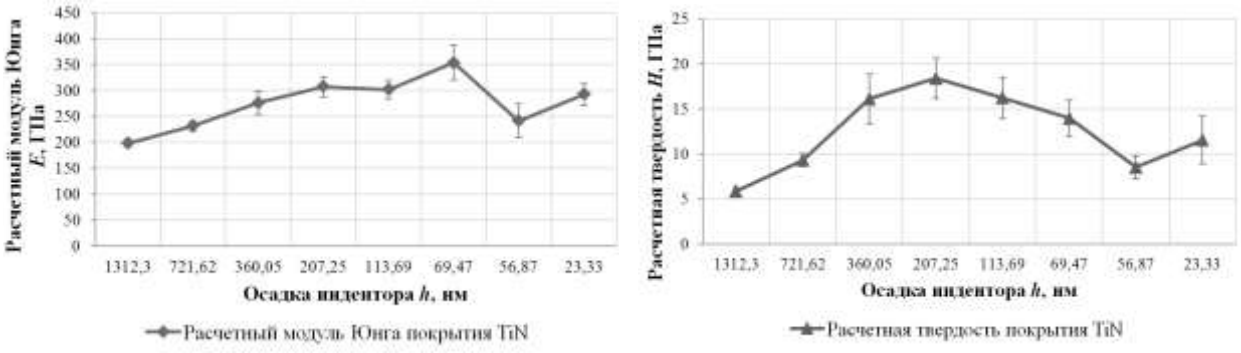
Рис.4. Рельеф поверхности покрытия TiN на подложке из стали 40Х: а) двумерное изображение; б) трехмерное изображение

На рис. 4 также можно обнаружить артефакты напыления: закристаллизовавшиеся капли титана и каверны, образованные подобными каплями. Методическая особенность проводимых исследований заключалась в том, что области вблизи крупных артефактов исключались из измерений профиля поверхности и механических свойств покрытия.

Механические свойств покрытия TiN определялись посредством наноиндентирования на установке Nanotest Platform 3 (Micro Materials, Великобритания). Эксперименты проводились в камере, в которой поддерживается постоянная температура. Для обеспечения защиты установки от механических вибраций она устанавливается на виброзащитной платформе с воздушной подушкой. Во всех экспериментах использовался индентор Берковича с алмазным наконечником с радиусом закругления вершины ~ 100 нм. Для анализа результатов индентирования был использован метод Оливера – Фарра [7].

Перед проведением индентирования покрытия TiN была исследована подложка образца. Время нагрузки-удержания-разгрузки — 30–30–30 с. При нагрузке 500 мН для подложки были определены её микротвердость H (3,17 ± 0,23 ГПа) и модуль Юнга E (212,19 ± 4,9ГПа).

По результатам экспериментов по индентированию покрытия TiN установлена зависимость определяемых методом Оливера – Фарра значений модуля Юнга и твердости от нагрузки и глубины внедрения, которая иллюстрируется рис. 5.



а) б)

Рис.5. Зависимость расчётных модуля Юнга (*а*) и твёрдости (*б*) покрытия TiN, определенных из эксперимента по наноиндентированию, от глубины внедрения

Для корректного определения механических свойств покрытия учитывалась необходимость соблюдения следующих условий согласно [8]:

1. Толщина испытуемого образца должна превышать глубину индентирования минимум в 10 раз.
2. Для ограничения вклада шероховатости поверхности в неопределенность результата измерения глубины индентирования, глубина внедрения должна соответственно быть больше, как минимум в 20 раз, средней арифметической шероховатости R_a.

Из рис. 5а видно, что расчетное значение модуля Юнга (если не принимать во внимание результаты при глубине внедрения $h < 20R_a$) убывает по мере увеличения глубины вдавливания и приближается к значению, полученному для подложки, что соответствует усилению влияния упругих свойств подложки на результат эксперимента. С учетом того, что толщина покрытия составляет h = 1,557 ± 0,013 мкм, при этом R_a = 10,7 нм, корректными результатами для данной толщины можно считать результаты, полученные при силе внедрения P = 25 мН (глубина внедрения при этом составила h = 207,25 ± 15,66 нм). Таким образом, модуль Юнга покрытия TiN, определенный в соответствии с [8], составил E = 307,81 ± 19,37 ГПа.

Говорить о микротвердости (рис. 5б) образца безотносительно величины приложенной нагрузки в данном случае некорректно. Определенный практический смысл имеет сравнение твердости покрытия и подложки при одинаковой нагрузке. Так, при нагрузке 200 мН нанесение

покрытия приводит к увеличению твердости индентирования в 1,5 раза: с 3,58 до 5,85 ГПа, а при 50 мН в 4 раза: 4,02 до 16,10 ГПа.

Благодарности и признательности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-07-00343-а, 14-57-04084-Бел_мол_а, 14-07-00271-а, 15-07-05208-а). Авторы выражают отдельную благодарность руководителю НОЦ «Материалы» ДГТУ Варавке В.Н. за методическую постановку задачи и обсуждение результатов. Часть исследований была выполнена на оборудовании РЦКП ДГТУ (nano.donstu.ru).

Библиографический список

1. Zhang, S. TiN coating of tool steels: a review / S. Zhang, W. Zhu // Journal of Materials Processing Technology. — 1993. — Vol. 39. — P. 165–177.

2. Кудряков, О.В. Комплексная индент-диагностика металлокерамических нанокомпозиционных покрытий / О.В. Кудряков, В.Н. Варавка // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2014. — Т. 80, № 11. — С. 48–53.

3. Hainsworth, S.V. The effect of the substrate on the mechanical properties of TiN coatings / S.V. Hainsworth, W.C. Soh // Surface and Coatings Technology. — 2003. — Vol. 163–164. — P. 515–520.

4. H. Wang, A. Sharma, A. Kvit, Q. Wei, X. Zhang, C. C. Koch and J. Naraya. Mechanical properties of nanocrystalline and epitaxial TiN films on (100) silicon. Journal of Materials Research / Volume 16 / Issue 09 / 2001, pp 2733-2738.

5. Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности (Машиностроение, М. 2009).

6. Ресурсный центр коллективного пользования НОЦ «Материалы» Донского государственного технического университета. http://nano.donstu.ru.

7. Oliver, W.C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W.C. Oliver, G.M. Pharr // Journal of Materials Research.— 1992. — Vol. 7, iss. 6. — P. 1564–1583.

8. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний: ГОСТ Р 8.748 — 2011 (ИСО 14577-1:2002) / Государственная система обеспечения единства измерений. — Москва : Стандартинформ, 2013. — 24 с.

УДК 539.3

Эллиптическая трещина в ортотропном пространстве

Пожарский Д.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, pozharda@rambler.ru

Артамонова Е.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Аннотация. Исследуется трехмерная задача линейной теории упругости о плоской трещине нормального отрыва (разрезе) в ортотропном пространстве (материал характеризуется девятью независимыми упругими постоянными, которые входят в закон Гука). Интегральное уравнение этой задачи выводится на основе связи задачи о трещине с исследованной ранее контактной задачей о вдавливании жесткого штампа в ортотропное полупространство. При помощи теории обобщенных функций ядро интегрального уравнения удается представить в виде свободном от квадратур. В явном аналитическом виде построены решения полученного интегрального уравнения для случая эллиптической трещины, берега которой нагружены постоянной или линейной нагрузкой. Установлена структура точного решения интегрального уравнения, когда берега эллиптической трещины нагружены полиномиальной нагрузкой. Результаты могут иметь применения при расчетах на прочность анизотропных конструкций.

Ключевые слова: трещина, теория упругости, ортотропное пространство.

Abstract. The three-dimensional problem of the linear elasticity theory on a plane crack of mode I (cut) in an orthotropic space is investigated (material is characterized via nine independent elastic constants which appear in Hooke's law). The integral equation of this problem in derived using a connection between the crack problem and the contact problem earlier investigated, on a penetration of a rigid punch into an orthotropic half-space. By the help of the theory of generalized functions the kernel of the integral equation can be represented in the form free of quadratures. The solutions of the integral equation for the case of an elliptic crack loaded by constant or linear pressure have been constructed in analytical form. The exact solution structure for the case when the elliptic crack is loaded by a polynomial pressure has been established. The results can be used in calculating strengths of anisotropic constructions.

Keywords: crack, elasticity theory, orthotropic space.

В декартовых координатах рассмотрим ортотропное [1,2] упругое пространство, в плоскости $z=0$ которого возникла трещина, занимающая область Ω и поддерживаемая в открытом состоянии под действием заданной на ее берегах нормальной нагрузки $\sigma_z(x,y,\pm 0)/c_{33}=-q(x,y)$. Оси упругой симметрии совпадают с осями координат. Закон Гука в прямой форме (выражения напряжений через деформации) включает 9 независимых упругих параметров c_{ii} ($i=1,2,3,4,5,6$), c_{12}, c_{13}, c_{23} [2]. При заданных упругих параметрах, функции $q(x,y)$ и области Ω требуется определить раскрытие трещины $u_z(x,y,\pm 0)=\pm u(x,y)$. Затем может быть найден коэффициент интенсивности нормальных напряжений на контуре трещины, ответственный за ее дальнейшее распространение.

Для вывода интегрального уравнения относительно $u(x,y)$ используем интегральное уравнение контактной задачи для ортотропного полупространства [3] и связь задачи о трещины с указанной контактной задачей. В результате получим следующее интегральное уравнение:

$$\iint\limits_{\Omega} u(\xi,\eta)k(\xi-x,\eta-y)d\xi d\eta = 4\pi^2 q(x,y), \quad (x,y)\in\Omega, \tag{1}$$

где ядро формально представляется двойным интегралом Фурье

$$k(t_1,t_2) = \int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{-\infty}^{\infty} K(u_1,u_2)\exp(i(u_1t_1+u_2t_2))du_1du_2, \tag{2}$$

а символ ядра в полярных координатах имеет вид

$$K(rs_1,rs_2) = \frac{r}{a_0}\cdot\frac{p_1\mu_1\mu_2\mu_3 - p_2(\mu_1+\mu_2+\mu_3)}{\mu_1\mu_2\mu_3(\mu_1+\mu_2)(\mu_2+\mu_3)(\mu_3+\mu_1)} = rF(s_1^2,s_2^2), \tag{3}$$

$$r=\sqrt{u_1^2+u_2^2}, \quad s_1=\cos\varphi, \quad s_2=\sin\varphi,$$

$$p_1 = a_0[\Delta_1 s_1^4 + 2(2\gamma_6+\gamma_3-\gamma_7\gamma_8)s_1^2s_2^2 + \Delta_2 s_2^4],$$

$$p_2 = -(\gamma_5 s_1^2+\gamma_4 s_2^2)[\gamma_6(\Delta_1 s_1^4+\Delta_2 s_2^4) + (\Delta - 2\gamma_3\gamma_6 + 2\gamma_6\gamma_7\gamma_8)s_1^2s_2^2].$$

Здесь μ_1, μ_2, μ_3 —корни уравнения

$$a_0\mu^6 + a_2\mu^4 + a_4\mu^2 + a_6 = 0, \quad \operatorname{Re}\mu_k > 0, \quad a_0 = \gamma_4\gamma_5, \tag{4}$$

$$a_2 = -[\gamma_4(\Delta_1 - 2\gamma_5\gamma_7) + \gamma_5\gamma_6]s_1^2 - [\gamma_5(\Delta_2 - 2\gamma_4\gamma_8) + \gamma_4\gamma_6]s_2^2,$$

$$a_4 = [\gamma_6(\Delta_1 - 2\gamma_5\gamma_7) + \gamma_1\gamma_4\gamma_5]s_1^4 + [\gamma_6(\Delta_2 - 2\gamma_4\gamma_8) + \gamma_2\gamma_4\gamma_5]s_2^4 +$$

$$+ 2s_1^2s_2^2[\frac{\Delta}{2} + \gamma_9(\gamma_4+\gamma_8)(\gamma_5+\gamma_7) + \gamma_4\gamma_5\gamma_6 - \gamma_3\gamma_7\gamma_8 - \gamma_1\gamma_4\gamma_8 - \gamma_2\gamma_5\gamma_7 - \gamma_3\gamma_6],$$

$$a_6 = -(\gamma_5 s_1^2+\gamma_4 s_2^2)[\gamma_6(\gamma_1 s_1^4+\gamma_2 s_2^4) + (\gamma_1\gamma_2 - 2\gamma_3\gamma_6 - \gamma_3^2)s_1^2s_2^2],$$

$$\gamma_j = c_{jj}c_{33}^{-1}, \quad j=1,2,4,5,6, \quad \gamma_3 = c_{12}c_{33}^{-1}, \quad \gamma_7 = c_{13}c_{33}^{-1}, \quad \gamma_8 = c_{23}c_{33}^{-1}, \quad \gamma_9 = \gamma_3+\gamma_6,$$

$$\Delta_1 = \gamma_1 - \gamma_7^2, \quad \Delta_2 = \gamma_2 - \gamma_8^2, \quad \Delta = c_{33}^{-3}\det\|c_{nm}\|, \quad n,m=1,2,3.$$

Сходимость интеграла (2) понимается в рамках теории обобщенных функций. Для сходимости в обычном смысле выделим Лапласиан из ядра (2) и представим уравнение (1) в форме

$$-\Delta_{xy}\iint\limits_{\Omega} u(\xi,\eta)k_0(\xi-x,\eta-y)d\xi d\eta = 4\pi^2 q(x,y), \quad (x,y)\in\Omega, \tag{5}$$

$$k_0(t_1,t_2)=\int\limits_{-\infty}^{\infty}\int\limits_{-\infty}^{\infty}K_0(u_1,u_2)\exp(i(u_1t_1+u_2t_2))du_1du_2,\quad \Delta_{xy}=\frac{\partial^2}{\partial x^2}+\frac{\partial^2}{\partial y^2},\tag{6}$$

$$K_0(rs_1,rs_2)=\frac{1}{ra_0}\cdot\frac{p_1\mu_1\mu_2\mu_3-p_2(\mu_1+\mu_2+\mu_3)}{\mu_1\mu_2\mu_3(\mu_1+\mu_2)(\mu_2+\mu_3)(\mu_3+\mu_1)}=\frac{F(s_1^2,s_2^2)}{r}.\tag{7}$$

При помощи теории обобщенных функций ядро (6) удается представить в свободной квадратур форме

$$k_0(t_1,t_2)=\frac{2\pi}{\sqrt{t_1^2+t_2^2}}\int\limits_{-t_2}^{t_1}F(\cos^2(\arccos\frac{u}{\sqrt{t_1^2+t_2^2}}-\theta),\sin^2(\arccos\frac{u}{\sqrt{t_1^2+t_2^2}}-\theta))\times$$

$$\times\frac{\delta(u)du}{\sqrt{1-u^2/(t_1^2+t_2^2)}}=\frac{2\pi}{\sqrt{t_1^2+t_2^2}}F(\cos^2(\frac{\pi}{2}-\theta),\sin^2(\frac{\pi}{2}-\theta))=$$

$$=\frac{2\pi F(\sin^2\theta,\cos^2\theta)}{\sqrt{t_1^2+t_2^2}}=2\pi K_0(t_2,t_1).\tag{8}$$

Получим решение задачи для постоянной нагрузки q_0 на берегах эллиптической трещины

$$\Omega=\{\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}\le 1\},\quad a\ge b.\tag{9}$$

Задача сводится к интегральному уравнению (1) с ядром (2) и правой частью

$$q(x,y)=q_0.\tag{10}$$

Решение ищем в виде

$$u(x,y)=u_0\sqrt{1-x^2/a^2-y^2/b^2},\quad (x,y)\in\Omega.\tag{11}$$

При $a\ge b$ введем безразмерные величины (заметим, что правая часть в уравнении (1) уже является безразмерной)

$$x'=\frac{x}{a},\ y'=\frac{y}{a},\ \xi'=\frac{\xi}{a},\ \eta'=\frac{\eta}{a},\ u_1'=u_1a,\ u_2'=u_2a,\ k=\frac{b}{a},\ u_0'=\frac{u_0}{a},\ \Omega'=\left\{x'^2+\frac{y'^2}{k^2}\le 1\right\}.\tag{12}$$

Штрихи далее опускаем. Беря ряд интегралов, придем к соотношению для определения величины u_0

$$\frac{u_0}{4}\int\limits_0^{2\pi}F_*(\cos^2\psi,\sin^2\psi)d\psi=q_0,\tag{13}$$

$$F_*(\cos^2\psi,\sin^2\psi)=\sqrt{\cos^2\psi+k^{-2}\sin^2\psi}\;F\left(\frac{\cos^2\psi}{\cos^2\psi+k^{-2}\sin^2\psi},\frac{\sin^2\psi}{\cos^2\psi+k^{-2}\sin^2\psi}\right).$$

Аналогичное решение получено и для случая линейной нагрузки. Для случая полиномиальной нагрузки установлена следующая теорема (снова используем размерные обозначения).

Теорема. Решение интегро-дифференциального уравнения

$$-\Delta_{xy}\iint\limits_{\Omega}u(\xi,\eta)k_0(\xi-x,\eta-y)d\xi d\eta=4\pi^2R_m(x,y),\quad (x,y)\in\Omega, \tag{14}$$

где Ω — эллипс $x^2/a^2+y^2/b^2=1$, $R_m(x,y)$ — заданный полином степени m, имеет вид

$$u(x,y)=U_m(x,y)\sqrt{1-a^{-2}x^2-b^{-2}y^2}, \tag{15}$$

где $U_m(x,y)$ — полином степени m с неопределенными коэффициентами, которые можно найти путем подстановки (15) в уравнение (14).

Благодарности и признательности.

Исследование поддержано грантом РФФИ 15-01-00331.

Библиографический список

1.Лехницкий, С.Г. Теория упругости анизотропного тела / С.Г. Лехницкий. — М.: Наука, 1977. — 416 с.

2.Ding, H. Elasticity of transversely isotropic materials / Haojiang Ding, Weiqiu Chen, L. Zhang. — Dordrecht: Springer, 2006. — 435 p.

3.Ватульян, А.О. О действии жесткого штампа на анизотропное полупространство / А.О. Ватульян // В сб.: Статические и динамические смешанные задачи теории упругости. Под ред. И.И. Воровича. — Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 1983. — С. 112–115.

УДК 621.9.048.6:621.822.8

Влияние режимов обработки и рабочей среды на радиус кромки роликовых подшипников

Бабичев А.П., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, vibrotech@mail.ru

Вейесса Г.К., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, Эфиопия, uni100@yahoo.com

Вобу А.М., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, Эфиопия, ambex_45maru@yahoo.com

Аннотация. *Экспериментальные исследования проводились на вибрационном станке модели УВГ- 4 х 10, с объема рабочей камеры 10 дм^3, загрузка рабочей камеры средой составляла 2/3 объема рабочей камеры. Затем подготовленные образцы помещены в рабочую камеру и обработаны соответственно в течение 20, 40, 60, 90 минут и в других рабочих камерах0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6часов. После каждого периода обработки радиусы кромки были измерены с помощью двойного микроскопа МИС-11. Выводы* представленных результатов исследований показывает, что с увеличением времени обработки, радиус кромки деталей увеличивается и интенсивность скругления радиуса кромки оказывает влияние характеристика абразивной (инструментальной) среды и на её режущие свойства.

Ключевые слова: *округление кромок, удаление облоя, рабочая камера, абразивные среды, вибрационные технологии, заусенцы, отделочно-зачистная обработка.*

Abstract. *Experimental studies were carried out on a vibrating machine model УВГ- 4 х 10, with the volume of the working chamber 10 dm^3, by loading working chamber with working mediums of 2/3 its volume of the working chamber. Then, the prepared samples are placed in the working chamber and processed, respectively, for 20, 40, 60, 90 minutes and in the other working chambers for 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6 hours. After each treatment period the radii of the edges were measured using a double microscope МИС-11. The investigation conclusion results show that with the increasing of processing time, increasing the radius of the edge of components and intensity of the edge rounding radius by influencing characteristics of abrasive (working medium) environment and its cutting properties.*

Keywords: *Rounding edges, burr removal, working chamber, abrasive media (working medium), vibration technology, burrs, finishing and stripping process.*

Введение

Механические колебания (многие виды которых часто называют вибрациями) и волновые процессы широко представлены в физике и вибрационной технологии (ВиТ). В частности, рабочие процессы ВиТ тесно связаны с такими общими понятиями, как свободные и вынужденные колебания и их параметры, механика вибрационного воздействия на различные среды и взаимодействие среды с элементами вибрационных машин (станков), резонанс и автоколебания, устойчивые и неустойчивые колебательные системы, консервативные и диссипативные системы, нелинейные колебания механических систем, виброкипящий слой сыпучих материалов и др.

В основе исследований многих процессов вибрационной обработки (ВиО) лежат закономерности движения и взаимодействия частицы обрабатывающей среды с обрабатываемой деталью, идеализируемой в виде материальной точки [1].

Отделочно-зачистная обработка (ОЗО) объединяет группу методов безразмерной обработки деталей, преследующих своей целью: удаление заусенцев, облоя и грата; скругление острых кромок, повышение качества поверхности на операциях шлифования и полирования; декоративную отделку поверхности; подготовку поверхности под покрытия; отчистку от загрязнений, окалины, коррозии, остатков формовочной смеси и т.п. [2,3].При удалении заусенцев кромки детали должны скругляться в пределах установленного радиуса. Шероховатость поверхности после удаления заусенцев также не должна превышать установленной величины.

По способу воздействия на деталь при обработке все методы ОЗО могут быть классифицированы на механические, химико-механические, электрохимические и физические [2].

Наиболее приемлемой для удаления облоя при вибрационной обработке является его толщина, которая не должна превышать 0,5 - 0,6мм. Превышение этой величины создает серьезные трудности в выполнении указанной операции или совсем исключает возможность 100%-ноги удаления облоя [2].

Анализ технологических процессов машиностроительного производства показывает, что операции ОЗО составляют до 10-20% общей трудоемкости изготовления деталей, а количество деталей, подвергаемых ОЗО, составляет 85-95% от общего количества изготавливаемых деталей. [2]. ОЗО выполняется на различных стадиях технологических маршрутов обработки деталей в механообрабатывающем, кузнечно-прессовом и металлургическом производствах.

Операции ОЗО выполняются на различных стадиях технологических процессов изготовления деталей с применением различных видов оборудования и инструмента.

Для осуществления ОЗО в мировой практике разработан относительно большой арсенал методов, использующих абразивные инструменты и среды, гибкие металлические инструменты, лезвийный инструмент, методы поверхностного пластического деформирования, ультразвуковую обработку, химические и электрохимические методы, термо-окислительный и др.

Для деталей из пластмасс наиболее эффективно происходит удаление облоя толщиной 0,3 - 0,5 мм. Превышение этой величины вызывает значительное увеличение продолжительности обработки, что, в свою очередь, может привести к чрезмерному округлению кромок и искажению геометрических размеров обрабатываемой детали. В большинстве случаев максимально допустимой является толщина облоя не более 0,5 мм.

Удаление облоя указанной (или близкой по величине) толщины возможно только при использовании грубых режимов обработки и частиц рабочей среды крупной грануляции. Указанные

условия обработки могут быть приемлемы лишь для обработки сравнительно грубых, с достаточно прочными элементами конструкции (ребра, стенки и т.п.) деталей [2].

Опытное оборудование

Экспериментальные исследования проводились на вибрационном станке УВГ-4Х10, с объемом рабочей камеры 10дм^3; загрузка рабочей камеры средой составляла 0,75 объема рабочей камеры. Диапазон изменений амплитуд вибрационного воздействия состоял 1-3мм. Схема конструкции вибрационного станка УВГ- 4Х10 показана на рис. 1.

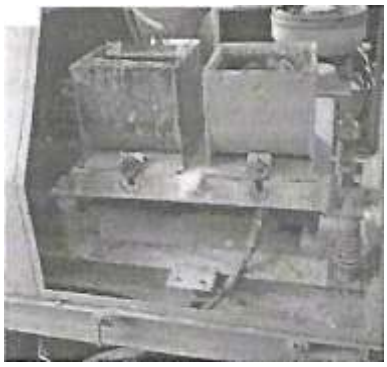


Рис.1. Вибрационный станок УВГ- 4 х 10

Рабочие среды

В качестве рабочей среды применялись абразивные призматические гранулы ПТ 15х15, Бой абразивных кругов грануляции 15х20мм, и стальные шары диаметр 7мм (рис.2)

а) ПТ 15х15б) Бой абразивных кругов) Стальные шары

Рис.2. Рабочие среды.

Методы и средства контроля

В процессе обработки заполнение рабочей камеры составляет 2/3 её объема рабочими средами. Затем подготовленные виды образцов роликовых подшипников помещены в рабочую камеру и обработаны соответственно в течение 20, 40, 60 и 90 минут. После каждого периода обработки радиусы кромки были измерены с помощью двойного Микроскопа МИС-11 (рис. 3). Результаты измерений зарегистрированы в табл. 1,2, 3 и 4 и на рис 4-7. Анализируя результаты, были сделаны следующие выводы.

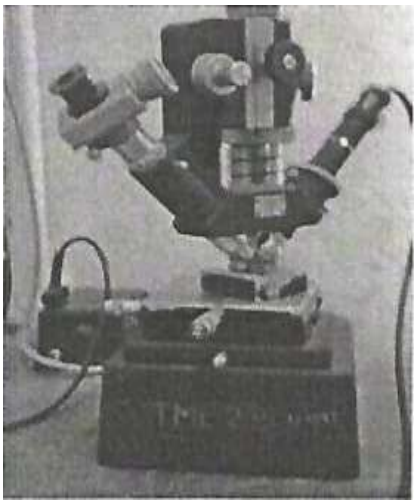


Рис.3. Микроскоп МИС-11.

А) Экспериментальные исследования проводились на вибрационном станке модели УВГ-4х10 (рис 1.), Рабочая среда ПТ 15х15, А =1...1.5mm.

Таблица 1.Результаты экспериментов влияния времени обработки на изменение радиуса кромок (абразивных гранулы ПТ 15х15, амплитуды колебаний, А=1…1.5mm.

начение исходное радиус кромки R, мкм		Время обработки (мин.)			
		20 мин, R, мкм	40 мин, R, мкм	60 мин, R, мкм	90 мин, R, мкм
R_1	55.65	58.10	71.42	73.84	74.7
R_2	40.36	42.20	72.34	91.52	110.5
R_3	51.25	56.47	74.15	89.73	123.2
R_4	31.33	36.54	55.84	83.43	91.34
R_5	69.73	71.14	73.63	81.38	88.04

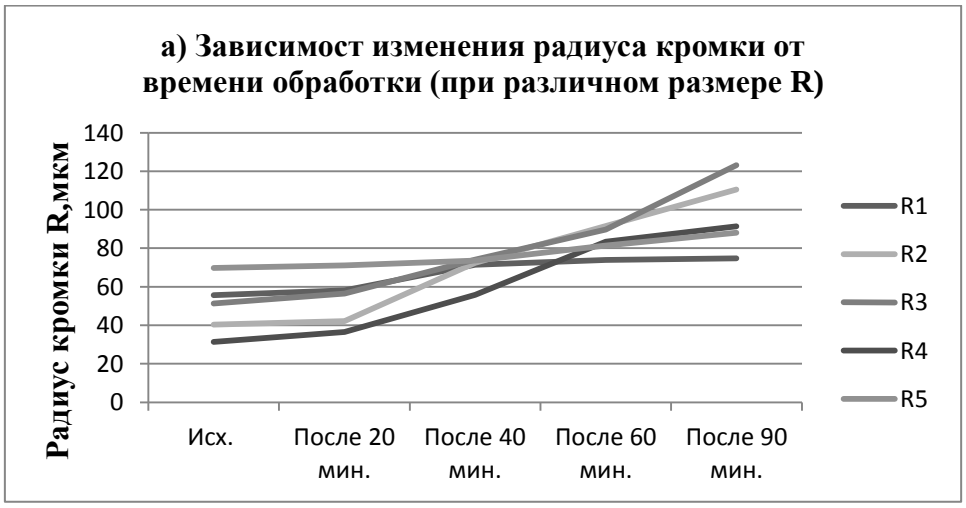


Рис.4. Влияние времени обработки на изменение радиуса кромки, Рабочая среда абразивные гранулы-ПТ 15 х 15мм,амплитуда колебаний, А = 1... 1,5mm.

Таблица 2. Изменение радиуса кромок от времени обработки t; рабочая среда грануляции-15х20мм.

Значение исходное радиуса кромки R, мкм		Время обработки t (мин.)		
		30 мин, R, мкм	60 мин, R, мкм	90 мин, R, мкм
R_1	56.66	61.54	64.34	102.0
R_2	40.86	55.8	65.41	83.45
R_3	41.25	49.7	89.4	102.6
R_4	45.35	56,43	75.13	85.4
R_5	58.73	63.45	74.10	101.56

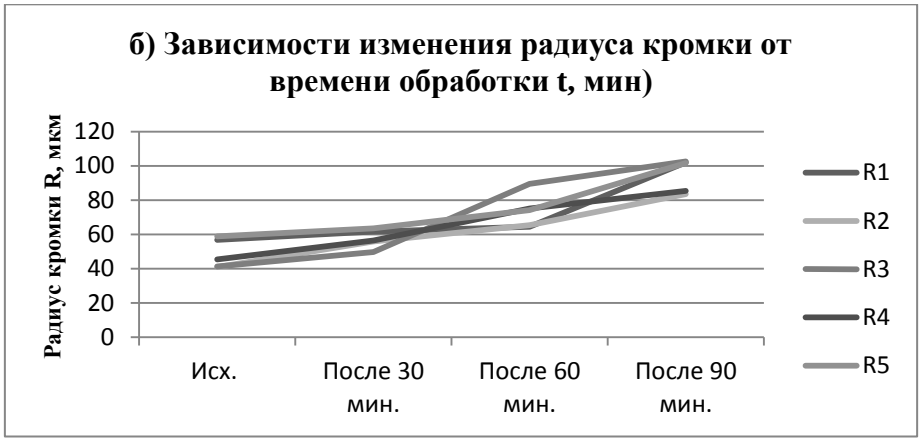


Рис.5. Влияние времени обработки на изменение радиуса кромки, Рабочая среда - бой абразивных кругов грануляции 15х20мм,амплитуда колебаний, А =1... 1,5mm.

Таблица 3. Изменение радиуса кромок от времени обработки t; рабочая среда бой абразивных кругов + стальные шары диаметр 7мм, амплитуда колебаний, А = 1..1,5мм.

Значение исходное радиуса кромки R, мкм		Время обработки t (час)					
		1, R, мкм	2, R, мкм	3, R, мкм	4, R, мкм	5, R, мкм	6, R, мкм
R_1	65.66	89.7	99.65	109.6	112.20	116.3	132.87
R_2	45.87	71.7	81.38	93.56	88.0	124.6	106.29
R_3	48.35	74.5	87.5	96.7	109.6	164.4	142.83
R_4	55.45	99.2	91.7	91.0	114.6	156.1	149.47
R_5	68.74	84.6	85.3	89.6	132.9	161.2	146.15

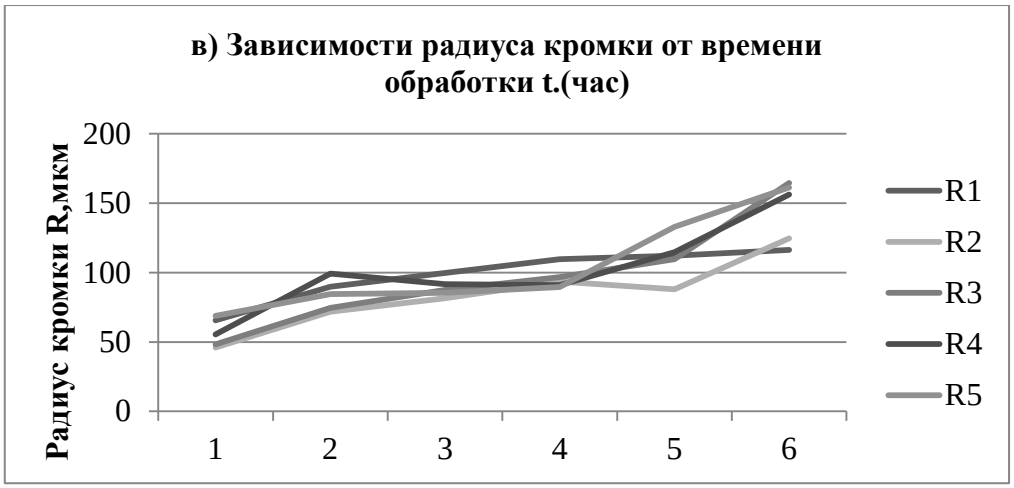


Рис.6. Влияние времени обработки на изменение радиуса кромки, Рабочая среда - бой абразивных кругов грануляции 15х20мм,амплитуда колебаний, А =1... 1,5mm.

Таблица 4. Изменение радиуса кромок от времени обработки t; рабочая среде бой абразивных кругов, амплитуда колебаний, А=3mm.

начение исходное радиус кромки R, мкм		Время обработки t (час)					
		0.5, R, мкм	1, R, мкм	2, R, мкм	3, R, мкм	4, R, мкм	5, R, мкм
R_1	95.66	109.6	164.42	234.2	265.73	315.56	325.52
R_2	98.87	111.28	217.57	215.91	232.54	293.96	368.7
R_3	95.38	109.61	137.85	157.78	222.55	247.46	302.25
R_4	87.46	91.34	147.8	192.32	202.62	332.2	325.52
R_5	88.75	107.95	182.69	296.62	338.81	297.28	285.7
R_{cp}	93.22	105.96	170.1	219.4	252.5	297.3	321.54

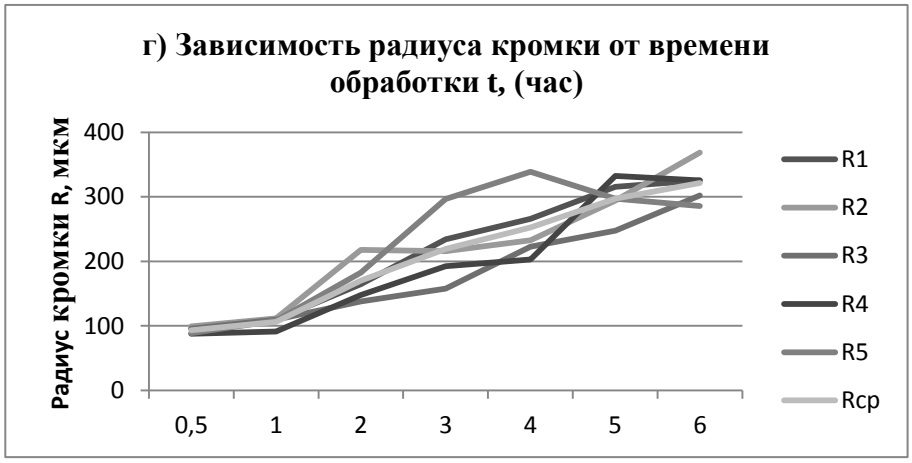


Рис.7.Влияние времени обработки на изменение радиуса кромки, рабочая среда - бой абразивных кругов грануляции 15 х 20мм,амплитуда колебаний, А = 3mm.

Выводы

Анализ представленных результатов исследований показывает, что с увеличением времени обработки, радиус кромки деталей увеличивается. Отмечено также что, на интенсивность скругления радиуса кромки оказывает влияние характеристика абразивной (инструментальной) среды, её режущие свойства. Например, наибольший радиус кромки получен в среде бой абразивных кругов,

обладающих более высокий абразивной (режущей) способностью. Следует иметь в виду, что увеличение радиуса кромки роликов подшипников качения, имеет определённые ограничения [2].

Библиографический список

1.А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. Основы вибрационной технологии. Изд. 2-е, перераб. и доп. Ростов н/Д. Издательский центр ДГТУ, 2008. 694 с.

2.А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, Л.К. Гиллеспи и др. Применение вибрационных технологий на операциях отделочно-зачистной обработки деталей (очистка мойка удаление облоя и заусенцев обработка кромок) / Ростов н/Д. Издательский центр ДГТУ, 2010.287с.

3. А.П. Бабичев, М.А. Тамаркин и др. Физико- технологические основы методов обработки: учеб. пособие / Ростов н/Д. Издательский центр ДГТУ, 2003.430 с.

УДК 621.7

Динамическая модель виброударной обработки

Анкудимов Ю.П., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,
Садовая И.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, i_sagulenko@mail.ru
Чернега Ю.Г., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. При назначении параметров виброударной обработки необходимо обеспечивать такие показатели качества поверхностного слоя как степень и глубина упрочнения (наклепа), уровень шероховатости поверхности. В статье представлена математическая модель процесса виброударной обработки поверхностного слоя деталей, обосновывающая энергетически требуемые режимы. Предложены зависимости, позволяющие с требуемой вероятностью определять минимальные значения энергетического воздействия частиц ударной среды и минимальное количество ударов, обеспечивающие равномерную обработку поверхности и достаточные для выполнения требуемых технологических операций. Модель разработана с учетом основных положений исследований А.Е. Кобринского, А.П. Бабичева, С.Н. Шевцова, Ю.Р. Копылова и дает возможность выявлять область амплитудных и временных режимов виброударной обработки, обеспечивающих смятие микронеровностей поверхности, требуемую глубину и степень деформационного упрочнения.

Ключевые слова: виброударная обработка, динамическая модель, качество поверхности.

Abstract. When assigning the parameters of vibro-processing it is necessary to provide indices of the quality of surface layer of both the degree and depth of hardening (work hardening), the level of surface roughness. The article presents a mathematical model of the vibro-impact processing of the surface layer, supporting energy-required modes. The dependencies, allowing the required probability to determine the minimum value of the energy of impact of particles of a shock environment and a minimum number of strokes, providing a uniform treatment of the surface and sufficient to perform the required manufacturing operations. The model is developed taking into account the main provisions of research A. E. Kobryn, A. P. Babichev, S. N. Shevtsova, Y. R. Kopylov and provides an opportunity to identify the region of the amplitude and time modes of the vibro-impact treatment, providing compaction, surface roughness, required depth and degree of strain hardening

Keywords: vibroimpact processing, dynamic model, surface quality.

Виброударная отработка деталей широко применяется для повышения ресурса работы самых различных деталей, работающих в условиях знакопеременных нагрузок. Эффект упрочнения достигается путем многократного упруго-пластического деформирования и передеформирования их поверхностного слоя частицами гранулированной обрабатывающей среды (чаще всего шариками из стали ШХ15) помещенными в рабочую камеру, совершающую низкочастотные колебания.

На основе модели «динамических столбиков» А.Е. Кобринского, с учетом последних работ А.П. Бабичева, С.Н. Шевцова, Ю.Р. Копылова [1,2,3,4] предложена динамическая модель процесса виброударного упрочнения.

Модель описывает процесс виброударной обработки со следующими допущениями:

- систему обрабатывающей среды составляют слои сферических тел одного размера, упакованных по «квадрату»;

- система совершает колебания в однородном гравитационном поле вдоль вертикальной оси;

- слои сферических тел взаимодействуют между собой посредством прямых центральных ударов;

- диссипативные свойства системы описываются коэффициентом восстановления K_y;

- внешнее воздействие передается нижнему слою сферических тел от дна рабочей камеры радиуса R→∞, совершающего гармонические колебания по закону $X = A_o \cdot \sin \omega t$, где A_o и ω соответственно амплитуда и круговая частота колебаний дна;

- частота колебаний системы обрабатывающей среды равна частоте колебаний дна рабочей камеры.

Используя основные положения работы [1] по динамике «столбиков» получим при соударении i и $i+1$ слоя сферических тел соотношения: $\left(U_{i,1} - V_{i+1,1}\right) \cdot K_y = V_{i+1,2} - U_{i,2}$, $V_{i,1} = U_{i,2} + g \cdot t_i^{''}$, $U_{i,1} = V_{i,2} - g \cdot t_i^{'}$, где $t_i^{''}$ - время безударного движения iслоя после соударения в $i+1$ паре слоев; $t_i^{'}$ - время безударного движения iслоя после соударения в iпаре слоев.

Поскольку скорости элементов слоев являются непостоянными на интервалах безударного движения, то принято, что: $U_{i,1}$ и $U_{i,2}$ - скорости элементов i слоя непосредственно до и после соударения в $i+1$ паре слоев, $V_{i,1}$ и $V_{i,2}$ - скорости элементов iслоя непосредственно до и после соударения в iпаре слоев.

Так как частота колебаний слоев принята равной частоте колебаний дна рабочей камеры ω, то период колебаний слоев T, перемещение слоев S_i и амплитуда их колебаний A_i будут: $T = \dfrac{2 \cdot \pi}{\omega}$, $i_i^{'} = i_i^{''} = T$, $S_i^{'} = S_{i-1}^{''} = const$, $A_i = \dfrac{1}{2} \cdot S_i^{'} = \dfrac{1}{2} S_i^{''}$.

Действительное движение слоев будет отличаться от смоделированного. Во-первых, в результате косых ударов будет иметь место смещение слоев. Во-вторых, каждый элемент слоя испытывает действие сил сухого или вязкого трения, возникающих вследствие разных скоростей отдельных элементов. Это может привести к нарушению симметрии кинематики движения. Например, время движения элементов слоев вверх $i_i^{'}$ становится меньше времени движения вниз $i_i^{''}$, однако, как показано в работе [2], это не нарушает устойчивости периодических колебательных движений среды, которые являются основным источником энергетического воздействия на обрабатываемую поверхность.

Уравнение удара первого слоя с дном рабочей камеры выразится соотношением:

$$V_{1,2} - K_{yo} \cdot V_{1,1} = \left(1 + K_{yo}\right) \cdot A_o \cdot \omega \cdot \cos \omega t,$$

где K_{yo} - коэффициент восстановления при ударе первого слоя с облицовкой дна рабочей камеры. Свойства материала облицовка целесообразно выбирать таким образом, чтобы K_{yo} приближался к единице.

Потеря энергии в i слое выразится соотношением:

$$\Delta E_i = \frac{m \cdot \left(U_{i,1}^2 - U_{i,2}^2\right)}{2} = \frac{m}{3} \cdot \frac{1 - K_y}{1 + K_y} \cdot \left(n - i\right) \cdot \left[n + \frac{1}{2} - i\right] \cdot \left(n + 1 - i\right), \quad (1)$$

где m - масса частицы слоя,

n - число слоев испытывающих периодические колебания.

Вследствие «динамической вялости», обусловленной большим числом элементов и их диссипативными свойствами, верхняя часть слоев включает элементы, движущиеся как один элемент с массой равной массе всех элементов ее составляющих. От реальной картины поведения такую систему отличает пренебрежение диссипативными свойствами верхней части и стохастическими флуктуациям скоростей, которые возникают в ней и распространяются по ее элементам сверху вниз, постепенно затухая. [1]

У нет «вялой» части загрузки массой M_i при условии $M > m \times n$, используя основные положения работы [1], приводят к значениям коэффициента потери скорости:

$$K_{Vi} = \frac{V_{i+1}}{V_i} = \frac{\left(l - i\right)^2 + 2 \cdot \left(l - n\right)^2 \cdot \left(n - i - 1\right) \cdot \frac{1 - K_y}{1 + K_y}}{\left(l - i + 1\right)^2 + 2 \cdot \left(l - n\right)^2 \cdot \left(n - i\right) \cdot \frac{1 - K_y}{1 + K_y}} \cdot \frac{l - i + 1}{l - i}, \quad (2)$$

где $l = \frac{H}{D}$ (H - высота загрузки слоев, D – диаметр сферических тел).

Максимальные значения скорости первого слоя $V_{1,2}$ в зависимости от фазы соударения с дном камеры, материала частиц и облицовки камеры находятся в пределах $A \cdot \omega \leq = V_{1,2} < 3 \cdot A \cdot \omega$.

Зная законы изменения скорости частиц рабочей среды (2) и потери энергии (1) по слоям от нижнего к верхнему, можно оценить вероятность того, что каждая точка поверхности детали получит не менее k ударов сферическим телом с энергией $E_\partial \geq E_{\partial o}$, достаточной для изменения ее параметров качества при равновероятностном попадании детали в i слой и общем числе колебаний слоев равном $\tau \cdot f$, где τ - продолжительность обработки.

$$P\left(k \leq x < \tau \cdot f\right) = \Phi_0\left(t_{\tau \cdot f}\right) - \Phi_0\left(t_k\right), \quad (3)$$

где $\Phi_0\left(t\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^t e^{-\frac{x^2}{2}} dx$ - представляет собой интеграл вероятностей

$t_{\tau \cdot f} = \frac{\tau \cdot f \cdot \left(1 - p_{B3}\right)}{\sqrt{\tau \cdot f \cdot p_{B3} \cdot \left(1 - p_{B3}\right)}}$ и $t_k = \frac{k - \tau \cdot f \cdot p_{B3}}{\sqrt{\tau \cdot f \cdot p_{B3} \cdot \left(1 - p_{B3}\right)}}$.

$p_{B3} = p_{B1} \cdot p_{B2}$,

где $p_{B1} \approx 0,78 \cdot \frac{d_0^2}{D^2}$ - геометрическая вероятность покрытия квадрата упаковки $D \times D$ следами обработки (отпечатками диаметром d_0^2) за одно колебание рабочей камеры,

$p_{B2} = 1 - F\left(E_{до}\right)$ - вероятность удара о поверхность детали слоем частиц рабочей среды обладающих энергией $E_д \geq E_{до}$, зависящая в основном от амплитудно-частотных режимов вибрации и характеристик частиц рабочей среды, где $F\left(E_д\right)$ - функция распределения энергии по слоям частиц среды.

Представленные зависимости (1), (2) и (3) позволяют использовать их для оценки энергетических возможностей виброударной обработки.

Библиографический список

1. Кобринский А.Е., Кобринский А.А. Виброударные системы. Динамика и устойчивость. - М.: Наука, 1973. – 591 с.

2. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. - Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 1998. – 624 с.

3. Шевцов С.Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах. – Ростов-на-Дону: Издательство СКНЦВШ, 2001. – 194 с.

4. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения: монография. - Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2011. – 569 с.

УДК 621.9.62

Теоретическое исследование спектров шума цилиндровых шлифовальных деревообрабатывающих станков

Чукарина И.М., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,
*Чаава М.М., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,*miho_ch@list.ru
Щерба М.Ю., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,
Стельмах А.В., Российская таможенная академия, Ростовский филиал, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Аннотация. Проведены исследования уровней шума цилиндровых деревообрабатывающих шлифовальных станков. Произведен подробный анализ причин превышения фактических значений шума и вибраций этих станков над нормативными. Проведены ряд экспериментальных исследований при обработке различных типов заготовок. Проведен анализ причин появления высоких уровней вибрации. Исследованы спектры узлов оборудования. Проведены исследования закономерности шум образования в различных областях частот. Проводимый анализ позволяет расширить используемый диапазон средств и методов по борьбе с шумом.

Ключевые слова: деревообрабатывающие станки, формирование процесса шумообразования, спектры шума.

Abstract. Conducted studies of noise levels cylinder woodworking grinders. Produced detailed analysis of the causes of exceeding the actual values of noise and vibrations of these machines over the normative. Conducted a series of experimental investigations when processing different types of work pieces. The analysis of the causes of high levels of vibration. Studied the spectra of knots of the equipment. Conducted research patterns of noise in different frequency ranges. The analysis allows to expand the range of tools and methods to combat noise.

Keywords: woodworking machines, the formation process of noise, spectra noise.

Цеха и участки с шлифовальными станками являются одними из самых неблагоприятных участков деревообрабатывающего производства, с точки зрения уровня шума. Уровни шума на этих участках значительно превышают санитарное допустимые нормы, что, в свою очередь, приводит к ухудшению здоровья работающих и к снижению производительности труда. Для возможности разработки комплекса мероприятий по доведению уровня шума до допустимых значений, необходимо, в первую очередь, провести исследования причин и структуры шумообразования интересующего нас оборудования.

В качестве объектов исследования были использованы цилиндровые шлифовальные деревообрабатывающие станки (табл.1), характерной особенностью которых является сравнительно низкий уровень технологических нагрузок при операциях. Соответственно, вибрационная энергия, поступающая в корпусные и базовые детали также незначительна и практически не приводит к изменению интенсивности излучения звуковой энергии. По сравнению с корпусными деталями, цилиндры, обладают намного меньшими жесткостями и распределенными параметрами, и,

следовательно, они являются основными источниками шума, которые и формируют процесс шумообразования всей акустической системы станка.

Это было подтверждено рядом экспериментальных исследований, которые проводились на холостом ходу и при обработке различных конфигураций заготовок из различных пород древесины. При измерениях пьезоакселлерометры к узлам станка крепились с помощью специального магнита, а к заготовкам из различных пород древесины приклеивались с помощью мастики.

Поэтому спектры шума при шлифовании претерпевают существенные изменения в сравнении со спектрами холостого хода.

Таблица 1 - Основные характеристики станков

Модель станка	Мощность, кВ	Диаметр, мм	Длина барабана бобины, мм	Частота вращения, об/мин
Трехцилиндровые				
Шл 3Ц	7,8	280	1900	1440
Шл 3Ц-12	7	280	1900	1440
Шл 3Ц-19	14	280	1900	1440
Шл 3Ц-2	7	380	2000	1440
Шл 3ЦВ	7	280	2000	1440
Шл 3ЦВ-19	10	280	2000	1500

В процессе экспериментов фиксировались октавные уровни звукового давления и октавные уровни виброускорения.

Учитывая, что процесс шумообразования определяется виброскоростями, а не виброускорениями, то уровни виброускорения пересчитывались в уровни виброскорости по формуле:

$$L_V = L_A - 20\lg f + 60, \qquad (1)$$

где L_V– уровни виброскорости, дБ;

L_A – уровни виброускорения дБ;

f-среднегеометрические частоты октавных полос, Гц.

Для практических расчетов зависимость (1) удобнее привести к следующему виду:

Частота, Гц	Уровень виброскорости, дБ
31,5	$L_V=L_A+30$
63	$L_V=L_A+24$
125	$L_V=L_A+18$
250	$L_V=L_A+12$

500	$L_V=L_A+6$
1000	$L_V=L_A$
2000	$L_V=L_A-6$
4000	$L_V=L_A-12$
8000	$L_V=L_A-18$

Формирование процесса шумообразования показано на примере наименее и наиболее шумоактивных станков.

У станков со значительной мощностью привода главного движения уже на холостом ходу уровни звукового давления превышают предельно-допустимые значения.

В частности, у двухдискового станка Шл 2Д уровень звукового давления в пятой октаве превышает санитарную норму на 2-3 дБ, а шестой октаве практически находится на предельно-допустимом значении (рис. 1).

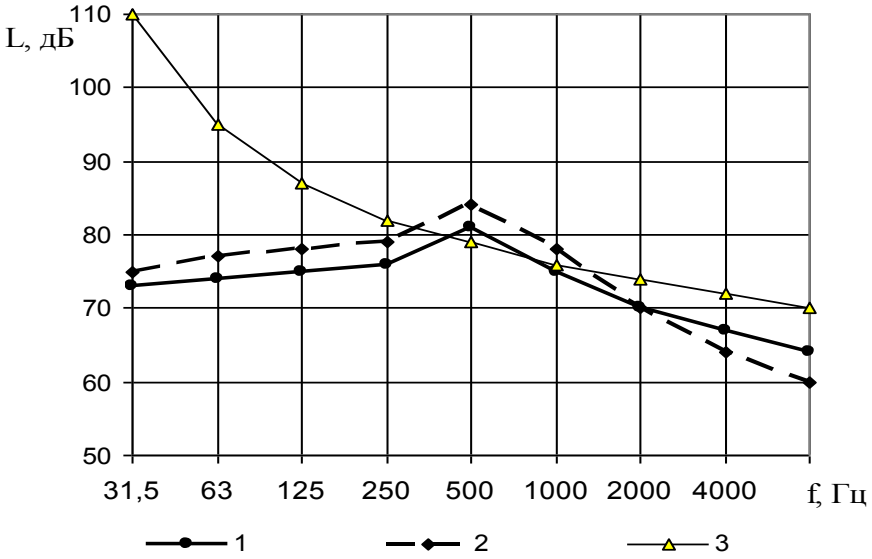


Рисунок 1 - Спектры шума холостого хода: 1 – двухдискового Шл2Д;
2 – трехцилиндровых Шл3Ц-19 и Шл3ЦВ-19; 3- предельный спектр

У трехцилиндровых станков уровни звукового давления на холостом ходу превышают предельно-допустимые в пятой и шестой октавах на 5 и 3 дБ соответственно. У этих станков двигатель располагается в станине и можно предположить, что повышенные уровни шума на 500 и 100 Гц создаются подшипниками шлифовального узла.

Эти выводы подтверждены и уточняются измерениями вибрации на основных узлах (рис. 2).

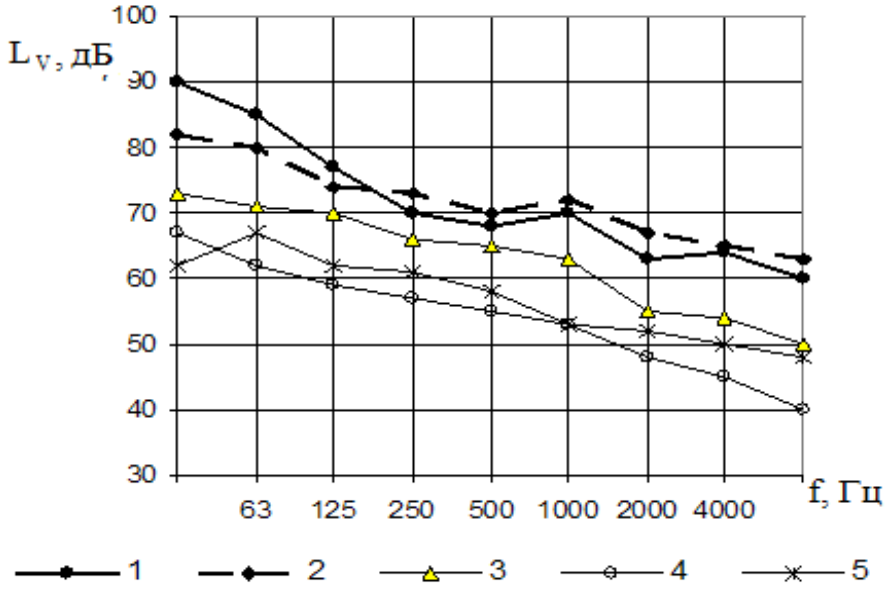


Рисунок 2 - Спектры виброскорости: 1 – на ограждении диска станков Шл2Д; 2 – на подшипниковых узлах цилиндровых станков; 3 – на корпусе двигателя Шл2Д; 4 – на столе; 5 – на станине

Наиболее высокие уровни вибрации зафиксированы на ограждении шлифовального диска и подшипниковых узлах цилиндровых станков. Спектры этих узлов имеют интенсивные уровни вибрации в области средних и высоких частот, т. е. в достаточно широкополосном диапазоне 250-8000 Гц. Спектр вибраций корпуса двигателя станков ШлДБ более низкочастотный. Его спектральный состав характеризуется равномерным спадом интенсивности вибраций 3-4 дБ на октаву. Уровни вибраций корпуса двигателя на 5-10 дБ ниже, чем на ограждении диска. Причем эта закономерность сохраняется во всем частотном диапазоне 31,5 – 8000 Гц.

Для цилиндровых станков закономерности шумообразования, в области частот 250 – 1000 Гц представляют особый интерес (рис. 3). Можно предположить, что в этом интервале значительное влияние оказывает звуковое излучение самого шлифовального цилиндра. Цилиндр имеет большую длину (1,9 – 2 м) и поэтому его спектр собственных форм колебаний более низкочастотный. Кроме этого непосредственно в этом интервале частот происходит интенсивное излучение звуковой энергии подшипниковых узлов.

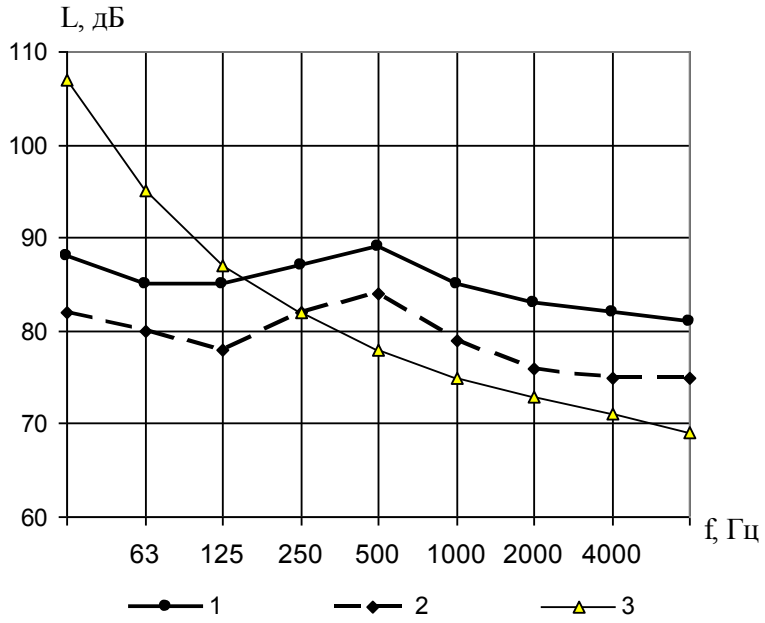


Рисунок3 - Спектры шума цилиндровых станков: 1 – Шл3Ц-19;
2 – Шл3ЦВ; 3 – предельный спектр.

Разница в уровнях звукового давления этих станков составляет 6-8 дБ. Теоретическое значение $\Delta L = 20\lg 14/7 = 20\lg 2 = 7$ дБ., т.е. сходимость расчетных и экспериментальных величин еще выше.

На основании вышеприведенных результатов экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что уровень звукового давления деревообрабатывающих станков в широкой полосе частот от 6 до 12 дБ, превышает максимально допустимый и необходимо разрабатывать комплекс мероприятий по его снижению.

Библиографический список

1. Металлорежущие станки и деревообрабатывающее оборудование. Машиностроение. Энциклопедия. - Т. IV-7/Б.И. Черпаков, О.И. Аверьянов, Г.А. Адоян и др.// Под ред. Б.И. Черпакова. - М.: Машиностроение, 1999. -863 с

2. Борисов Л.П., Гужас Д.Р. Звукоизоляция в машиностроении.-М.: Машиностроение, 1990.- 256 с.

3. Месхи Б.Ч., Рябых Г.Ю. Виброакустические характеристики и запыленность деревообрабатывающего оборудования. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2007. - 153 с.

УДК: 628.477:631.3:621

Технологические и организационно-экономические аспекты утилизации изделий сельхозмашиностроения

Бабичев А.П., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Глазман Б.С., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Веснин В.Н., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, vesnin.1991@mail.ru
Вейсса Г.К., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, Эфиопия
Лавренова Т.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Abstract. In this article, I was painted circle agricultural machinery details and the fact that many components and assemblies can serve at their disposal. There was also the problem of disposing of old farm machinery in Russia. We describe all the steps to solve this problem by the government of the Russian Federation. Also referred to as the leading enterprises for the production of agricultural machinery in the Rostov region implement and use the recycling program of old agricultural machinery.

Ключевые слова: жизненный цикл, утилизация, комбайн, сельхозтехника, замена парка техники, трактор, правительство.

Аннотация. В статье рассмотрена ситуация с методами утилизациями сельхозтехники в России. Так же подробно описаны все те действия, которые принимались в данном направлении различными организациями и нашем правительством. В статье приведен пример успешной утилизации на зарубежном предприятии. А именно, финский завод «Valtra». Проведен анализ и возможность внедрения данной методики на предприятии ОАО «Ростсельмаш»

Keywords: life cycle, utilization, grain harvesters, agricultural machinery, replacement of machines, tractors, government.

Жизненный цикл изделия — совокупность процессов, выполняемых от момента выявления потребностей общества в определенной продукции до момента удовлетворения этих потребностей и утилизации продукта.

Жизненный цикл включает период от возникновения потребности в создании продукции до её ликвидации вследствие исчерпания потребительских свойств. Этапы жизненного цикла изделий включают: маркетинговые исследования, проектирование продукта, планирование и разработка процесса, закупка, производство или обслуживание, проверка, упаковка и хранение, продажа и распределение, монтаж и наладка, техническая поддержка и обслуживание, эксплуатация по назначению, послепродажная деятельность, утилизация и(или) переработка. Применяется по отношению к продукции с высокими потребительскими свойствами и к сложной наукоёмкой продукции высокотехнологичных предприятий.

Этапы жизненного цикла:

Маркетинговое исследование; проектирование продукта; планирование и разработка процесса; закупка исходных материалов и комплектующих; производство и обслуживание; монтаж; техническая поддержка и обслуживание; эксплуатация по назначению; послепродажная деятельность; утилизация.

Учёт этапов жизненного цикла позволяет уменьшить издержки на доработку изделия или даже предотвратить возможную катастрофу вследствие действия «непредусмотренных» обстоятельств, рационально спланировать деятельность по созданию и обслуживанию продукции, но при этом существенно усложняется задача проектирования и производства продукции. Однако возможность её решения достигается применением автоматизированных систем управления.

Автоматизация проектирования осуществляется соответствующими системами. В САПР машиностроительных отраслей промышленности принято выделять системы функционального, конструкторского и технологического проектирования.

В практической деятельности используется большое количество изделий машиностроения, которое неуклонно растет и будет нарастать в будущем. Большую долю в этом арсенале информации составляют автомобили, техника с/х и пищевых производств и другие изделия массового производства. С течением времени каждое изделие по различным причинам прекращает свой жизненный цикл (физический или моральный износ, аварийные и т.п. ситуации).

На этой стадии встает вопрос: как, не захламляя и не загрязняя окружающую среду, квалицированного утилизировать изделия машиностроения, срок которых подошел концу. Лишь в последние годы в ряде стран, в том числе и в России предприняты первые шаги по упорядочиванию утилизации изделий, более рациональному использованию их комплектующих и материалов. К такому итогу привели результаты исследований, которые выявили, что по окончании ЖЦ Изделия до 70 % (а иногда, до 90%) его элементов (агрегатов, узлов, деталей) не выработали свой ресурс и могут еще длительное время использоваться в аналогичных или других типах изделий. На частных рынках помимо новых запчастей предлагается немало деталей, полученных в результате разборки «выброшенных» изделий (вторичное использование).

Начатые работы по утилизации изделий чаще ведутся весьма упрощенным способом: изделие главным образом подвергается разрушению с последующим использованием металлической составляющей для переплава и лишь незначительная часть комплектующих (отдельные агрегаты и узлы) попадают на рынок для рационального повторного использования. Более полное использование предметов утилизации связано с рядом трудностей и прежде всего с отсутствием технологий разборки утилизируемых изделий/ восстановление свойств отдельных элементов (узлов, деталей) организационных форм классификации и путей эффективной реализации. При достаточно высоком уровне технологии производства новых изделий, технология их утилизации находятся в зачаточном состоянии. Традиционная технология и организация производства сориентирована на

преимущественное использование первичных ресурсов при высоких энергозатратах, большой доле промышленных выбросов и масштабном загрязнении природной среды (воздуха, вод, почв). В этой связи рациональное решение проблемы утилизации несомненно направлено на существенные экономические и экологические выгоды.

Решение проблемы утилизации должно быть комплексным и включать: организационно-экономические, технологические и экологические аспекты, разработку технологии утилизации, ее оснащение, организацию сбора и приема изделий на утилизацию, разборка, классификация, реализация. Осуществление утилизации изделий связано с выполнением таких операций, как разборка, очистка, мойка, восстановление. В НИИ «ВиТ» ДГТУ имеются первичные результаты исследований проблемы технологии утилизации изделий машиностроения, накоплен некоторый опыт работы в области упомянутой тематики (отчеты НИР, диссертационные работы, публикации). Работы в этой области требуют дальнейшей разработки реализации и поддержки.

Впервые идея об утилизации и замене парка сельскохозяйственной техники новыми комбайнами и тракторами была озвучена в 2011 году.

Она основана на предоставлении денежной компенсации владельцам изношенной техники при приобретении ими техники новой по принципу российской программы утилизации подержанных автомобилей. Предлагалось распространить программу утилизации автомобилей на сельхозтехнику. При сдаче трактора или комбайна старше 10 лет предполагалось получить около 1 млн. руб. на покупку нового.

Таким образом, посредством этой программы решить одновременно две задачи - содействовать обновлению сельскохозяйственного парка машин в стране и поддержать отечественных производителей сельскохозяйственной техники.

В программе отражены довольно жесткие требования к уровню локализации производства не меньше 50% (причем в России должна производиться сварка, окраска и сборка рамы и кабины), российское предприятие также должно было обладать правами интеллектуальной собственности на выпускаемую технику. В итоге принять участие в программе смогли только традиционные российские производители: например, «Ростсельмаш», «Автоваз», «Камаз» и др.

По предварительным расчетам Минпромторга, общая стоимость программы на три года должна составить 3,5-4 млрд. руб. Но участники совещания, министерство предлагали в 2011 году установить общий объем субсидий из федерального бюджета в объеме 1,3 млрд. руб., а размер утилизационной премии — на уровне 18% от стоимости новой техники, или 540 тыс. руб. на единицу техники. В Минпромторге полагают, что в рамках программы утилизации может быть реализовано около 30% от общего объема производства сельхозтехники в РФ — 2,5 тыс. единиц (при этом общий объем производства сохранится на уровне 2009 года — около 7 тыс. штук).

Была также и альтернативная программа, подготовленная ассоциацией производителей сельхозтехники «Росагромаш». Ее стоимость превышает расчеты Минпромторга вчетверо. «Росагромаш» тоже предлагает установить размер утилизационной премии на уровне 18% от стоимости единицы сельхозтехники, однако среднюю стоимость одной сельхозмашины в 2011 году ассоциация оценила на 2 млн. руб. дороже Минпромторга, поэтому общая стоимость программы «Росагромаша» на 2011 год оценивается в размере не менее 5 млрд. руб., а предлагаемая утилизационная премия должна составить около 1 млн. руб. При этом «Росагромаш», в отличие от Минпромторга, прогнозирует рост производства до 10-12 тыс. штук сельхозтехники в год.

В Правительстве изучали два различных по стоимости варианта: Минпромторг оценивал программу в 4 млрд. руб. на 3 года, альтернативный вариант «Росагромаша» оценивался в 15 млрд. руб.

Реализация программы утилизации старой сельхозтехники в России начата в 2012г. При проведении этой программы правительство РФ учло опыт программы утилизации легковых автомобилей. На 2012 год доля «отработавших свой срок» комбайнов и тракторов составляет примерно 70-80% и эту проблему необходимо было решать.

На первых этапах выделено 3,5 млрд. рублей. Впоследствии финансирование программы продолжено. В результате выполнения программы российские заводы получали дополнительные заказы, а агропромышленный комплекс (АПК) смог приступить к масштабному техническому перевооружению. Важное значение в проведении данной программы составляло и в том, чтобы утилизация принесла пользу не только крупным предприятиям, но и средним и малым формам хозяйствования на селе.

Из опыта исследования проблемы утилизации в нашем регионе известны работы фирмы ООО «Ростовский специализированный центр утилизации» - экологическая компания, осуществляющая на рынке Северного Кавказа деятельность по утилизации всех видов отходов, а также утилизации старых автомобилей, сельскохозяйственной и оборонной техники. Компания входит в состав крупнейшей на Северном Кавказе общественной организации Ассоциация «Экология Кавказа», которая объединяет более 160 предприятий ЮФО.

Владельцам изношенных комбайнов и тракторов предоставляются сертификаты на получение субсидии для приобретения новых машин под марками "Ростсельмаш" и "Версатайл" ("Versatile") за счет средств компании. Размеры субсидий регламентированы, и, в зависимости от выбранной модели сельскохозяйственной машины, составляют до 650 тыс. рублей. "Для получения сертификата, необходимо предоставить подтвержденную информацию о выводе из эксплуатации старой техники". По информации краевого министерства сельского хозяйства, для участия в программе модернизации принимаются любые старые зерно- и кормоуборочные комбайны, а также тракторы с шарнирно-сочлененной рамой, вне зависимости от марки, года выпуска, страны

производства и срока владения. Программа модернизации была совместима также с льготными программами кредитования Россельхозбанка и Сбербанка РФ.

На сегодняшний день данная программа в полной мере не реализована. На самом крупном заводе сельхозтехники юга России, Ростсельмаш, есть все условия, чтобы воплотить данную программу, в полном объеме, в жизнь. Данное предприятие имеет в своем активе большие производственные площади, на которых можно развернуть линию по утилизации техники. Саму схему утилизации можно позаимствовать у других заводов, чем разрабатывать свою собственную. На пример, можно взять опыт утилизации завода «Valtra» (Финляндия). Для утилизации выделен отдельный цех. Цикл работы такова: прием, мойка, дефектация, разборка, вторичная дефектация, разделение (отбор деталей, годных для вторичного использования). Отобранные детали посылаются в соответствующие цеха основного производства. В них определяется номенклатура пригодных для дальнейшего производства деталей. Отходы отправляются в пресс. С потребителями продукции предприятие заключает договор на поставку нужных восстановленных деталей. Полагаем, что такая система организации утилизации могла прижиться и в России.

Все это будет дешевле, чем разработка с нуля собственной линии утилизации техники. Но Ростсельмаш, как и остальные более мелкие, не строят долгосрочных планов и вкладов. Так как есть большой спрос на реализацию новой сельхозтехники техники и он перекрывает все затраты предприятий. Утилизация-это довольно таки долгий процесс, требующий большого времени, сил и средств, но наши предприятия пока к этому не готовы.

Библиографический список

1. Диссертация Кайибанда Венан: Совершенствование технологии ремонта и утилизации изделий машиностроения применением вибрационных технологий(2010).

УДК 621

Оценка предельно - эффективной упрочняемости деталей динамическими методами ППД

Лебедев В.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Штынь С.Ю., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Кочубей А.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация Предложен расчётно-аналитический подход к оценке величины предельной твёрдости упрочнённых поверхностных слоёв, основанный на термодинамической теории прочности и разрушения твердых тел. На основе структурно-энергетической интерпретации процесса ППД установлено уравнение, описывающее предельно допустимое значение твердости упрочненного слоя, обеспечивающее эффективного влияние на повышение эксплуатационных свойств деталей. Исходя из предположения, что величина предельной плотности скрытой энергии накапливаемой в локальном микрообъеме поверхностного слоя в процессе его упрочнения коррелирует с известной термодинамической характеристикой металлов, определяемой как разность энтальпии данного материала в твердом состоянии при температуре плавления и энтальпии при 293^0К, получено выражение для оценки предельной твердости упрочненного поверхностного слоя.

Ключевые слова: упрочнение, поверхностный слой, твёрдость, скрытая энергия, энтальпия

Abstract A settlement and analytical approach to the assessment of the value of the limit hardness hardened surface layers, based on thermodynamic theory of strength and fracture of solids. On the basis of structural and energetic interpretation of PPD found an equation describing the limit value of hardness of the hardened layer, provides an effective influence on the increase of operational properties of parts. On the assumption that the value of the limiting density of latent energy accumulated in the local micro volume of the surface layer in the process of hardening is correlated with the known thermodynamic characteristics of metals, defined as the difference between the enthalpy of the material in the solid state at the melting temperature and enthalpy at 2930K, the expression for evaluating the marginal hardness hardened surface layer.

Keywords: hardening, surface layer, hardness, latent energy, enthalpy

Основным параметром, используемым для оценки состояния качества поверхностного слоя материалов после упрочняющих обработок, оказывающим наиболее существенное влияние на повышение эксплуатационных свойств деталей машин является его твердость. Однако, как следует из многочисленных исследований, для каждого материала существует оптимальная степень твердости наклепанного материала и дальнейшее упрочнение является нецелесообразным. Из этого следует, что для предотвращения образования трещин и обеспечения повышенной работоспособности, упрочненных поверхностей у изделий требуется применение комплексного подхода к оценке новых структурных состояний. В частности, требуется оценка локальной предельной деформации упрочненных слоев, связанной с релаксационной способностью, дефектностью, кинетикой распада разных метастабильных структур во времени и т.д.

Накопленный к настоящему времени теоретический и экспериментальный материал по исследованию влияния методов упрочняющей обработки на изменение физико-механических характеристик поверхностного слоя различных по марке и наименованию материалов позволяет предложить расчётно-аналитический подход к оценке величины предельной твёрдости упрочнённых поверхностных слоёв, основанный на термодинамической теории прочности и разрушения твердых тел [1]. Из этой теории следует, что ответственной за упрочнение поверхностного слоя является величина потенциальной (скрытой) энергии накапливаемой в нем в процессе обработки.

В соответствии с теорией дислокаций между плотностью скрытой энергии E и интенсивностью напряженийσ_i, возникающих в зоне локального контакта индентора с обрабатываемой поверхностью, существует взаимная связь

$\sigma_i^2 = 6GE/K_\sigma^2$,(1)

гдеG – модуль сдвига;K_σ- коэффициент, оценивающий степень перенапряжения на межатомных связях .

Результаты статистической обработки экспериментальных данных, приведённые в работе [2],позволяют представить обобщенную зависимость между твердостью и интенсивностью напряжения в виде

$\sigma_i = 0.067HV^{1.2}$,(2)

а K_σ с достаточной степенью точности определить по следующейформуле

$K_\sigma = \frac{1}{1.2\cdot10^{-3}+6.47\cdot10^{-6}HV}$,(3)

где HV – твердость материала по Виккерсу.

О высокой степени универсальности полученных формул свидетельствует высокой коэффициент корреляции r=0,956.

Установленный характер зависимости интенсивности напряжений от твердости HV представляет интерес с позиций возможности прогнозирования повреждаемости поверхностного слоя при упрочнении, а также для определения предельного значения твердости упрочненного слоя $HV_{\text{пс}}^*$, при которой достигается наибольший эффект упрочнения с точки зрения повышения эксплуатационных свойств деталей.

Учитывая, что интенсивность напряженийσ_iсвязана с твердостью HV соотношением (2), то из выражения (1) получим зависимость для оценки плотности скрытой энергии, накапливаемой в упрочняемом поверхностном слое в виде

$E = K_{\text{пр}} \cdot HV_{\text{пс}}^{2.4}$,(4)

где $K_{\text{пр}} = \frac{1}{6G}\left(\frac{1}{1.2\cdot10^{-3}+6.47\cdot10^{-6}HV}\right)^2$-коэффициент, характеризующий прочностные свойства упрочняемого материала;

$HV_{\text{пс}}$–твердость поверхностного слоя, формируемого в процессе упрочняющей обработки.

Согласно структурно-энергетический интерпретации процесса упрочнения наибольший эффект упрочняющей обработки достигается когда плотность накопленной в поверхностном слое обрабатываемого материала скрытой энергии E достигает предельной величины E^*. Тогда по уравнению (4) предельно допустимое значение твердости упрочненного слоя, обеспечивающее эффективного влияние на повышение эксплуатационных свойств деталей, будет равно

$$HV_{\text{пс}}^{*}=\left(E^{*}/K_{\text{пр}}\right)^{0.42}.$$

Если принять, что величина предельной плотности скрытой энергии E^*, накапливаемой в локальном микрообъеме поверхностного слоя в процессе его упрочнения коррелирует с известной термодинамической характеристикой металлов, определяемой как разность энтальпии данного материала в твердом состоянии при температуре плавленияH_{TS} и энтальпииH_{293} при $293^{0}K$, то выражение для оценки предельной твердости упрочненного поверхностного слоя можно представить в виде

$$HV_{\text{пс}}^{*}=\left[\Delta H/K_{\text{пр}}\right]^{0.42},\Delta H=H_{TS}-H_{293}$$

Библиографический список

1.Лебедев В.А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования. Научное издание– Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006 – 183 с.

2. Федоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твердых тел / Федоров В.В. –Ташкент: Издательство ФАН, 1979-168 с

.

УДК 621.787.6

Экспериментальные исследования одностороннего виброволнового нагружения сплошного изогнутого образца

Бабичев А.П., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Бирюков Д.Д., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Гомцян Г.С., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, vibrotech@mail.ru

Аннотация. В предлагаемой статье представлены результаты экспериментального исследования взаимодействия виброволнового нагружения на состояние материала сплошного изогнутого образца. Отмечены особенности воздействия нагружения на лицевую (нагружаемую) и свободную (тыльную) поверхности образца в зависимости от исходного состояния материала образца и продолжительности виброволного воздействия.

Ключевые слова: виброволновое нагружение, волны деформаций, лицевая и тыльная сторона, отражённая волна.

Abstract. The article presents the results of experimental studies of the interaction of vibrowave loading on the material properties of a curved solid sample. The marked characteristics of the impact loading on the front (loaded) and free (back) surface of the sample depending on the initial state of the sample material and the length of vibrowave action.

Keywords: vibrowave loading, wave deformation, the front and back side, the reflected wave.

Интерес к виброволновым явлениям в процессах металлообработки обусловлен их широким применением в физике деформационных процессов и всё большим проникновением волновых и виброволновых методов обработки в технологические процессы. Многочисленные работы посвящены проблемам создания прогрессивных технологических процессов на основе использования импульсного волнового деформационного воздействия волн. Проблема деформации и разрушения материалов и сред волновым воздействием привлекает всё большее внимание технологов и конструкторов.

Целью эксперимента является изучение особенностей взаимодействия волн деформаций с материалом (образцами), подвергаемого виброволновому одностороннему нагружению. В работах [1, 2, 3] отмечаются изменения состояния материала при одностороннем нагружении не только на лицевой (нагружаемой) поверхности, но и на противоположной (тыльной) не подвергаемой нагружению поверхности. При определённых условиях на тыльной стороне отмечаются так называемые откольные явления [1, 2]. В технологии упрочняющей обработки динамическими методами поверхностного пластического деформирования (ППД) деталей в виде труб или с другими закрытыми поверхностями обычно упрочнению подвергается наружная поверхность. С учётом упомянутых выше работ представляет интерес, какие изменения происходят на противоположной (тыльной) стороне, подвергаемых воздействию отражённых волн.

С этой целью выполнены экспериментальные исследования с изготовлением специальных образцов представленных на рисунке 1. Форма образцов предусматривает возможность нагружения одной стороны (лицевой) и изоляцию противоположной (тыльной) стороны при виброволной обработке в среде стальных шаров диаметром 7 мм. Важным условием является обеспечение сплошности материала для распространения продольных волн и исключение переходов, сварных швов или разъёмов другого вида. Другим условием являлось удобство измерений результатов изменения микротвёрдости торцовых поверхностей (лицевой и тыльной).

Режимы продолжительность обработки – Амплитуда и частота колебаний А=2,5 мм, f=30 Гц, t=30 и 60 минут, Материал образца – сталь 30ХГСА сырая.

Результаты обработки представлены в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1.

Среднее значение Hv 200		
	Лицевая (Л)	Тыльная (Т)
Исх.	164	181
Обр. 30’	193	216

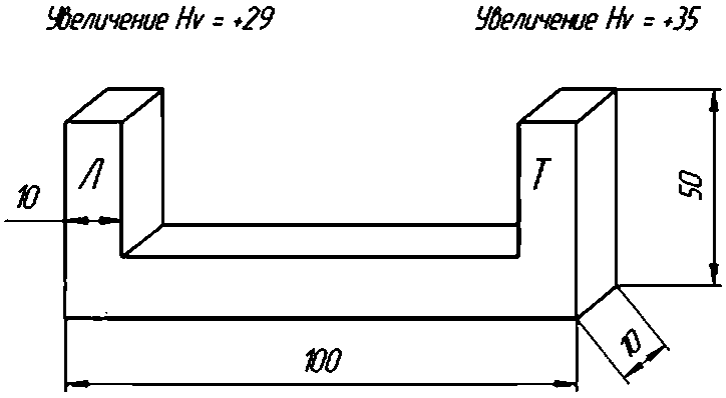


Рисунок 1.

Указанные образцы после истечения 30 дней были подвергнуты повторной обработке в тех же условиях при продолжительности 60 минут. Полученные результаты предъявлены в таблице 2 и рисунке 2.

Таблица 2.

Среднее значение Hv 200		
	Лицевая (Л)	Тыльная (Т)
Исх.	193	216
Обр. 60’	172	175

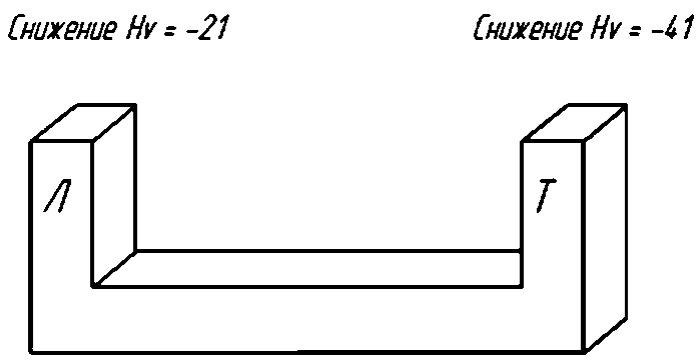


Рисунок 2.

Вывод: Виброволновое одностороннее нагружение образца сопровождается изменением физико-механических свойств как лицевой (нагружаемой), так и тыльной (не подвергаемой виброволновому воздействию) поверхностей. При этом, в зависимости от исходного состояния материала образцов и продолжительности виброволнового воздействия отмечается увеличение или снижение Hv (рис. 1 и 2). Взаимодействие отражённых волн на тыльной стороне сопровождается более интенсивным изменением Hv этой поверхности по сравнению с лицевой.

В условиях рассматриваемого эксперимента не планировалось варьирование более широкого диапазона времени обработки, изменение режима виброволнового воздействия и других условий, которые окажут влияние на результаты эксперимента.

Библиографический список

1. Н.Х. Ахмадеев, Р.И. Нигматулин. «Динамическое откольное разрушение в волнах разгрузки». ПМТФ -1981, №3, с. 1131 – 1134.

2. В.А. Баскаков. «Анализ распространения и динамического воздействия ударных волн на деформируемое твердое тело», Автореферат диссертации на соискание ученой степени д-ра физ.-мат. наук, Чебоксары, 1991. с.39.

3. В.А. Баскаков «О возможности откола в металлах под действием волн разгрузки» // Межвуз. сб.: Прикл. задачи МСС. – Воронеж, 1988, с. 35-39.

4. А.П. Бабичев «Основы вибрационной технологии» изд. 2-е, перераб и доп. – Ростов-на-Дону, Издательский центр ДГТУ, 2008. -694с.

УДК 621.002.539.3(075.8)

Моделирование процесса ППД свободнодвижущимися инденторами

Лебедев В.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Кочубей А.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Ломовцев А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация Предложен методологический подход к моделированию процессов поверхностного пластического деформирования потоками свободно движущихся инденторов при обработке деталей динамическими методами ППД. На примере виброударной технологической системы показано, что при проектировании операций ППД очень важно определить то оптимальное соотношение между амплитудой и частотой, при котором удается достичь требуемых высоких скоростей частиц массы загрузки, понизив амплитуду колебаний. Сделать это возможно на основе модельного описания технологического процесса, которое включало бы в себя основные явления, происходящие при обработке. Установлен критерий эффективной загрузки обрабатывающей среды в рабочую камеру, обеспечивающий стационарные виброударные колебания своодно движущихся инденторов в процессе обработки деталей. Показано, что структура принятой модели и введенные упрощения определяют перечень параметров, управляющих процессом ППД.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, свободно движущиеся инденторы. виброударная система, колебания, ударный импульс, модель

Abstract A methodological approach to the modeling of surface plastic deformation flows free moving indenters when handling components dynamic methods PPD. For example vibroimpact technological system it shows that the design of operations PPD is very important to determine what the optimal ratio between the amplitude and the frequency at which it is possible to achieve the required high-speed particle load of a low amplitude vibrations. To make it possible on the basis of the model description of the process, which would include the main phenomena occurring during processing. The criterion of the effective load of processing medium to the working chamber, providing stationary vibro-impact swings free moving indenters during machining. It is shown that the structure of the adopted model and the introduction of a simplified define the list of parameters that control the process of PPD.

Keywords: surface plastic deformation, free-indenters. vibro-impact system, vibrations, shock pulse model

Важнейшим фактором, определяющим интенсивность процесса поверхностного пластического деформирования (ППД) и, следовательно, производительность операций упрочнения динамическими методами, является динамическое состояние обрабатывающей среды. В этой связи разработка методов моделирования и проектирования, эффективных по производительности технологических систем и средств их технологического оснащения является основной задачей при разработке операций упрочнения ППД. Решение этой задачи рассмотрим на примере моделирования наиболее распространенного в машиностроительной практике метода упрочняющей обработки ППД свободнодвижущимися инденторами – виброударного упрочнения [1,2].

Технологическая обработка этим методом может осуществляться как на вибростанках, создающим циркуляцию обрабатывающей среды, так и на вибростанках с возвратно-поступательным движением среды. Однако, как свидетельствует производственная практика, наибольший эффект от применения виброударного упрочнения достигается когда эту технологическую операцию выполняют на станках с возвратно-поступательным движением среды, у которых масса обрабатывающей среды в виде металлических сферических инденторов в один полупериод колебаний отбрасывается на поверхность детали, в другой полупериод отскочившие от детали инденторы возвращаются к активной стенке рабочей камеры. Такая обработка реализуется, например, при виброупрочнении лонжерона лопасти вертолета на станке с однокоординатной вибрацией, возбуждаемой парой движущихся навстречу дебалансных вибраторов. Амплитуда колебаний в подобных станках обычно назначается равной 10-25 мм на частоте 15-25 Гц. Таким образом, главной особенностью вибростанков для поверхностного упрочнения является высокая амплитуда колебаний их рабочей камеры при сравнительно невысокой частоте. На первый взгляд добиться той же скорости движения частиц среды (а большие ударные силы достигаются именно благодаря высокой скорости) можно путем увеличения частоты в соответствии с известным соотношением для амплитуды виброскорости

$$v_a = 2\pi f A. \qquad (1)$$

Это позволило бы значительно улучшить экологические характеристики процесса, т.к. схемы виброзащиты от высокоамплитудных низкочастотных шума и вибрации весьма сложны и дорогостоящи. Поэтому при проектировании операций ППД этим методом очень важно определить то оптимальное соотношение между амплитудой и частотой, при котором удается достичь требуемых высоких скоростей частиц массы загрузки, понизив амплитуду колебаний. Сделать это возможно на основе модельного описания технологического процесса, которое включало бы в себя основные явления, происходящие при обработке.

Причины того, что на практике более эффективны высокоамплитудные станки с разряженной массой загрузки, вытекает из теории виброударных систем. Виброударная система (ВУС) обычно состоит из одной или нескольких ударных пар – масс, периодически взаимодействующих друг с другом. Если движение в системе возбуждается колебаниями одной из масс, например, по закону

$$X_i(t) = sin(\omega t + \phi), \qquad (2)$$

в системе могут возникнуть стационарные виброударные колебания с частотой, равной или в целое число раз меньшей, чем ω. В последнем случае режим виброударных колебаний называют кратным. Особенностью виброударных систем является наличие не обязательно одного, а, возможно, нескольких стационарных режимов разной кратности. В результате исследований Я.Г. Пановко [3] установил, что период устойчивых стационарных колебаний системы мало зависит от характера

соударения звеньев, т.к. имеющиеся силы трения стабилизируют их движение. Результатом описания движения элементов ВУС является фазовое уравнение, которое практически всегда при гармоническом возбуждении типа (2) приводится к виду

$$w_1 sin\phi + w_2 cos\phi = w_3, \qquad (3)$$

где w_1, w_2, w_3 - функции параметров системы и возбуждения, а ϕ - фаза колебаний возбуждающего элемента, при которой происходит его соударение с соседним звеном.

Из исследованных в настоящее время 3 десятков моделей виброударных систем, рассмотрим модель «столбика шариков» (рис.1).

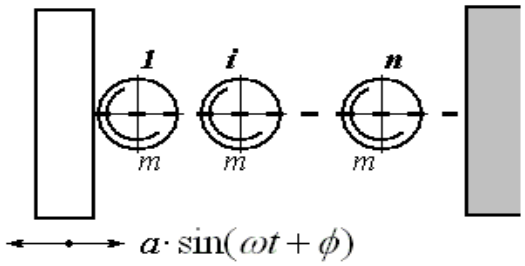


Рис.1 Модель виброударной системы – «столбик шариков»

Эта модель обстоятельно исследована; ее особенности описывают следующие соотношения: уравнения движения инденторов в промежутках между соударениями

$$m\ddot{x}_i = 0; \quad 1 \le i \le n, \qquad (4)$$

коэффициенты фазового уравнения:

$$w_1 = 1; \; w_2 = \frac{2}{3}\pi l\left(\frac{1+R+R^2}{1-R} - \frac{1-R}{1+R}n^2\right); \; w_3 = \frac{S}{a}, \qquad (5)$$

где R – коэффициент восстановления, одинаковый для всех ударных пар, l – кратность режима, n – число инденторов в столбике, S – суммарный зазор в системе; a – амплитуда колебаний ударника, и ударный импульс, передаваемый преграде:

$$I = \frac{m\omega a}{n} \cdot \frac{1+R}{1-R} cos\phi. \qquad (6)$$

Стационарные виброударные колебания могут существовать при выполнении условия, представляющего собой критерий эффективной загрузки обрабатывающей среды в рабочую камеру

$$n < \frac{1}{1-R}. \qquad (7)$$

Из (6) видно затухание ударного импульса по мере его прохождения вдоль цепочки инденторов. Для стальных сферических инденторов среднее значение коэффициента восстановления

составляет около 0,7. Таким образом, при условии оптимальности момента соударения ($cos\phi$=1) ударный импульс затухает обратно пропорционально числу слоев инденторов. Рост ударного импульса наблюдается с увеличением амплитуды виброскорости (равной ωa) и массы инденторов. Виброударные колебания полностью затухают при нарушении условия (7), т.е. при $n \geq 1/(1-0{,}7) \approx 3...4$. Это не означает, что в такой системе энергия вообще не будет передаваться преграде. Однако процесс при этом будет носить нестационарный, хаотический характер, и большая часть приходящих ударов будет передавать импульс, существенно меньший, чем в (6).

В связи с тем, что воздействие на деталь производится двумя – тремя упакованными слоями инденторов, основные черты процесса можно выявить при анализе одномассных модельных ВУС. Схемы этих ВУС должны отвечать известным и применяемым на практике схемам процессов высокоамплитудной виброударной обработки ППД, среди которых можно выделить следующие четыре: а) обработка нижней поверхности неподвижной детали; б) деталь прикрепленная к виброплите подбрасывает массу загрузки при этом движение массы загрузки не ограничено сверху; в) движение массы загрузки ограничено сверху отражающей крышкой; г) упрочнение внутренней полости детали, прикрепленной к виброплите (деталь - виброкамера)

Рассмотрим схему виброударной высокоамплитудной обработки, при которой обрабатываемая деталь неподвижна. Основываясь на простейшей схеме процесса, приведенной на рис.2 (аналог схемы «а»), выявим минимальный набор параметров, позволяющий связать амплитудно-частотные характеристики возбуждающего воздействия, размер и массу инденторов, а также свойства обрабатываемой поверхности.

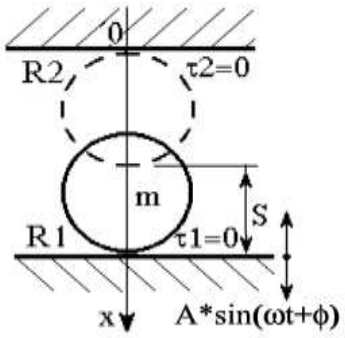


Рис.2. Схема виброударной системы, моделирующей упрочнение закрепленной детали

В рассматриваемой модели движение обрабатывающей среды возбуждается нижней плитой. После столкновения с нижней вибрирующей платформой отскочивший индентор совершает свободный полет до встречи с верхней плитой. После взаимодействия с верхней плитой, индентор получает импульс отдачи, направленный вниз. После чего ускоренно под действием силы тяжести движется вниз. Согласно стандартной классификации виброударных систем (ВУС) эта модель является одномассовой [4], она похожа на известную модель «прыгающий шарик», но отличается от нее наличием неподвижной верхней преграды с бесконечной массой.

Несмотря на то, что наличие трения моделью не учитывается ее решение позволяет выяснить вопрос существования тех или иных виброударных режимов, и может служить средством тестирования программ для ЭВМ, которыми возможно учесть большинство явлений и факторов процесса.

Упрощающие предположения, свойственные модели, полагают: реальная система представляет собой большую совокупность систем (рис.2), в которой инденторы располагаются в ряд по горизонтали и синхронно движутся вверх – вниз; динамическое возбуждающее воздействие является гармоническим (синусоидальным) с амплитудой A, частотой ω и начальной фазой ϕ, отсчитываемой от момента соударения колеблющейся нижней плиты с индентором, который мы принимаем за начало отсчета времени; продолжительность соударений обоих типов принимается равной нулю; трение инденторов друг с другом и о стенки отсутствует, – потери энергии в системе имеют место только при соударениях тел и описываются коэффициентами восстановления R1и R2в обеих ударных парах; распределенный в реальном вибростанке между звеньями ВУС зазор заменяется суммарным зазором S. Зазор отсчитывается от положения индентора массой m, в котором он касается верхней плиты до равновесного положения нижней плиты ;массы верхней и нижней плит приняты бесконечно большими.

Таким образом, сама структура принятой модели и введенные упрощения определяют перечень параметров, управляющих процессом. Адекватность принятой модели может быть оценена после выявления ее способности отражать установленные экспериментально реальные процессы в вибростанке.

Библиографический список

1.Бабичев А.П. Основы вибрационной обработки – Ростов н/Д, Издательский центр ДГТУ, 1999 – 620 с.

2. Лебедев В.А. Технология динамических методов поверхностного пластического деформирования. Научное издание– Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2006 – 183 с.

3.Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара.- Л.: Политехника,1990.-272с.

4.Шевцов С.Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных технологических машинах /Шевцов С.Н. - Ростов н/Д Издательство СКНЦ ВШ, 2001 - 194 с.

УДК 621.822.172

Особенности динамики шпиндельных гидростатических подшипников технологического оборудования

Бундур М.С., Санкт-Петербургский политехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия, mmfgak@mail.ru
Пелевин Н.А., Санкт-Петербургский политехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия,
Прокопенко В.А., Санкт-Петербургский политехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия,

Аннотация. В работе рассмотрены особенности динамики шпиндельных гидростатических подшипников технологического оборудования. Расчеты выполнены по разработанным в пакете «MATLAB» программам и моделям на основе параметров серийного гибкого производственного модуля. Проанализированы энергетические параметры вариантов схем управления гидростатическими подшипниками. С учетом полученных параметров на основе математической модели системы автоматического регулирования гидростатического подшипника построены логарифмические амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики и переходные процессы, по которым произведена оценка динамического качества. Предложен вариант корректирующей *RC*-цепи для повышения динамического качества рассматриваемых схем управления. Предложен способ выбора параметров коррекции гидравлической емкости и гидравлического сопротивления на основе трехмерной поверхности запаса по фазе.

Ключевые слова: моделирование, гидростатический подшипник, энергетические характеристики, алгоритм, коррекция, динамическое качество.

Abstract. In work features of dynamics of spindle hydrostatic bearings of processing equipment on the basis of parameters of the serial flexible production module are considered. Calculations are executed according to the programs and models developed in a MATLAB package. Power parameters of versions of schemes of control of hydrostatic bearings are analyzed. Taking into account the received parameters logarithmic amplitude-frequency and phase-frequency characteristics and transition processes on the basis of mathematical model of system of automatic control of the hydrostatic bearing on which the assessment of dynamic quality is made are constructed. For increase of dynamic quality of the considered schemes of management the option of the correcting RC chain is offered. On the basis of a three-dimensional surface of a stock on a phase the way of the choice of parameters of correction of hydraulic capacity and hydraulic resistance is offered.

Keywords: modeling, hydrostatic bearing, power characteristics, algorithm, correction, dynamic quality.

Ввиду роста требований к технологическому оборудованию (ТО) особое внимание уделяется к его подвижным узлам - как к средствам повышения точности перемещения и позиционирования. В связи с этим первоочередной задачей является решение проблем, связанных с устойчивостью движения подвижных узлов в процессе работы, а также увеличением их износостойкости, разрешать которые необходимо до момента непосредственного изготовления упомянутых узлов на производстве.

Оценка качества, как разрабатываемых узлов, так и ТО в целом обеспечивается расчетом и исследованием, прежде всего динамических показателей. В частности большое влияние на динамику

ТО оказывают его важнейшие узлы, такие как главный привод и шпиндельный узел (ШУ). Для ШУ изготовленного с применением гидростатических подшипников (ГСП), возможно, как и для практически любой гидравлической и пневматической системы, произвести достаточно просто компьютерное моделирование системы автоматического регулирования (САР).

В практике станкостроения часто используют широко известные методики теории колебаний, теории устойчивости, теории автоматического управления. Модель ГСП может рассматриваться (по ее физико-математическому описанию системой дифференциальных уравнений[1]) как САР.

В качестве объекта исследования приняты параметры гибкого производственного модуля разработки ЗАО «Свердлов» ЛР400ПМФ-4.Исследование проведено при следующих исходных параметрах ГСП: приведенная масса ШУ – M = 50 кг; максимальная частота вращения шпинделя – n_{max}=3150 об/мин; диаметр выдвижного шпинделя D=125 мм; наибольшая радиальная нагрузка – R_h=10 кН; рабочая жидкость – ИГП-18; радиальный зазор – $h_0 = 45 \cdot 10^{-6}$ м; модуль объемной сжимаемости масла – $E_m = 1{,}15 \cdot 10^{-6}$ Н/м^2; давление питания – $p_п = 8{,}6 \cdot 10^6$ МПа; рабочая точка на статической характеристике – m_0=0,5 [1]; схема управления (СУ) ГСП – дроссельная (вар. 1).

Рассмотрен аппарат комплексных исследований энергетических и динамических характеристик шпиндельных ГСП с использованием разработанной в пакете «MATLAB&Simulink» библиотеки программ и моделей [2]. В результате статического расчета установлена величина жесткости C по вар. 1, которая составила 1900 Н/м при начальном давлении(p_0) в гидростатической опоре (ГСО) 4,3 МПа. Рассчитаны эквивалентные по жесткости СУ у которых значение p_0составили: для СУ «насос-карман» (вар. 2)p_0=1,75 МПа; для СУ «дроссель-насос» (вар. 3)p_0=3,35 МПа; для СУ «дроссель-мембранный регулятор» (вар. 4) p_0=1,9 МПа.

Особое значение представляет исследование динамики САР с учетом вращения шпинделя. Исследования проведены при следующих частотах вращения шпинделя: n_{min}=0…500 об/мин – соответствует черновым режимам обработки, n_{max1}=3150 об/мин – максимальная паспортная частотаиn_{max2}=4000 об/мин –максимальная частота для повышения технологических возможностей станка при его модернизации. При n_{max} динамическая вязкость масла уменьшается, давление в ГСО падает, расход через них увеличивается, температура масла в самом ГСП и на выходе из него повышается из-за потерь трения, а для комбинированных СУ (вар. 3 и 4) происходит радиальное смещение оси шпинделя относительно втулки и существенно растет перегрев масла. Все перечисленные параметры взаимно влияют друг на друга, что существенно усложняет процедуру их вычисления и учета.

С использованием программы ***p_En*** [3] расчета энергетических параметров ГСП из упомянутой библиотеки, проведено исследование ГСП ШУ ЛР400ПМФ-4. Установлено, что СУ

повар. 4практически не пригодна к применению на исследуемом станке вследствие превышения в ГСО допустимого перегрева масла для станка повышенного класса точности [4] и существенного смещения оси шпинделя на Δh=8 мкм (при n=2000 об/мин) и Δh=13 мкм (n=3000 об/мин).Установлено, что СУ повар. 2 с увеличенным расходом насоса до $Q_н$=1,2 л/мин имеет дополнительные преимущества перед базовой вар. 1.

Выполнен динамический анализ качества ГСП для всех исследуемых СУ. По программе ***p_LH*** [2] построены амплитудно-частотные (ЛАЧХ) и фазочастотные (ЛФЧХ) характеристики на основе используемой Simulink-модели САР ГСП с учетом результатов энергетического расчета (рис. 1) и получены значения запасов по фазе ($\Delta\varphi$) на частоте среза ($\omega_{ср}$). Результаты для всех СУ приведены в табл.

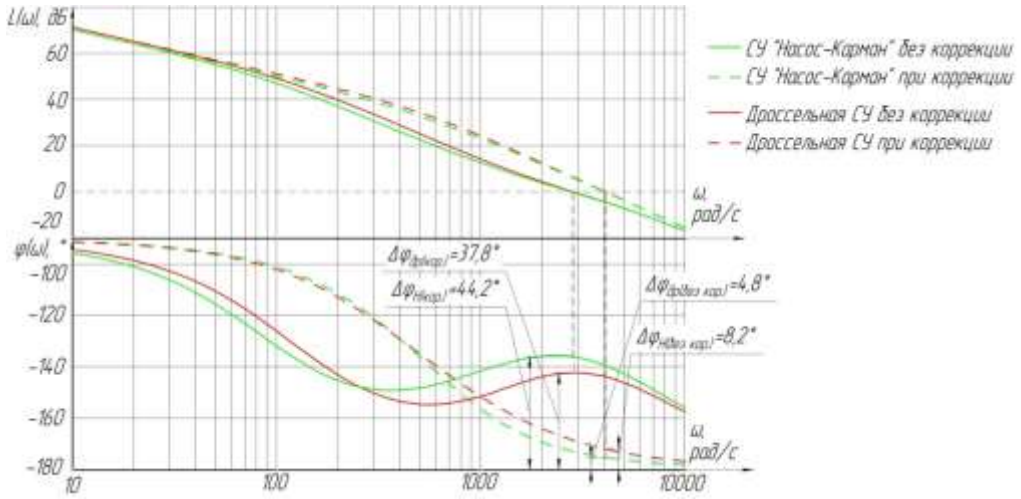


Рис. 1. ЧХ для СУ по вар. 1 и 2 для САР ГСП некорректированной и с *RC*-коррекцией

Установлено, что все исследуемые СУ имеют низкое динамическое качество[5], то есть ни один из вариантов не имеет запас по фазе выше $[\Delta\varphi]=55°$. Наименьшее динамическое качество у СУ по вар. 1. Лучший показатель динамического качества у СУ по вар. 4 за счет неизбежного на n_{max} радиального смещения оси шпинделя при недопустимом перегреве.

Для дополнительной оценки динамического качества в программе ***p_PP*** [2] (из вышеупомянутой библиотеки) получены переходные процессы (ПП) САР ГСП для всех СУ. При этом, рассмотрены два случая: черновой режим обработки с большой величиной нагрузки (n_{min} и Pz=10 кН), и чистовой режим обработки при малой нагрузке (n_{max2} и Pz=100 Н). ПП САР ГСП для СУ по вар. 1 и 2 при принятых условиях приведены на рис. 2.

Из анализа ПП, следует, что при малых и больших нагрузках все СУ – колебательные. Таким образом, все рассмотренные СУ ГСП нуждаются в улучшении динамического качества. Исследованы возможности повышения динамического качества САР путем введения корректирующей *RC*-цепи с параметрами C_A – гидроемкость и R_A – гидросопротивление [2].

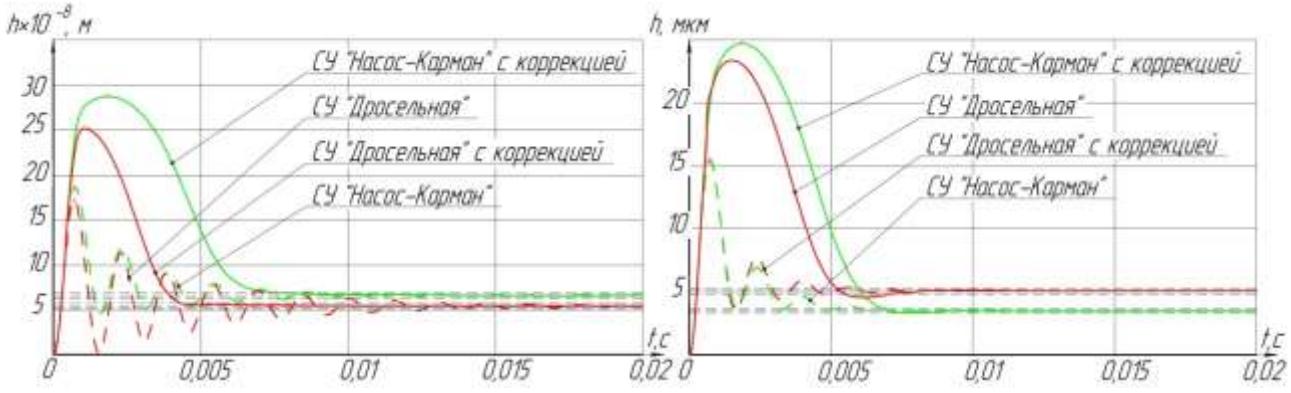
Таблица

Результаты динамического расчета ГСП для различных СУ без коррекции и с подключением корректирующей *RC*-цепи с параметрами $C_A = 5 \cdot 10^{-14}\, м^3 / Па$ и $R_A = 15 \cdot 10^9\, Па \cdot с / м^3$

СУ по вар. 1				СУ по вар. 2				СУ по вар. 3				СУ по вар. 4			
n, об/мин	p_0, МПа	$\Delta\varphi$,	$\Delta\varphi_{кор}$,	n, об/мин	p_0, МПа	$\Delta\varphi$,	$\Delta\varphi_{кор}$,	n, об/мин	p_0, МПа	$\Delta\varphi$,	$\Delta\varphi_{кор}$,	n, об/мин	p_0, МПа	$\Delta\varphi$,	$\Delta\varphi_{кор}$,
0	4,3	16,1	54,4	0	1,7	20,9	65,3	0	3,3	17,8	58,2	0	1,9	21,6	63,4
				3000	0,9	12,5	50,4					2000	1,0	15,4	54,3
3000	3,4	6,9	41,3	4000	0,7	11,4	47,6	3000	2,35	9,5	45,6	3000	0,7	12,8	50,0
				0	3,0	16,2	58,6					0	2,3	19,8	60,9
4000	3,1	4,8	37,8	3000	1,8	9,74	47,1	4000	2,07	7,7	42,4	3000	0,9	11,8	49,2
				4000	1,5	8,21	44,1								

Для определения параметров корректирующей *RC*-цепи на примере СУ по вар. 2в программе ***p_TP*** [2] построена поверхность запаса по фазе (рис. 3).

Из ее анализа следует, что при $n_{\max 2}$ значение $\Delta\varphi = 44,2°$ для параметров *RC*-цепи: $C_A = 5 \cdot 10^{-14}\, м^3 / Па$ [2] и $R_A = 15 \cdot 10^9\, Па \cdot с / м^3$. При этом, значение $\Delta\varphi$ меньше $55°$, поэтому необходимо дополнительно проанализировать ПП САР ГСП (рис. 2). Из анализа ПП (рис. 2) установлено, что корректированные САР по вар. 1 и 2 - не колебательные.



а)б)

Рис. 2.ППдля некорректированных САР ГСП и с *RC*- коррекцией для СУ по вар. 1 и вар. 2 при: 100 Н (а) и 10 кН (б)

По упомянутой программе, построены ЧХ (рис. 1) и получены значения запасов по фазе для всех рассматриваемых СУ (в табл.).Из их анализа, следует, что САР с высокими показателями качества – СУ вар 4. Однако, учитывая вышеупомянутые особенности данная СУ непригодна к применению. Худший показатель динамического качества так же, как и в случае некорректированной САР наблюдается у вар. 1. Установлено, что корректированная СУ по вар 2 обеспечивает лучший показатель $\Delta\varphi$ во всем диапазоне частот вращения.

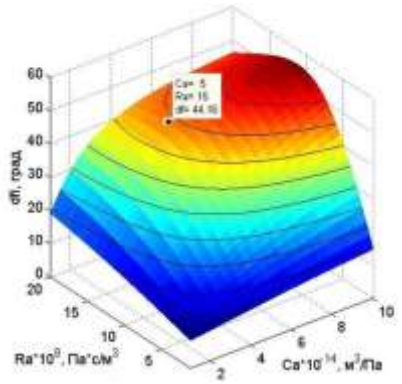


Рис. 3. Трехмерная поверхность $\Delta\varphi=f(R_A;C_A)$

Анализ динамического качества следует проводить с учетом энергетических процессов. При этом для обеспечения высокого динамического качества необходимо рассматривать как черновые, так и чистовые режимы работы шпинделя. Для его повышения следует применять известные средства коррекции по предложенной методике [2].

Библиографический список

1. Бундур М.С., Прокопенко В.А., Чернов И.А. Металлорежущие станки. Проектирование гидростатических направляющих металлорежущих станков и станочных комплексов. Метод. указания. Сост.: Бундур М.С., Прокопенко В.А., Чернов И.А. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. 28 с.

2. Пелевин Н.А., Прокопенко В.А., Чернов И.А. Графо-аналитический метод выбора параметров коррекции гидростатических подшипников с помощью среды MATLAB // Теория механизмов и машин, № 2, 2015. С. 13-22.

3. Бундур М.С., Пелевин Н.А., Прокопенко В.А. Компьютерные исследования энергетической модели жидкостного подшипника в MATLAB // Материалы международной конференции «Теория и практика современной науки» 7-11 сентября 2015. Зальцбург, Австрия, 2015. С. С. 22-26.

4.Свешников В.К. Станочные гидроприводы: справочник. 5-е изд., перераб. и доп. М: Машиностроение, 2008. 640 с.

5.Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. М: Машиностроение, 1983. 608 с.

УДК 621.787:681.51(075.8)

Устойчивость технологических систем обработки деталей методами поверхностного пластического деформирования

*Попов М.Е., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*mepop@yandex.ru

Эль Дакдуки А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Приведено решение уравнений движения инструмента при отделочно-упрочняющей обработке динамическими методами ППД с учетом ударов, разрывных функций силы, явления дребезга, что обеспечивает возможность анализа переходных процессов и предельного цикла движения.

Ключевые слова: отделочно-упрочняющая обработка, поверхностное пластическое деформирование, устойчивость, математические модели, удар, виброударная система, явления дребезга

Abstract. The solution of the equations of motion of the tool during finishing and hardening processing TTD dynamic methods taking into account the impacts, of discontinuous functions, powers, and chattering phenomenon that allows the analysis of transient and limit cycle motion.

Keywords: finishing-hardening, surface plastic deformation, stability, mathematical models, shock, vibro-impact system, the phenomenon of bounce

К одним из наиболее эффективных методов поверхностно-пластической деформации деталей машин относится метод ударно-импульсной обработки.

К инструментам импульсного действия относятся инструменты с пружинным приводом (рис. 1) и устройства для поверхностного упрочнения деталей с эксцентриковыми упрочнителями [1,2,3].

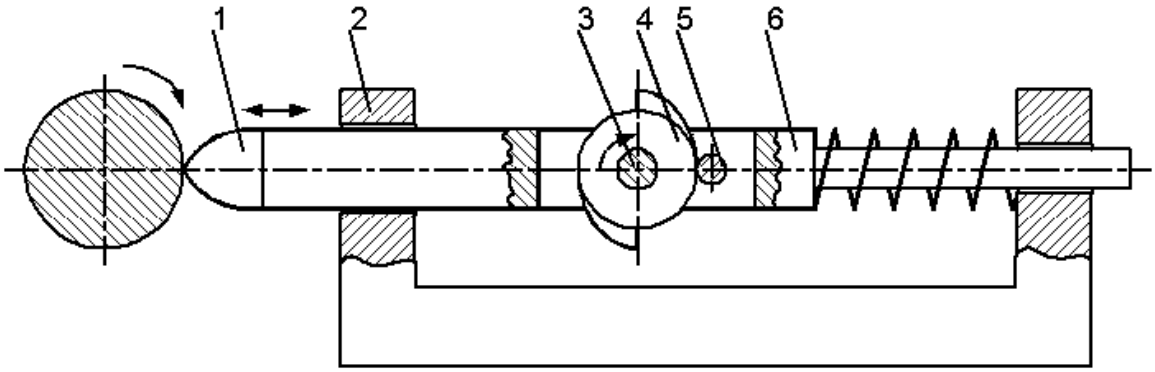


Рис. 1. Схема работы ударно-импульсного инструмента с пружинным приводом

Характерной особенностью процессов импульсного (динамического) действия является отсутствие в процессе обработки постоянного контакта между рабочей поверхностью деформирующего инструмента и поверхностью заготовки.

При анализе виброударных процессов отделочно-упрочняющей обработки одним из главных критериев их выбора являются реализуемые режимы движения [4,5]. Рассмотрим обобщенную

динамическую схему движения деформирующего инструмента, представленного в виде поступательно движущегося тела m, на которое действует некоторое переменное во времени возмущение. При движении инструмента происходят его удары с поверхностью обрабатываемой детали, положение которой определяется координатой x_c.

Движение рассматриваемой системы опишем уравнениями

$$m \cdot \ddot{x} = P(t),\ x(t_0) = x_0,\ \dot{x}(t_0) = \dot{x}_0,$$

$$P(t) = \begin{cases} P_1,\ (n-1)\cdot T \le t < (n-1)\cdot T + t_1, \\ P_2,\ (n-1)\cdot T + t_1 \le t < n \cdot t, \end{cases}$$

$$n = 1, 2, \ldots,\ при\ x = x_c,\ если\ x > 0,\ то\ \dot{x}^+ = -R \cdot \dot{x}^-,$$

где P_1, P_2 - силы, действующие на массу m соответственно в направлении поверхности обрабатываемой детали и в обратном направлении;

T - период силового воздействия;

t_1 - длительность действия силы P_1;

n - номер цикла силового воздействия;

x_0 - координата массы в начальный момент времени при $t = t_0$;

$\dot{x}_0$ - скорость ударной массы в начальный момент времени;

x_c - координата поверхности обрабатываемой детали:

$\dot{x}^-$ - скорость ударной массы перед столкновением с обрабатываемой поверхностью;

$\dot{x}^+$ - скорость ударной массы после столкновением с обрабатываемой поверхностью;

R - коэффициент восстановления скорости при ударе $(0 < R < 1)$.

Методом припасовывания решений дифференциальных уравнений, описывающих смежные интервалы движения, разделенные моментом удара, построены аналитические зависимости, определяющие параметры движения на различных интервалах [4]. Время нанесения первого удара t_{c1} и предударная скорость $(\dot{x}(t_{c1}))^-$ могут быть найдены по зависимостям

$$t_{c1} = t_0 + \frac{-\dot{x}_0 + \sqrt{\dot{x}_0^2 - 2A_1(x_0 - x_c)}}{A_1},\ если\ \ t_{c1} < t_1,$$

$$t_{c1} = t_1 + \frac{-\dot{x}(t_1) + \sqrt{\dot{x}^2(t_1) + 2A_2(x_c - x(t_1))}}{A_2},\ если\ \ t_{c1} \ge t_1,$$

$$(\dot{x}(t_{c1}))^- = \sqrt{\dot{x}_o^2 - 2A_1(x_0 - x_c)},\ если\ \ t_c < t_1,$$

$$(\dot{x}(t_{c1}))^- = \sqrt{\dot{x}^2(t_1) + 2A_2(x_0 - x_c)},\ если\ \ t_c \ge t_1,$$

где $A_1 = P_1/m,\ A_2 = P_2/m,\ x(t_1)\ и\ \dot{x}(t_1)$ - координата и скорость ударной массы в момент переключения силы.

Если удар происходит до момента переключения силы $t_{c1} < t_1$, то удар тела об обрабатываемую поверхность детали может многократно повторяться на интервале $t_{c1} < t < t_1$. Если в первой фазе действия силы в момент времени $t = t_{c1}$ происходит i-й удар, то на интервале $t_{ci-1} \le t \le t_i$

$$\dot{x}(t) = (\dot{x}(t_{ci-1}))^+ + A_1 \cdot (t - t_{ci-1})$$

$$x(t) = x_c + (\dot{x}(t_{ci-1}))^+ \cdot (t - t_{ci-1}) + \frac{1}{2} A_1 \cdot (t - t_{ci-1})^2,$$

где t_{ci-1} - время нанесения $(i-1)$-го удара;

$(\dot{x}(t_{ci-1}))^+ = -R \cdot (\dot{x}(t_{ci-1}))^-$ - скорость ударной массы после нанесения $(i-1)$ - го удара, являющаяся начальной скоростью ее движения на интервале $t_{ci-1} \le t \le t_i$.

Время между двумя последовательными ударами пропорционально зависит от послеударной скорости предыдущего удара и уменьшается в геометрической прогрессии. Возникает явление дребезга. Координата ударной массы интенсивно стремится к x_c. Общее время таких соударений при числе соударений стремящемся к бесконечности, конечно и определяется как

$$t_{c\infty} = t_{c1} + \frac{2R}{A_1(1-R)} (\dot{x}(t_{c1}))^-.$$

Если $t_{c\infty} < t_1$, то многократный ударный режим движения ударной массы заканчивается еще в первой фазе действия силы $P(t)$ и следует переходить к рассмотрению движения во второй фазе действия при начальных условиях $x(t_1) = x_c$, $\dot{x}(t_1) = 0$.

Если неравенство $t_{c\infty} < t_1$ не выполняется, возникает необходимость определения конечного числа ударов j ударной массы о поверхность обрабатываемой детали до начала второй фазы действия силы $P(t)$:

$$j = \frac{\ln\left[1 - \frac{t_1 - t_{c1}}{a_1}\right]}{\ln R} + 1, \; a_1 = \frac{2}{A_1} R \cdot (\dot{x}(t_{c1}))^-.$$

При режиме многократных ударов скорость каждого последующего удара интенсивно уменьшается по закону геометрической прогрессии, причем $(\dot{x}(t_{c1}))^- = R^{i-1} \cdot (\dot{x}(t_{c1}))^-$. Так как $R < 1$, то R^{i-1} при $i \to \infty$ стремится к нулю. Если рассмотреть отношение $\dot{x}^-(t_{ci}) / \dot{x}^-(t_{c1}) = R^{i-1}$, то отношение скорости удара на i-м соударении к предударной скорости первого удара при достаточно большом числе соударений становится малой величиной. Если задаться величиной этой малости ε и полагать, что

$$(\dot{x}(t_{ci}))^- = \begin{cases} (\dot{x}(t_{ci}))^-, & \text{если } R^{i-1} \ge \varepsilon, \\ 0, & \text{если } R^{i-1} < \varepsilon, \end{cases}$$

то можно определить минимальное число ударов $i_{\min}$ после которого следует считать, что ударная масса находится в покое у поверхности обрабатываемой детали, пока $t < t_1$: $i_{\min} = \ln \varepsilon / \ln R + 1$.

Эти решения положены в основу алгоритма моделирования процесса отделочно-упрочняющей обработки деталей виброударными методами ППД с учетом явления дребезга.

Важным моментом анализа функционирования системы является определение максимальной скорости удара. Фиксируется первый удар на протяжении каждого периода действия сил. При этом происходит запись номера эксперимента, номера периода, предударной скорости, времени нанесения удара в соответствующую связанную таблицу БД. Эти данные используются для вывода результатов моделирования, для воспроизведения их в виде диаграмм координаты, скорости и ускорения (рис. 2). На экране монитора реализуется анимационный процесс движения ударной массы, воспроизводятся диаграммы положения x, скорости v и ускорения A ударной массы, а также фазовая диаграмма $v = v(x)$ движения ударной массы.

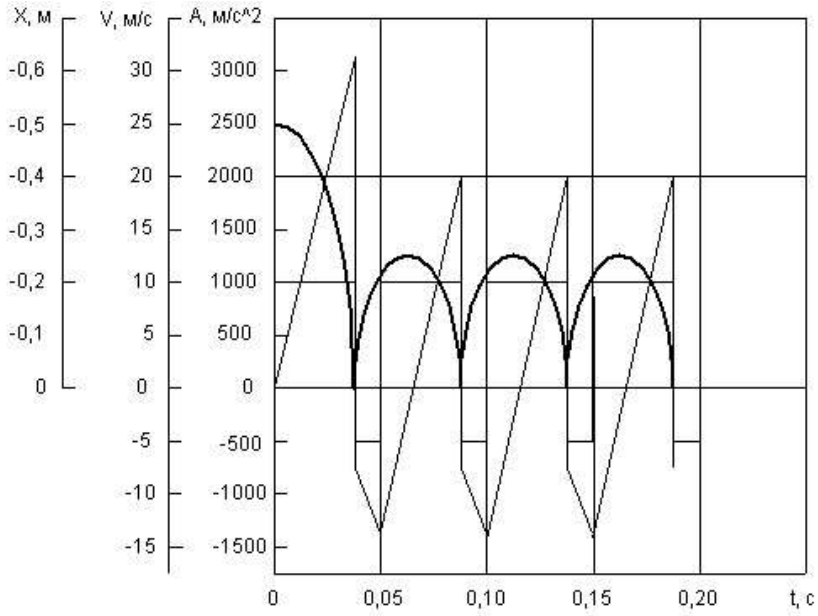


Рис. 2. Диаграмма положения x, скорости v и ускорения A ударной массы

Для оценки выхода ударной системы на установившийся режим движения, помимо визуальных оценок, посредством активации граничной линии, проходящей через множество точек максимальных значений предударных скоростей V_i, осуществляется статистический анализ числовой последовательности предударных скоростей. Этот анализ позволяет осуществлять строгую математическую констатацию выхода системы на установившийся режим движения с заданным уровнем отклонения числовых значений, не превышающих малую величину ε.

Устойчивость процесса движения анализируется путем оценки сходимости ряда в виде числовой последовательности разницы предыдущего и текущего значений предударных скоростей с

использованием критерия Коши. Сформулируем этот критерий для рассматриваемого процесса: чтобы ряд суммы чисел $\left(\sum_{0}^{n}(V_i - V_{i-1}) + \ldots\right)$ сходился, необходимо и достаточно, чтобы последовательность его частичных сумм $s_1, s_2, s_3, \ldots, s_n$ обладала следующим свойством: каково бы ни было $\varepsilon > 0$, существует такое n, чтобы при любом $m \geq 0$ выполнялось условие $|s_{n+m} - s_n| < \varepsilon$.

Таким образом, в статье рассмотрена обобщенная динамическая модель движения ударного инструмента, представленного в виде поступательно движущегося тела m, с соударениями о поверхность обрабатываемой детали и периодической силой.

Разработана процедура моделирования процесса движения ударного инструмента при периодическом силовом воздействии с учетом возможных многократных ударов (явления дребезга) за период силового воздействия. Решение этой проблемы найдено путем определения минимального числа последовательных ударов, превышение которого позволяет с заданным уровнем погрешности отсекать последующие малые перемещения ударника и определять начальные значения для следующего цикла движения.

Устойчивость процесса движения анализируется путем оценки сходимости ряда в виде числовой последовательности разницы предыдущего и текущего значений предударных скоростей с использованием критерия Коши при выборке чисел и расчете частичных сумм для большого объема циклов, на порядок или на два порядка превышающих реальное число циклов для гарантированной констатации устойчивости процесса.

На основании экспериментальных исследований по определению влияния на динамику эксцентрикового упрочнителя отдельных параметров кинематики и динамики процесса установлено, что энергия системы, теряемая при ударе на совершение пластической деформации обрабатываемого материала, складывается из изменения кинетической энергии поступательного движения системы и изменения кинетической энергии вращающейся эксцентриковой массы.

Исследование динамики процесса ударно-импульсной обработки инструментом с пружинным приводом раскрывает закономерности протекания процесса для различных стадий работы устройства, позволяет в полной мере использовать технологические возможности этого процесса при отделочно-упрочняющей обработке поверхностей различных деталей.

Библиографический список

1. Попов М.Е. и др. Технологические процессы поверхностного пластического деформирования: монография / Под ред. С.А. Зайдеса. - Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. - 404 с.

2. Попов М.Е. и др. Технология экспериментальных исследований: монография/Под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2011.- 580 с.

3. Попов М.Е. Упрочняющая обработка деталей поверхностным пластическим деформированием ударно-импульсным инструментом с пружинным приводом/ Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. - № 8. – С.10-23

4. Манжосов В.К., Новиков Д.А. Управление процессом моделирования движения объекта с ударами о преграду //Программные продукты и системы. 2012, №4.- С. 211-217

5. Нагаев Р.Ф. Механические процессы с повторными затухающими соударениями.- М.: Наука, 1985.-200 с.

УДК 621.77.539.37

Система поддержки принятия решения при выборе материала и технологии упрочняющей обработки деталей в интегрированных САПР

Попов М. Е., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, mepop@yandex.ru

Попов А.М., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. Рассмотрены вопросы формализации задачи выбора метода упрочняющей обработки в процессе конструкторского и технологического проектирования машин в интегрированных САПР.

Ключевые слова: система принятия решения, выбор материала, выбор метода упрочняющей обработки, интегрированные САПР.

Abstract. Considered the formalization of the problem of choosing a method of hardening treatment in the process of design and technological design of machines in an integrated CAD system.

Keywords: the system of decision making, the choice of material, choice of method of consolidating treatment, integrated CAD.

В настоящее время в авиационной промышленности применяются различные материалы, отвечающие главному требованию - сочетанию легкости и прочности. Несмотря на большое разнообразие материалов, в авиастроении зачастую требуются такое сочетание различных свойств, которые возможно достичь только дополнительной обработкой.

Дополнительной упрочняющей обработке, как правило, подвергаются особо ответственные (элементы редуктора, лопасти) и силовые детали (шпангоуты, стойка шасси, фитинги) [1,2].

Рис. 1. Примеры деталей

В зависимости от степени ответственности деталей и условий их эксплуатации, к материалу предъявляются следующие требования:

- высокая прочность при воздействии больших динамических и статических нагрузок (например, стойка шасси, рис. 1);

- большое сопротивление хрупкому разрушению в интервале температур от -70 до +500◦с;

- высокое сопротивление знакопеременным нагрузкам (например, лонжерон лопасти);

- высокая прочность в сочетании с вязкостью (например, крепежные детали, рис. 1);

- износостойкость (например, шестерня редуктора, рис. 1);

- коррозионностойкость (например, металлические топливные баки) и т.д.

Конструкторские требования к свойствам материала и упрочняющей обработке отображаются на чертежах в виде ссылки на специальную техническую инструкцию, которая находится в отделе главного технолога, а на место упрочняющей обработки деталей предоставляется рабочим в виде копий [3].

В зависимости от метода упрочнения и достигаемых свойств материала, в специальной технологической инструкции предъявляются следующие требования к упрочняющей обработке:

- требования к деталям подлежащим упрочнению (здесь оговаривается качество упрочняемой поверхности, необходимость предварительного покрытия и покрытия после обработки, возможность присутствия поверхностных дефектов);

- требования к оборудованию и оснастке;

- требования к режимам упрочнения с указанием схем технологической обработки (здесь указываются параметры, определяющие режимы упрочнения: диаметр шариков, амплитуда и частота колебаний стола вибростенда, время упрочнения, число оборотов детали вокруг оси и др.);

- требования к упрочняющей среде: качество поверхности среды, наличие дефектов, диаметр;

- требования к образцам-свидетелям (если они при данном методе упрочнения имеются);

- требования к метрологическому обеспечению;

- требования к технике безопасности;

- требования к контролю качества упрочнения и т.д.

Непосредственно на самом чертеже могут указываться технические условия на закалку со ссылкой на ГОСТ или ОСТ, на вид наносимого покрытия и т. д.

Наиболее существенными являются два основных приема улучшения качества поверхностных слоев авиационных деталей:

- упрочнение поверхностно пластическим деформированием (ППД) слоев материала (обкатка роликами, дробеструйная обработка, виброударная обработка);

- упрочнение поверхностных слоев материала термохимической обработкой (поверхностная закалка токами высокой частоты, азотирование и т.п.).

Оптимальное качество поверхностного слоя достигается ППД, при упрочнении которым в поверхностном слое материала происходит сглаживание шероховатостей, снятие гребешков, уменьшение глубины и остроты углов рисок и, что самое существенное, происходит уплотнение наружных слоев материала детали. После такой обработки в поверхностных слоях возникают напряжения сжатия. Они накладываются на рабочие напряжения, в результате чего выносливость детали повышается.

В настоящее время в авиационной промышленности получили применение разнообразные методы и способы упрочняющей обработки деталей ППД. Выбор метода производят на основе технологической схемы упрочняющей обработки детали, ставя целью достижение максимального качества обработки при минимальных издержках производства.

Анализ методов, способов и технологии упрочняющей обработки авиационных деталей показал, что они отличаются большим разнообразием, в максимальной степени учитывают конструктивные особенности и служебное назначение авиационных деталей. Однако, выбор методов, способов и технологии упрочняющей обработки авиационных деталей недостаточно формализован, что при частой смене моделей объектов производства приводит к необходимости длительной отработки технологии упрочняющей обработки новых деталей непосредственно на стадии их производства. В современном производстве, при использовании интегрированных САПР, эта задача

должна эффективно решаться ещё на стадии проектирования и технологической подготовки производства новых изделий [4,5].

Рассмотренные теоретические подходы были использованы при создании интеллектуальной системы поддержки принятия решения при выборе метода упрочняющей обработки деталей машин в интегрированных САПР (рис. 2).

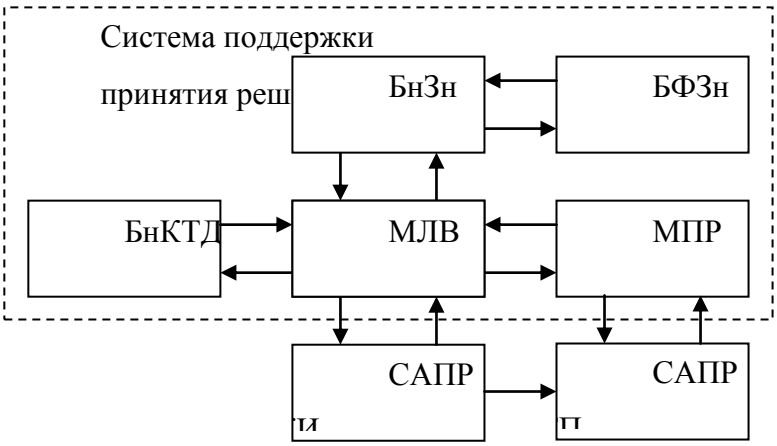


Рис. 4. Схема взаимодействия интеллектуальной системы поддержки принятия решения при выборе материала и метода упрочняющей обработки деталей машин с САПР КИ и САПР ТП

С помощью модуля логического вывода (МЛВ) и модуля принятия решения (МПР) при взаимодействии с САПР КИ, осуществляется выбор вида и метода упрочняющей обработки при проектировании ответственных деталей машин, а при взаимодействии с САПР ТП – выбор и проектирование технологии упрочняющей обработки таких деталей. При решении этих задач МЛВ использует банк знаний Бензин и банк конструкторско-технологических данных Банкет. Формирование банка знаний осуществляется экспертами с помощью блока формализации знаний (Без).

К функциям модуля логического вывода следует отнести:

- отбор из множества рассматриваемых методов упрочняющей обработки группы методов, обеспечивающих достижение требуемых параметров качества поверхностного слоя – первичная выборка;
- построение для каждого элемента первичной выборки математической модели упрочняющей обработки детали, определяющей влияние режимов обработки на формируемые параметры качества поверхностного слоя с учётом технологической наследственности;
- оптимизация математических моделей относительно режимов обработки; расчёт параметров качества поверхностного слоя, получаемых в результате упрочняющей обработки при определённых режимах обработки.

Модуль принятия решения предполагает решение следующих задач:

- построение математических моделей формирования себестоимости упрочняющей обработки в зависимости от некоторого уровня долговечности детали для всех элементов первичной выборки;
- определение себестоимости упрочняющей обработки при фиксированных значениях параметров качества поверхностного слоя и режимов обработки; оптимизация математической модели формирования себестоимости относительно режимов обработки при условии обеспечения требуемой долговечности;
- отбор из элементов первичной выборки метода(во) упрочняющей обработки, обеспечивающих минимальную себестоимость – вторичная выборка.

Основным результатом работы интеллектуальной системы поддержки принятия решения является выбор метода упрочняющей обработки и назначение режимов обработки, позволяющих обеспечить требуемые параметры качества поверхностного слоя, определяемые из условия максимальной долговечности деталей, и имеющего при этом наименьшую себестоимость. Кроме того, интеллектуальная система предполагает возможность проведения расчётов долговечности деталей, а также оценку влияния режимов упрочняющей обработки на долговечность детали. Интеллектуальная система поддержки принятия решения даёт возможность решать прямую и обратную задачи технологического проектирования. Использование интеллектуальной системы выбора метода упрочняющей обработки в интегрированных САПР позволяет конструктору обоснованно назначать требования к упрочняющей обработке ответственных деталей машин, а технологу обоснованно производить выбор способа и режимов упрочняющей обработки при проектировании технологических процессов их изготовления.

Выводы:

1) Исследования показали, что задача выбора метода упрочняющей обработки в интегрированных САПР может быть решена путем создания банков данных методов упрочняющей обработки.

2) Создание банков данных требует формализации, описание технологических возможностей методов упрочняющей обработки, а также разработки соответствующих алгоритмов и программного обеспечения.

3) Для решения этих задач требуется большой объем теоретических и экспериментальных исследований и учет всех накопленных данных в этой области, что является основной задачей дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Попов М.Е. Основы САПР технологических операций упрочняющей обработки: учеб. пособие. Ростов-на-Дону: РИСХМ. 1987. 91 с.

2. Попов М.Е. Проектирование операций упрочняющей обработки деталей машин методами ППД // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. №7. С. 11-20

3. Попов М.Е. Формализованное описание структуры базы данных методов упрочняющей обработки в интегрированных САПР// Вестник ДГТУ. Серия "Проблемы производства машин". Ростов-на-Дону, 2000. С. 88-91

4. Абухарб Мохаммад. Автоматизация выбора метода упрочняющей обработки деталей на стадии проектирования машин в интегрированных САПР: диссерт. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. - Ростов-на-Дону, 2012

5. Попов М.Е., Абухарб М., Эль-Диб Н. Свидетельство № 2012660967о государственной регистрации программы для ЭВМ «Автоматизированная система поддержки принятия решений при выборе метода упрочняющей обработки деталей машин в интегрированных САПР». Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 03.12.2012 г.

УДК 621.048

Разработка САПР ТП обработки деталей ППД в гранулированных рабочих средах

Тамаркин М.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, tehn_rostov@mail.ru
Тищенко Э.Э., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,
Садовая И.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,
Исаев А.Г., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,
Гребенкин Р.В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Аннотация. В статье представлены результаты исследований обработки деталей поверхностным пластическим деформированием в гранулированных рабочих средах. Установлены зависимости для определения среднего арифметического отклонения профиля шероховатости поверхности, глубины упрочненного слоя и степени упрочнения. Произведены исследования остаточных напряжений. Разработана методика оптимизации технологических процессов и САПР ТП для процессов обработки поверхностным пластическим деформированием в гранулированных средах.

Ключевые слова: обработка в гранулированных средах, среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости поверхности, глубина упрочненного слоя, степень упрочнения, проектирование САПР ТП

Abstract. The article presents the results of researches of processing of details by surface plastic deformation in granular environments. The dependences for definition of average arithmetic roughness profile of the surface, the depth of the hardened layer and the degree of hardening. The carried out researches of residual stresses. The developed method of optimization of technological processes and CAD system for processing by surface plastic deformation in the granular media.

Keywords: processing a granular media, the arithmetic average roughness surface roughness depth of the hardened layer, the degree of hardening CAD TP

Проектирование САПР технологических процессов при обработке в гранулированных средах включает в себя комплекс работ по изысканию, исследованию и расчётам, имеющих целью получение описания предмета проектирования, необходимого и достаточного для создания и реализации нового технологического процесса, удовлетворяющего заданным требованиям. Сложность процесса проектирования, многовариантность технологических решений, большая трудоёмкость определения оптимального варианта вызывает необходимость автоматизации проектных работ.

Обработка, основанная на пластическом деформировании тонкого поверхностного слоя (отделочно-упрочняющая обработка) при помощи гранулированной рабочей среды, имеет по сравнению с другими финишными методами обработки поверхности множество преимуществ, не требует применения сложного оборудования и оснастки. Отделочно-упрочняющей обработке

гранулированной средой (ОУО ГС) могут подвергаться детали разнообразных форм и размеров, изготовленные из различных материалов.

Методы ОУО ГС широко применяются в машиностроении для финишной обработки деталей. Каждый из этих методов имеет свою область применения, преимущества и недостатки. К методам ОУО ГС относятся: вибрационная отделочно-упрочняющая обработка (ВиОУО), отделочно-упрочняющая центробежно-ротационная обработка (ОУ ЦРО), обработка дробью (ОД) и др.

Для разработки методики проектирования технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки на основании теоретических исследований, учитывающих физическую сущность происходящих при обработке явлений, разработана комплексная система моделей, включающая взаимосвязанные модели единичного взаимодействия частиц рабочей среды с поверхностью детали, формирования шероховатости обработанной поверхности, глубины упрочненного слоя, степени упрочнения. Исследовано формирование поверхностных остаточных напряжений. Проведено исследование эксплуатационных свойств обработанных деталей.

При исследовании основных технологических параметров методов ОУО ГС (производительности процесса и качества обработанной поверхности) одним из важнейших является вопрос теоретического моделирования процесса единичного взаимодействия частиц среды с поверхностью обрабатываемой детали. Максимальную глубину внедрения частицы среды (чаще всего металлического шарика) в поверхность обрабатываемой детали можно определить по зависимости:

$$h_{\max} = 2 \cdot V_{эф} \cdot R \cdot \sin\alpha \cdot \sqrt{\frac{\rho_ч}{3\kappa_s \cdot c \cdot \sigma_s}} \qquad (1)$$

где $V_{эф}$ - эффективная скорость частицы (определяется особенностями конкретного вида обработки), R - радиус частицы, α - угол встречи частицы с поверхностью детали,

$\rho_ч$ - плотность материала частицы; k_s - коэффициент, учитывающий влияние шероховатости детали; c - коэффициент несущей способности контактной поверхности; σ_s - предел текучести материала детали.

Пятно контакта частицы среды с поверхностью детали представляет собой эллипс, размеры полуосей которого определяются по зависимостям:

$$b = \sqrt{R^2 - \left(R - h_{\max}\right)^2},$$

$$a = \frac{\pi}{2} \cdot \left(ctg\alpha - f\right) \cdot h_{\max} + b, \qquad (2)$$

где f - коэффициент трения частицы по поверхности детали.

Пластическое деформирование поверхности детали происходит при многократном взаимодействии с ней частиц среды. Микрорельеф поверхности образуется путём наложения и пересечения единичных следов (лунок). В результате обработки на поверхности детали образуется новый специфический микрорельеф, характеризующийся однородностью свойств по всем направлениям. При продолжении процесса обработки он постоянно воспроизводится, а его параметры не будут изменяться в некоторый промежуток времени (вплоть до наступления перенаклёпа поверхности). Параметры установившейся шероховатости будут определяться только технологическими режимами и размерами частиц среды.

Среднее арифметическое отклонение профиля установившейся шероховатости при обработке гибкой гранулированной рабочей средой можно определить по зависимости:

$$R_{a\ \text{уст}} = k_R \cdot \sqrt{\frac{h_{\max} \cdot a \cdot b \cdot l_{ед}}{R^2}}, \qquad (3)$$

где $l_{ед}$ - единичная длина, k_R - эмпирический коэффициент.

При решении технологических задач ОУО ГС важное значение имеет аналитический расчет ожидаемого значения глубины упрочненного слоя h и степени упрочнения ε. От толщины упрочненного слоя зависят многие эксплуатационные свойства деталей, например, усталостная прочность. На основании работ [1,2], а также в результате проведения собственных исследований для ОУО ГС получены зависимости для определения глубины упрочненного слоя и степени упрочнения:

$$h = 3k\sqrt{a \cdot b} \qquad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{a \cdot b}}{R} \qquad \textbf{(5)}$$

где k - коэффициент, зависящий от степени наклепа.

Формирование остаточных напряжений при ОУО ГС представляет большой интерес при проведении исследований[3,4]. Результаты исследований формирования поверхностных остаточных напряжений после различных видов ОУО ГС позволяют сделать вывод о том, что в поверхностном слое деталей формируются сжимающие остаточные напряжения на глубине 0.2-0.8 мм, что позволяет прогнозировать повышение эксплуатационных свойств этих деталей.

На основе анализа влияния средних напряжений цикла на величину предела выносливости для сталей и алюминиевых сплавов возможно использовать следующее уравнение для определения предельного напряжения цикла:

$$\sigma_a(h)=\sigma_в\left(1-\frac{\sigma_{ср}(h)}{\sigma_в}\right)\left[F+\gamma(1-F)\right], \quad (6)$$

где $\sigma_в$ - предел прочности материала образца; $\sigma_{ср}$ - остаточные напряжения;F и γ - параметры, зависящие от материала образца.

Для образцов из алюминиевых сплавов

$$\gamma=\frac{\sigma_{ср}}{\sigma_B\left[1+\frac{\left(\lg N_p\right)^4}{225}\right]};\ F=\left(1+\frac{0,0031\left(\lg N_p\right)^4}{1+0,0031\left(\lg N_p\right)^4}\right)\Big/\left(1+0,0031\left(\lg N_p\right)^4\right) \quad (7)$$

Для стальных образцов

$$\gamma=\frac{\sigma_{ср}\left(2+\sigma_{ср}/\sigma_в\right)}{3\sigma_в};\ F=\frac{1+0,0038\left(\lg N_p\right)^4}{1+0,008\left(\lg N_p\right)^4} \quad (8)$$

где N_p - количество циклов до разрушения.

Полученная система моделей прошла комплексную экспериментальную проверку и может быть использована для проектирования технологических процессов ОУО ГС, обеспечивающих повышение качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей. На её основе разработана методика оптимизации технологических процессов и разработана САПР ТП процессов ОУО ГС.

Результаты исследований ОУО ГС можно описать множеством критериев: шероховатость обработанной поверхности, глубина упрочненного слоя, степень упрочнения, время или производительность обработки и т.д. Полученные модели позволяют представить каждый показатель (критерий) в виде функциональной зависимости от множества исходных данных: управляемых технологических параметров и свойств обрабатываемого материала. Эти зависимости являются исходными в задачах оптимизации и управления, а, следовательно, создания САПР ТП.

При моделировании процессов ОУО ГС рассмотрено влияние исходных факторов на основные показатели обработки (технологические режимы, исходная шероховатость поверхности обрабатываемой детали, размеры среды). Это позволило произвести ранжирование технологических факторов, выбрать основные, которые оказывают существенное влияние, определить какие из них следует задавать одним значением, а какие массивом чисел для формирования множества проектных решений.

При создании САПР ТП разработаны технологические алгоритмы по двум методическим направлениям: структурная оптимизация (выбор метода обработки, разработка процессов с

минимальным числом операций и станков);параметрическая оптимизация (главным образом оптимизация режимов обработки) отдельных операций.

Для оценки эффективности технологических режимов обработки деталей используется величина интенсивности контактной упругопластической деформации ε_i, которая позволяет оценить физическое состояние деформируемого материала и, в частности, определить долговечность детали. Оптимальным режимом поверхностного пластического деформирования, проводимого с целью упрочнения, является тот, который обеспечивает максимальное приращение предела выносливости детали по сравнению с его исходным значением. В общем случае для материала с данными физико-механическими свойствами величина предела выносливости детали зависит от следующих факторов: величины упрочненного слоя и физического состояния пластически деформированного слоя детали, величины и распределения остаточных сжимающих напряжений в детали после ППД.

Разработанная САПР ТП позволяет по характеристике детали выбрать возможные методы ОУО ГС (в порядке предпочтительности), для каждого из них определить технологические режимы и характеристики рабочих сред, обеспечивающие минимальное время обработки, рассчитать необходимое количество станков и рабочих сред для выполнения годовой программы, затем путем экономического сравнения выбрать оптимальный вариант технологического процесса.

Библиографический список

1. Кудрявцев И.В. и др. Повышение прочности и долговечности крупных деталей машин поверхностным наклепом. М. НИИИНФОРМТЯЖМАШ, 1970.

2. Пшебыльский В.П. Технология поверхностной пластической обработки. – М.: Металлургия, 1991.

3. Heywood R.B. Designing against fatigue.- London: Chapman and Hall Ltd., 1962

4. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. 1981.

УДК 621.9:531.1

Управление динамикой механической обработки на основе учета упруго-диссипативных связей в зоне резания

Хайров Д.А., Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия, kimo@sstu.ru

Аннотация. Рассматривается влияние упруго-диссипативных связей в зоне резания, формируемых упруго-пластическими деформационными процессами в обрабатываемом материале, на состав колебательного процесса в подсистемах инструмента и детали. Приводятся результаты теоретико-экспериментальных исследований, показывающие возможность коррекции упруго-диссипативных связей за счет режима обработки, режущих свойств инструмента и динамических параметров подсистем инструмента и детали.

Ключевые слова: инструмент, деталь, процесс резания, динамическая система резания, возмущение колебаний, связи между подсистемами, упругие и диссипативные характеристики.

Abstract. Examines the influence of elastic-dissipative connections in the cutting zone formed by the elastic-plastic deformation processes in the material, the composition of the oscillatory process in the subsystems of the tool and workpiece. The results of theoretical and experimental studies showing the possibility of correction of elastic-dissipative ties through the correction processing mode, the cutting tool properties and dynamic parameters of the subsystems of the tool and workpiece.

Keywords: the tool, part, the cutting process, dynamic system of cutting, disturbance oscillations, of communication between subsystems, elastic and dissipative characteristics

Резание при механической обработке протекает через процессы упругого и пластического деформирования обрабатываемого материала в области подвижного контакта инструмента с деталью и, как правило, сопровождается колебательными процессами. С позиций динамики обработки резание можно представить как движения режущего клина инструмента в упруго-вязкой среде, что приводит к формированию возмущения, имеющего структуру упруго-диссипативных составляющих.

На рис. 1 приведена схема образования колебательного процесса в динамической системе резания. Область подвижного контакта инструмента с деталью может быть описана следующими аспектами.

Рис. 1. Схема образования колебательного процесса в динамической системе резания

Во-первых, процесс резания, обладая существенными нелинейными свойствами, является мощным силовым возмущающим фактором для подсистем инструмента и детали.

Во-вторых, упругие и пластические деформационные процессы вносят определенный вклад в формирование общих динамических свойств системы резания, оказывая влияние на ее жесткость и диссипативные свойства.

В-третьих, параметры упруго-диссипативных связей и их ориентация по отношению к скорости резания формируются не только под влиянием протекающих в зоне резания упругих и пластических деформаций, но и зависят от динамических параметров подсистем инструмента и детали, создающих натяг в системе резания.

Таким образом, динамическая система резания образуется совокупностью параметров подсистем инструмента, детали и упруго-диссипативных связей, возникающих в зоне резания. Процесс образования упруго-диссипативных связей при резании находится под влиянием большой группы факторов. Выделим из них те, которые заслуживают интерес в соответствии с темой доклада:

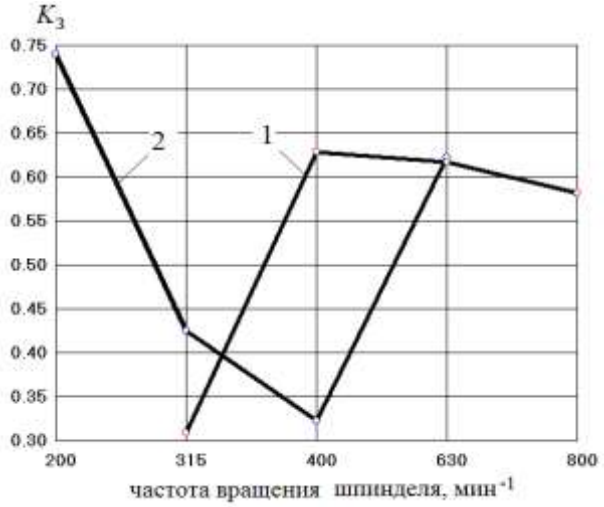
- режим обработки, формирующий кинематические условия движения режущего клина инструмента в обрабатываемом материале;
- трибологические характеристики пары “инструмент-деталь”, определяющие условия взаимодействия режущего клина инструмента с деформируемым обрабатываемым материалом;
- динамические параметры системы резания, формирующиеся на основе параметров подсистем инструмента, детали и упруго-диссипативных характеристик, вносимых процессом резания.

Влияние режима обработки.

Оценка влияния режима обработки на состав колебательного процесса выполнена на 48-ми режимах резания при варьировании частоты вращения шпинделя в диапазоне 125..800 мин$^{-1}$, величины продольной подачи в диапазоне 0,07..0,14 и глубины резания 1 и 2 мм. В указанном перечне режимов выделены две группы с одинаковой "условной интенсивностью обработки" I_y, вычисляемой путем перемножения параметров режима обработки. Состав колебательного процесса оценивался по коэффициенту закономерной составляющей $K_з$, определяющему долю закономерных составляющих колебаний (на частотах собственных колебаний подсистем инструмента и детали) к общему уровню колебательного процесса.

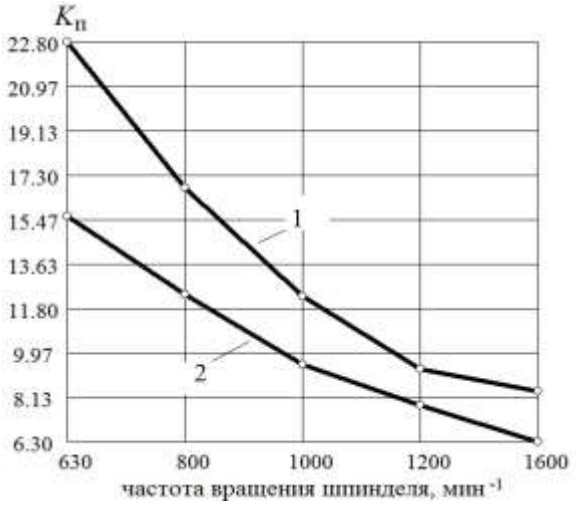
Результаты обработки данных представлены на рис. 2а. Как видно из приведенных графиков, одинаковые по условной интенсивности режимы обработки, но с разным сочетанием частот, подач и глубин резания приводят к различным наполнениям колебательного процесса закономерными составляющими. По критерию величины $K_з$ в указанных группах режимов можно выделить

оптимальные режимы (Iy=44 мм^2/мин; t=1 мм; n=400 мин$^{-1}$; S=0.11 мм/об; *K*з=0.323) и (Iy=88мм^2/мин; t=2 мм; n=315 мин$^{-1}$; S=0.14 мм/об; *K*з=0.309). К неоптимальным режимам отнесены (Iy=44 мм^2/мин; t=2 мм; n=200 мин$^{-1}$; S=0.11 мм/об; *K*з=0.735) и (Iy=88мм^2/мин; t=1 мм; n=800 мин$^{-1}$; S=0.11 мм/об; *K*з=0.579).



1 - группа режимов с Iy =88 мм2/мин;
2 - группа режимов с Iy =44 мм2/мин

а



1 -обработка инструментом №1;
2 -обработка инструментом №2

б

Рис. 2. Влияние частоты вращения шпинделя на закономерную составляющую

Трибологические характеристик пары "инструмент-деталь".

При упруго-пластическом деформирования обрабатываемого материала значимую роль приобретают процессы трения стружки о грани режущего инструмента. Нанесение антифрикционных покрытий способствует уменьшению сил трения и снижению энергетических затрат на стружкообразование, что должно оказывать влияние на структуру упруго-диссипативного возмущения подсистем инструмента и детали и, как следствие - на возбуждаемый колебательный процесс.

Результаты сравнительного исследования динамики резания базовыми пластинами (инструмент №1) и пластинами, обработанными низкотемпературным плазменным напылением (инструмент №2), приведены на рис. 2б. Оценивание колебательного процесса осуществлялось по коэффициенту пикообразности $K_п$ спектров колебаний, который имеет аналогию с коэффициентом закономерных составляющих колебаний, примененного ранее.

Как следует из анализа приведенных графиков при обработке инструментом №2 имеет место значительное уменьшение пикообразного характера спектров колебаний по сравнению с обработкой инструментом №1. Это указывает на то, что применение инструмента №2 приводит к уменьшению выбросов пиков в спектре колебаний, что свидетельствует о снижении уровня закономерной составляющей и о повышении стабильности резания. Наблюдаемые изменения в

колебательном процессе следует увязать с изменением структуры процесса упругопластического деформирования обрабатываемого материала и образуемых вследствие этого упруго-диссипативных составляющих возмущения.

Динамические параметры системы резания.

Важная роль в динамике резания принадлежит формообразующим подсистемам, которые воспринимают возмущение из зоны резания и реагируют на него в виде образования колебаний. Рассмотрим механизм образования колебаний в условиях действия упруго-диссипативных связей между подсистемами инструмента и детали на примере абразивной обработки. Его можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 3.

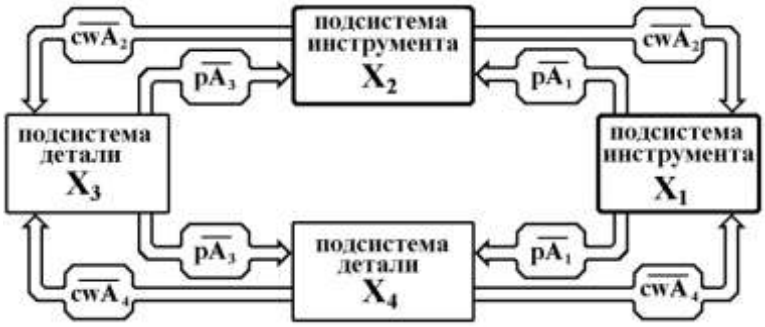


Рис. 3. Взаимодействие подсистем инструмента и детали при абразивной обработке посредством упруго-диссипативных связей в зоне резания:
w - частота колебания; $cw\overline{A_i}$ - векторы диссипативных связей; $p\overline{A_i}$ - векторы упругих связей; c - коэффициент диссипативной составляющей возмущения; p - коэффициент упругой составляющей возмущения

В системах резания, содержащих консольный инструмент, подсистемаX_1обладает пониженной жесткостью и наибольшей склонностью к образованию колебаний. Доминирующая роль подсистемы X_1в образовании колебаний заключается в том, что она вносит в колебательный процесс закономерные составляющие на своих собственных частотах. Такие закономерные формы колебаний при механической обработке часто оказывают отрицательное влияние на стабильность процесса резания и на качество обработанных поверхностей. Поэтому для повышения динамического качества систем резания, содержащих слабый элемент, возникает задача создания таких условий взаимодействия инструмента с деталью, которые обеспечивали бы максимально возможную диссипацию на частотах колебаний подсистемы X_1.

Указанная задача может найти решение на основе выявления роли и последующей коррекции упруго-диссипативных связей, образуемых в зоне резания. Анализ фазового портрета динамической системы резания при наличии в ней слабого элемента в виде подсистемы X_1 показал,

что диссипативная связь, реализуемая вектором $cw\overline{A}_4$, может добавлять в подсистему X_1 диссипативные свойства. Причем эффект влияния указанной связи можно повысить за счет роста уровня связанности подсистем X_4и X_1.Для проверки данного положения выполнен эксперимент, в котором увеличение связанности указанных подсистем достигалось установкой обрабатываемой детали в патрон станка посредством упругих элементов, что позволяло в определенных пределах изменять частоту ее собственных крутильных колебаний.

Результаты исследования приведены на рис. 4. Как видно, изменение крутильной жесткости детали оказывает значимое влияние на колебательный процесс по параметру $K_п$, а через него и на уровень микрорельефа обработанной поверхности (R_a). Понижение крутильной жесткости системы "деталь-патрон" от упругого кольца 1 к упругому кольцу 3 ведет к уменьшению коэффициента пикообразности $K_п$ спектра колебаний, что соответствует уменьшению закономерной составляющей колебаний.

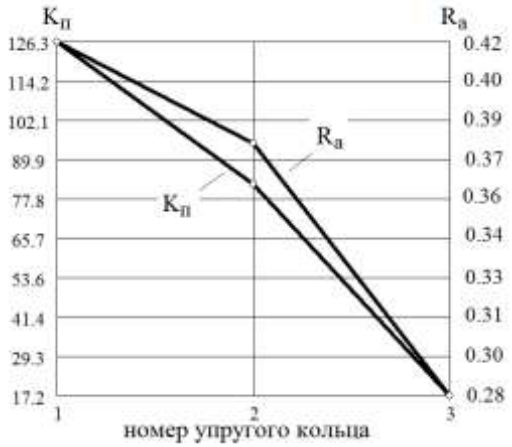


Рис. 4. Влияние упругой связи "деталь-патрон" на колебательный процесс ($K_п$) и уровень микронеровностей (R_a) обработанной поверхности

Выводы.

1. Упруго-диссипативные связи между инструментом и деталью, порождаемые упруго-пластическими деформационными процессами в зоне резания, формируются на основе сложного взаимодействия геометро-кинематических параметров движения режущих элементов в слое обрабатываемого материала, трибологических характеристик материалов пары "инструмент-деталь" и динамических параметров подсистем инструмента и детали.

2. На основе теоретико-экспериментальных исследований установлено, что каждый из указанных факторов может быть использован для целенаправленной коррекции динамических свойств системы резания и состава колебательного процесса по критерию минимизации в нем закономерных составляющих для обеспечения стабильности процесса резания.

УДК 621. 793. 79. 015

Повышение эффективности технологических процессов обработки динамическими методами поверхностного пластического деформирования

Шведова А. С., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, kazimirovas@mail.ru
Голубь Д. И., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия
Раздорский С. А., Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Россия
Руденко А. А., Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты исследований процессов отделочно-упрочняющей обработки деталей динамическими методами поверхностным пластическим деформированием (ППД). Установлены зависимости для определения глубины упрочненного слоя, степени упрочнения и шероховатости поверхности для центробежно-ротационной отделочно-упрочняющей обработки и вибрационной отделочно-упрочняющей обработки. Разработана методика оптимизации технологических процессов по критерию обеспечения долговечности обработанных деталей.

Abstract. The article presents the results of researches of processes of finishing-hardening treatment details dynamic methods of surface plastic deformation (SPD). The dependences for determining the depth of hardened layer, level of hardening and surface roughness for centrifugal rotary finishing-strengthening machining and vibratory finishing and hardening treatment. The developed method of optimization of technological processes according to the criterion of ensuring the durability of machined parts.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, качество поверхностного слоя детали, интенсивность деформации, предельная равномерная деформация.

Keywords: surface plastic deformation, surface layer quality of the parts, intensity of deformation, uniform deformation limit.

В современном машиностроении предъявляется высокий уровень требований к качеству и долговечности изготавливаемых деталей. Основной задачей технологов является - изготовление конкурентоспособного изделия с требуемым набором эксплуатационных свойств, способного долгое время выполнять свое функциональное назначение без текущего и капитального ремонтов.

Для решения этой задачи, в настоящее время, имеется большой количество современных способов, среди которых особое место занимает поверхностное пластическое деформирование (ППД). Применение динамических методов ППД на финишных этапах обработки положительно сказывается на качестве поверхностного слоя деталей. При обработке данными методами обеспечиваются минимальные высотные параметры шероховатости, мелкозернистая структура, целостность волокон металла, благоприятные сжимающие остаточные напряжения и упрочненный поверхностный слой, что в свою очередь положительно сказывается на таких эксплуатационных свойствах, как: усталостная долговечность, износостойкость, контактная жесткость, коррозионная устойчивость.

Наиболее распространенными методами, обеспечивающими ранее перечисленные преимущества, является вибрационная отделочно – упрочняющая обработка (ВиОУО) и центробежно-ротационная отделочно-упрочняющая обработка (ЦРОУО) [1].

При проектировании технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки, одной из основных задач является аналитический расчет ожидаемой степени упрочнения, глубины упрочненного слоя и шероховатости поверхности.

Значительные исследования в этой области проведены А. П. Бабичевым, И.В. Кудрявцевым, М. А. Тамаркиным, В.П. Пшибыльским, Д.Д. Папшевым, М.С. Дроздом и др.

После анализа теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в области динамических методов ППД, нами были получены зависимости для определения шероховатости, глубины и степени упрочнения [2].

Глубина упрочнения для ЦРОУО:

$$h_n = 43,36 \cdot \sqrt[4]{\frac{ab\rho_ш}{k_s \cdot c \cdot \sigma_T}} \left[1 - \frac{1}{2}\left(1 - \frac{b}{a}\right)^4\right] \cdot \sqrt{R_{эф} \cdot \omega \cdot R \cdot \sin\alpha} \qquad (1)$$

где R- радиус шарика; a и b – полуоси эллипса контакта; α - угол встречи шарика с поверхностью детали; $\rho_ш$ - плотность материала шарика; c– коэффициент несущей способности контактной поверхности; k_s - коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности детали на площадь фактического контакта; ω– угловая скорость вращения дна (ротора); $R_{эф}$ – эффективный радиус вращающегося дна (ротора); σ_T - предел текучести материала детали.

Для ВИОУО:

$$h_n = 15,2 \cdot \sqrt[4]{\frac{ab\rho_ш}{k_s \cdot c \cdot \sigma_T}} \left[1 - \frac{1}{2}\left(1 - \frac{b}{a}\right)^4\right] \cdot \sqrt{A \cdot f \cdot R \cdot \sin\alpha} \qquad (2)$$

где A– амплитуда колебаний рабочей камеры; f - частота колебаний.

Степень упрочнения для ЦРОУО:

$$\varepsilon = 1,11 \cdot \sqrt[4]{\frac{R^2 \cdot \omega^2 \cdot \rho_ш \cdot R_{эф}^2}{HB}} \qquad (3)$$

для ВиОУО:

$$\varepsilon = 17,86 \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_ш}{HB}} \cdot \sqrt{A \cdot f} \qquad (4)$$

где HB – твердость материала детали по Бринелю.

В результате проведения теоретических и экспериментальных исследований получена зависимость для определения среднего арифметического отклонения установившейся шероховатости поверхности при ВиОУО:

$$R_{аусm} = 0,0022 \cdot \sqrt{\frac{h_{\max} \cdot a \cdot b \cdot l_{ед}}{R^2}} \quad (5)$$

где $h_{\max}$ - максимальная глубина внедрения шарика.

Среднее арифметическое отклонение профиля $R_{ауст}$ при ЦРОУО можно рассчитать по зависимости:

$$R_{аусm} = 0,006 \cdot k_з \cdot \sqrt{\frac{h_{\max} \cdot a \cdot b \cdot l_{ед}}{R^2}} \quad (6)$$

где $l_{ед}$ - единичная длина; $k_з$ - коэффициент загрузки рабочей камеры.

На основании представленных зависимостей, разработана методика аналитического прогнозирования параметров поверхностного слоя деталей, обработанных динамическими методами ППД. Данные зависимости получили экспериментальную проверку и могут быть использованы для проектирования высокоэффективных, экономичных технологических процессов обработки динамическими методами ППД.

Оптимальным режимом ППД, проводимого с целью упрочнения деталей, испытывающих циклические нагрузки, является тот, который обеспечивает максимальное приращение предела выносливости детали по сравнению с его исходным значением. Задача оптимизации процесса упрочнения имеет два аспекта: физический и технологический. Первый заключается в выборе и обосновании параметров оптимизации, а второй – в технологическом обеспечении условий деформирования поверхностного слоя детали, отвечающих выбранному значению этого параметра.

В общем случае для материала с определенными физико-механическими свойствами величина предела выносливости детали зависит от следующих основных факторов: величины упрочненного слоя и физического состояния пластически деформированного слоя детали, величины и распределения остаточных сжимающих напряжений в детали после ППД.

Зависимости для определения глубины упрочненного слоя позволяют определить глубину упрочненного слоя, но не определяют оптимальное физическое состояние поверхностного слоя. Это состояние формируется в процессе обработки детали и определяется конкурирующим влиянием двух протекающих одновременно процессов – физического упрочнения (наклепа), с одной стороны, и разрушения с другой. Наибольшие остаточные напряжения сжатия близки к повышенному за счет наклепа пределу текучести материала детали, непрерывно возрастающему по мере увеличения интенсивности деформации.

В интересах усиления благоприятных факторов нужно стремиться к тому, чтобы интенсивность деформации поверхностного слоя была как можно больше. Однако, с ростом интенсивности деформации процесс разупрочнения также постепенно усугубляется, поэтому очевидно, что приращение предела выносливости детали будет наибольшим при оптимальной

интенсивности деформаций, которая должна быть больше интенсивности деформации на предел текучести ε_T и меньше интенсивности деформации непосредственно перед разрушением $\varepsilon_{разр}$.

В настоящее время можно считать установленными следующие положения:

1. главная часть деформационного упрочнения материала исчерпывается на стадии равномерной деформации $\varepsilon_i \prec \varepsilon_p$.
2. наиболее интенсивный рост количества и размера микродефектов в металле наблюдается за пределами равномерной деформации, т.е. при $\varepsilon_i \succ \varepsilon_p$.

Таким образом, при $\varepsilon_i = \varepsilon_p$ упрочнение материала близко к предельному, сжимающие остаточные напряжения близки к максимальным, а дефекты (микротрещины) не получают еще опасной степени развития. Из сказанного следует, что оптимальной интенсивностью деформации должна быть $\varepsilon_i = \varepsilon_p$.

Приближенные, но достаточно точные значения ε_p можно определять по зависимости [3]:

$$\varepsilon_p = \frac{245}{HD} \qquad (7)$$

где *HD* - динамическая твердость материала

Для круглого отпечатка интенсивность деформации можно определить по зависимости:

$$\varepsilon_i = 2,4\left(\frac{h}{R}\right)^{2/3} \qquad (8)$$

где *h* – глубина остаточной вмятины.

Для оптимизации технологических процессов обработки динамическими методами ППД в качестве целевой функции выбрана интенсивность деформации, то есть из всего множества проектных решений выделяется такое, которое обеспечивает при определенном сочетании технологических факторов величину интенсивности деформации наиболее близкую к равновесной. В качестве исходных данных, необходимых для начала расчета, для ВиОУО используются: радиусы шаров, амплитуда колебаний рабочей камеры, частота колебаний. При ЦРОУО: радиусы шаров, частота вращения рабочей камеры, объем загрузки рабочей камеры. При этом в качестве ограничительной функции, в зависимости от решаемых технологических задач, будет использоваться заданная глубина упрочненного слоя, степень упрочнения или шероховатость поверхности. При переборе и анализе вариантов принимается во внимание лишь подмножество проектных решений, удовлетворяющее заданным техническим условиям и заданной величине точности.

Далее рассчитываются показатели интенсивности деформации ε_i и предельной равномерной деформации ε_p. После определения величин деформации происходит сравнение полученных значений. После проведенных расчетов на экран выводятся параметры:

- при ЦРОУО: заданная глубина и степень упрочненного слоя, шероховатость поверхностного слоя, показатели интенсивности деформации и предельной равномерной деформации, радиус шарика среды, частота вращения дна (ротора) рабочей камеры, время обработки.

- при ВиОУО: заданная глубина и степень упрочненного слоя, шероховатость поверхностного слоя, показатели интенсивности деформации и предельной равномерной деформации, радиус шарика среды, частота колебаний рабочей камеры, амплитуда колебаний, время обработки.

На рисунки 1 и 2 представлены блок схемы алгоритмов оптимизации процесса ЦРОУО и ВиОУО.

Разработанная обобщенная теория прошла комплексную экспериментальную проверку и может быть использована для оптимизации технологических процессов обработки деталей динамическими методами ППД в различных отраслях промышленности по критерию обеспечения долговечности обрабатываемых деталей.

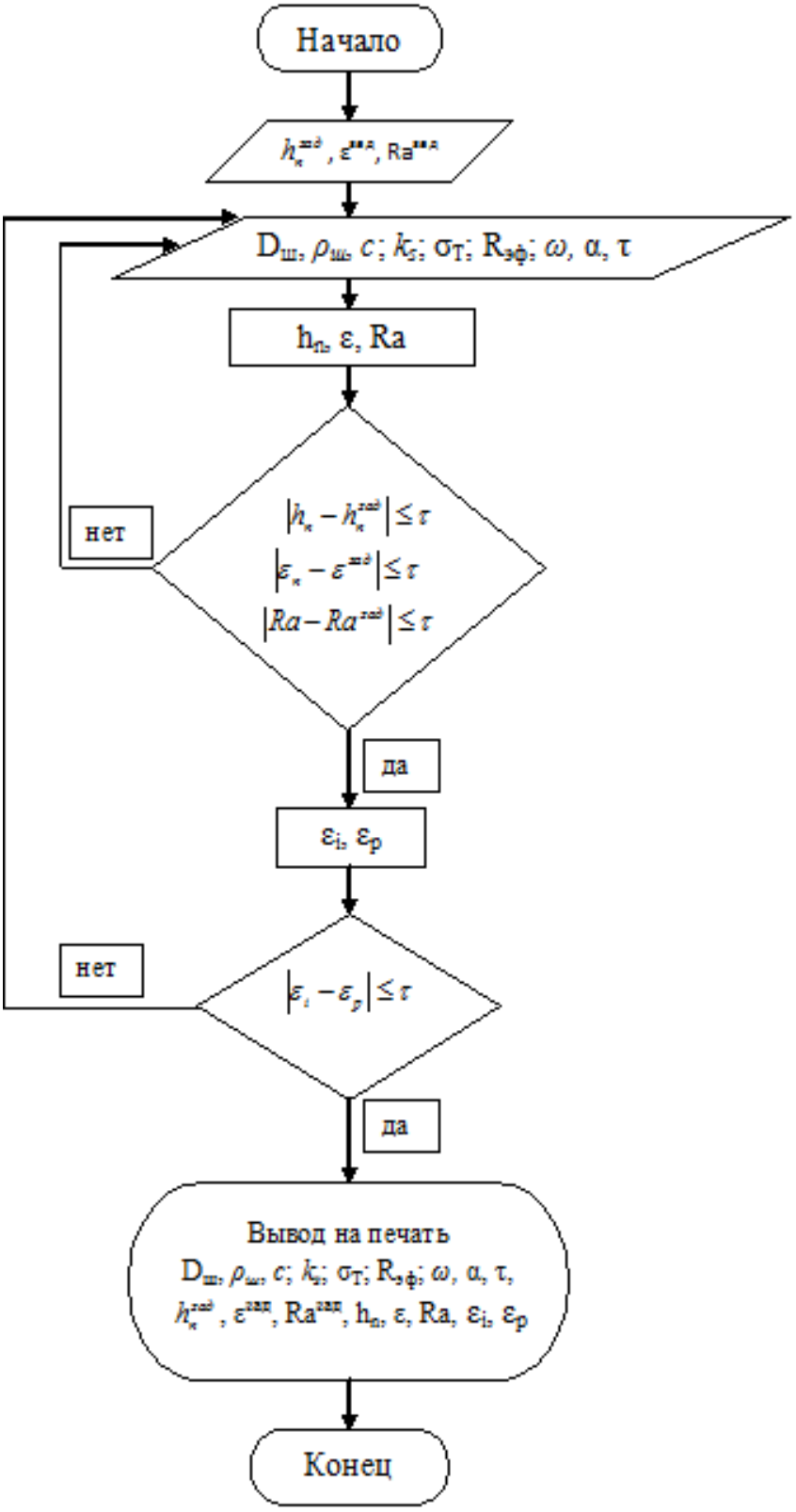


Рисунок 1. Блок-схема алгоритма оптимизации процесса ЦРОУО.

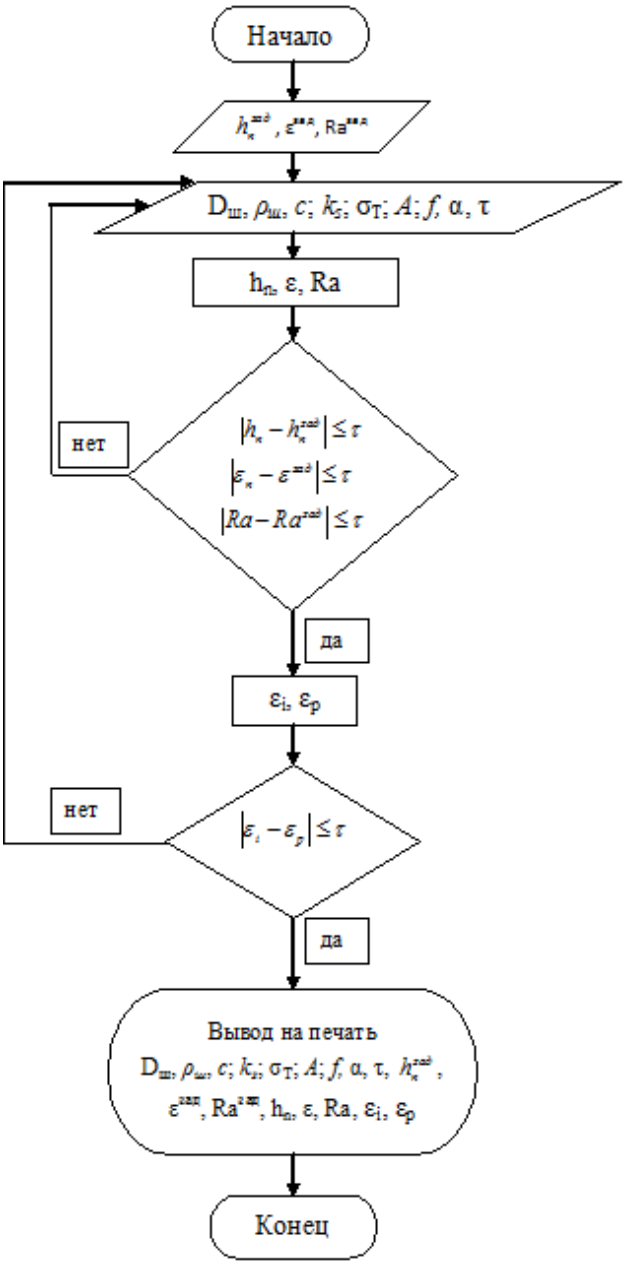


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма оптимизации процесса ВиОУО.

Библиографический список

1. Тамаркин, М. А. Технологические основы обработки деталей ППД в гранулированных рабочих средах / Э. Э. Тищенко // Наукоемкие технологии в машиностроении и авиастроении: Материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. – Рыбинск. - 2012.

2. Шведова, А. С. Исследование влияние параметров упрочнения поверхностного слоя деталей при обработке динамическими методами ППД на увеличение ЖЦ деталей машин / Казаков Д. В., Гвоздиков О. Ю., Новокрещенов С. А. // V Всерос. конф. с междунар. уч. «Жизненный цикл конструкционных материалов»: сб. науч. тр. - Иркутск, 2015.

3. Дрозд М.С. Инженерные расчёты упругопластической контактной деформации. /М.С. Дрозд, М.М. Матлин, Ю.И. Сидякин. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

УДК 621-182.66:621.88:621.9.048.6

Разборка резьбовых соединений виброволновым методом в ходе восстановления и утилизации изделий машиностроения

Бабичев А.П., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, vibrotech@mail.ru)

Эссола Д. ,к.т.н., Университет Камеруна, Камерун, essola_die@yahoo.com

Вейсса Гутета Кабетаи, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, Эфиопия, uni100@yahoo.com

Пастухов Ф.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Вёснин В.Н., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Аннотация. Рассмотрены вопросы, связанные с разборкой резьбовых соединений с использованием низкочастотных колебаний (15-50 Гц), сообщаемых виброволновым методом, посредством сплошного стального стержня, способствующих многократному снижению крутящего момента разборки. Приведены результаты сравнительных испытаний, учитывающие обработку одноименных соединений выдержанных на влажном воздухе с различными интервалами времени, а так же результаты, характеризующие взаимосвязь используемой схемы виброволнового воздействия на элементы соединении, продолжительности воздействия на объект и эффективность разборки.

Ключевые слова: разборка, разъемные резьбовые соединения, восстановление, ремонт, утилизация, виброволновое воздействие, жизненный цикл изделия.

Abstract. The problems related are about the disassembly of detachable threaded connections using low-frequency oscillations (15-50 Hz), that are communicate by vibrowave method through compact steel rod to facilitate multiple reduction of disassembling torque. The comparative analysis of similar treaded connections that have been maintained in moist air at various intervals of time as well as the results characterizing the relationship of used vibro-wave impact scheme on the elements of the compound, the duration of vibro-wave impact exposure on the object and the efficiency of disassembly are given in the work.

Keywords: disassembly, detachable threaded connections, restoring, repair, utilization (recycling), vibro-wave impact, product life cycle.

Жизненный цикл изделия (ЖЦИ) охватывает все стадии прохождения его с начала появления идеи о его создании. Его понятие включает в себя все стадии жизни изделия - от изучения рынка перед проектированием, производством, эксплуатацией и до утилизации после использования (рис.1).

Рис.1. Стадийная структура жизненного цикла изделия

Эксплуатация изделий предусматривает его использование, хранение и транспортирование при; периодическом применении, обслуживании и ремонт, а так же вторичного использования по новому применению, частично или полностью после утилизации. С учётом различного функционального назначения рациональная эксплуатация изделия обеспечивается выполнением установленного конструктором технического обслуживания и восстановления при необходимости. Последний характеризуется сложным структурным производственным процессом, и состоит из следующих основных действий: многостадийные моечно-очистные операций, многоэтапная разборка, дефектация, восстановление, сборка машины, а также вспомогательные операции: контроль качества, складирование, транспортирование. Вторичное использование изделия осуществляется в случае смены потребителя или при использовании по новому применению так называемой первичной формы утилизация изделия. Опыт показывает, что более половины машин проводят хотя бы один из выявленных путей в течение их жизненного цикла. В процессе ремонта машин после их дефектации, а так же в результате разборки изделия, не подвергающихся ремонту и восстановлению, детали подразделяются на три группы: годные, требующие ремонта и негодные, представляющие собой вторичную форму утилизация изделия. Данный вид утилизации приемлем для всех видов изделий, их составных частей, сборочных единиц, а так же деталей. В зависимости от применяемой на предприятии формы ремонта и утилизации, разобранные изделия или их элементы, могут быть применены после их восстановления в данном, или в подходящем изделии, а так же в качестве материального ресурса (например, запчастей или комплектующих для других изделий). Необходимость ограничить загрязнение окружающей среды, экономия природных и материальных ресурсов, энергии, сокращение времени и средств, для производства новой продукции различного назначения ведётся как в России, так и во многих развитых странах. Эта тенденция более эффективна в регулируемой производственной среде с информационной поддержкой (частной или государственной). Утилизировать можно деталь, сборочную единицу, а так же любые машины в целом.

Производственный процесс утилизации, так же как и ремонт содержит многостадийную очистку и мойку и чередуется разборкой различного рода соединений (рисунок 2). Среди всех разъёмных соединений, широко применяются резьбовые.

Рис.2. Обобщенная схема утилизация изделия

Воздействие окружающей среды и температурные колебания существенно влияют на исходное состояние соединения, а также существенно изменяют усилия необходимые для его «разъединения, образуя местные связи между деталями участвующими в соединении, и затрудняют процесс разборки составных частей изделия. Известны примеры применения вибрационного воздействия при разборке машин различного назначения при ремонте и утилизации. Виброволновое воздействия является одним из способов и имеет уникальный характер ослабления момента затяжки, образующихся связей резьбовых разъёмных соединений, оказывается одним из эффективных путей решения поставленной задачи [1, 2].

Для подтверждения выше изложенного, проведены экспериментальные исследования по схеме, представленной на рисунке 3.

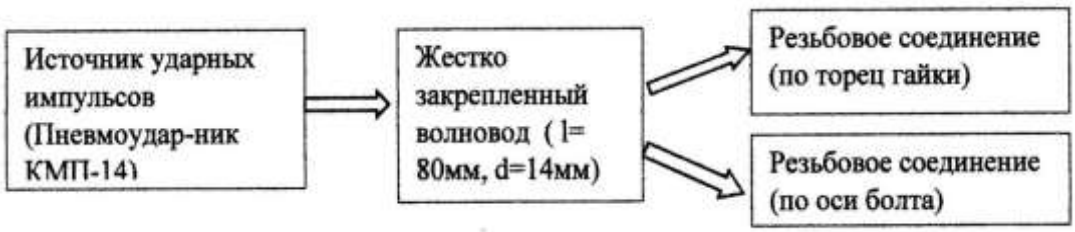
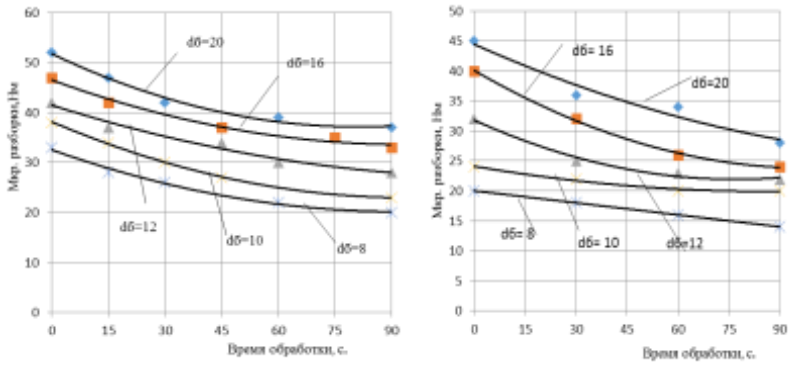


Рис. 3 - Нагружение резьбового соединения с применением волновода

Полученные результаты (рисунок 4 а, б) показывают, что по мере возрастания диаметра нежного элемента резьбового соединения и длительности воздействия на него окружающей среды, происходит возрастание крутящего момента, потребного для разборки. Обработка соединения при помощи волновода обеспечивает снижение крутящего момента затяжки до определенного значения, при котором продолжительность процесса разборки оптимальна. Дальнейшая обработка не сопровождается существенным изменением $M_{кр}$. Установлено, что сообщение виброволнового воздействия перпендикулярно оси гайки создает наилучшие условия для разборки резьбового соединения (рисунок 4, а).



а) б)

Рис.4. Зависимость крутящего момента при разборке резьбового соединения от продолжительности процесса при передаче виброволнового воздействия через волновод: а) перпендикулярно оси болта; б) параллельно оси болта.

На рисунке 5 приведены результаты исследования влияния продолжительности виброволнового воздействия на резьбовые соединения, выдержанные на воздухе с постоянной влажностью, на изменение крутящего момента при разборке. Установлено, что увеличение диаметральных размеров от 8 до 16 мм резьбовой пары приводит к повышению требуемого момента для разборки. Соединения, подверженные воздействию влажного воздуха в течение месяца (рисунок 5, кривые а) требовали для разборки приложения большого крутящего момента, по сравнению с деталями недельной выдержки (рисунок 5, кривые б). Это объясняется, тем, что изделия более подвержены коррозии по контактирующим поверхностям.

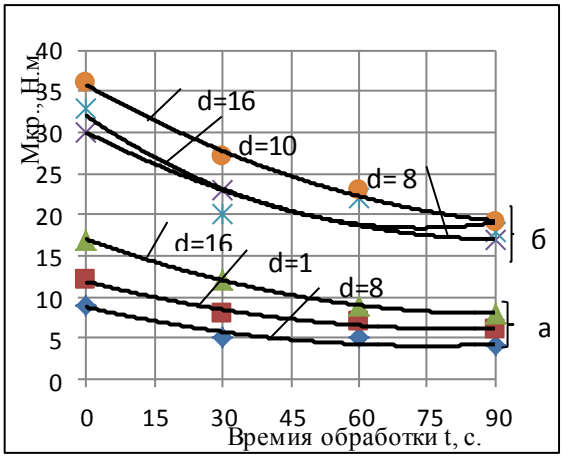
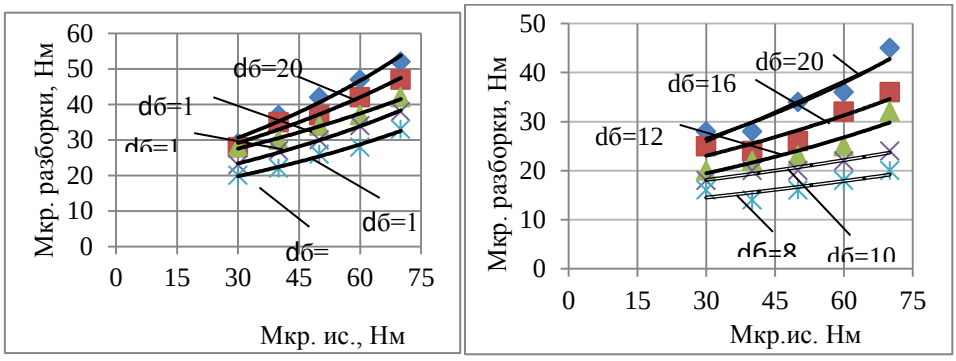


Рис. 5. Изменение $M_{кр}$ пр
азборке резьбового соединения с
родолжительности вибрационног
оздействия для различных параметро
ары болт-гайка при исходном крутяще
оменте $M_з$ = 30 Н.м в зависимости с
ремени выдержки соединения н
[illegible]

Виброволновая обработка образцов, выдержанных в условиях влажного воздуха при разных интервалах времени, обеспечивает постепенное снижение крутящего момента при увеличении продолжительности процесса от 30 до 75 секунд (рисунок 6, а, б). Стоит отметить, что крутящий момент, требуемый для разборки резьбового соединения, существенно зависит от момента затяжки.



а) б)

Рис.6. Зависимость величины крутящего момента при разъеме резьбового соединения от затяжки, диаметров соединяемых элементов и схемы нагружения (toe = 60 с): а) вибрационное воздействие по грани гайки; б) вибрационное воздействие по оси болта.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что виброволновое воздействие достаточно интенсивно разрушает образовавшиеся связи в процессе эксплуатации деталей участвующих в соединениях, до определенного значения. Это позволяет заметно снизить трудоемкость, а так же сократить, время выполнения отдельных разборочных операций в процессе ремонта или утилизации изделий машиностроения.

Библиографический список

1.Карпунин М.Г. Жизненный цикл и эффективность машин. / М.Г. Карпунин, Я.Г.Любинецккий, Б.И. А Майданчик. - М.: Машиностроение, 1989г. - 312 с.

2.Тельнов Н.Ф. Ремонт машин. - М.: Агропромиздат, 1992 г., 560 с.

3. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Изд. 2-е, перераб. И доп. – Ростов Н/д: Издательский центр ДГТУ,2008.-694 с.

4. Бабичев А.П., Тамаркин М.А. Физико- технологические основы методов обработки. Учеб. пособие. – Ростов Н/д: Издательский центр ДГТУ,2003.-430 с.

УДК 62-523.8

Определение параметров движения схвата параллельного манипулятора с гибкими звеньями под действием на груз внешней возмущающей силы

Алепко А.В., Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета, г. Шахты, Россия dtnt@bk.ru,

Яковенко Д.М., Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета, г. Шахты, Россия dmitriy-rt@mail.ru,

Наумов И.И., Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета, г. Шахты, Россия naumov_ivan85@mail.ru

Аннотация: В работе рассматривается математическая модель структуры манипулятора с подвесом схвата на гибких звеньях. По измеренным значениям полных усилий в звеньях параллельного манипулятора и использовании полученных аналитических выражений, возможно, определить направление и величину вектора внешней возмущающей силы, прикладываемой к точке крепления нагруженного схвата. Определены скорости изменения обобщенных координат при движении нагруженного схвата манипулятора вдоль отрезка прямой с постоянной линейной скоростью.

Ключевые слова: манипулятор, тросовый, гибкие звенья, параллельный манипулятор, перемещение груза.

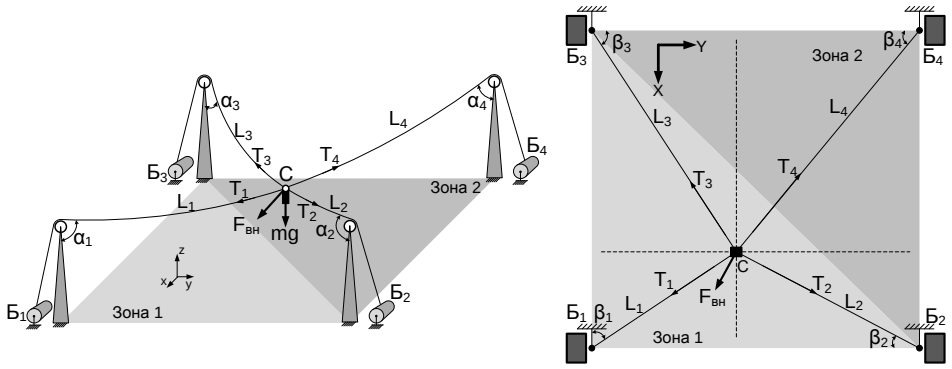
Abstract: In this paper received the mathematical model of the structure of manipulator with the suspension gripper on flexible links. Based measured values of the total effort in the links of the parallel structure manipulator and use of analytical expressions may determine the direction and magnitude of the vector of external perturbing forces applied to the anchor point of the loaded gripper. Identified the rates of change of the generalized coordinates when moving along a line segment with a constant linear velocity .

Keywords: manipulator, rope, flexible links, parallel manipulator, the movement.

В настоящее время для перемещения объектов в пространстве применяют различные конструкции подъемно-транспортных машин, которые являются типовым оборудованием производственных и металлургических цехов, закрытых и открытых складов.

Требуется определить параметры движения нагруженного схвата параллельного манипулятора с гибкими звеньями, вызванного действием внешней возмущающей силы, обозначенной как $F_{вн}$ на рисунке 1.

Известно, что действие веса груза mg создает в звеньях параллельного манипулятора усилия, обозначенные через T_1, T_2, T_3, T_4 на рисунке 1.



а) б)

Рисунок1. – Геометрическая интерпретация процесса распределения усилий в звеньях параллельного манипулятора: а – общий вид, б – в плоскости XOY

где $Б_1$, $Б_2$, $Б_3$, $Б_4$ – барабаны, осуществляющие изменение длины звеньев манипулятора; P_1, P_2, P_3, P_4 – ролики; C – схват с грузом; mg – вектор силы тяжести.

В работе [1] получены уравнения, позволяющие рассчитать значение усилий в звеньях манипулятора в зависимости от положения нагруженного. Добавив к данным уравнениям вектор внешней возмущающей силы $F_{вн}$, получим:

$$\begin{aligned}
&(T_1+\Delta T_1)\cdot\sin\alpha_1+(T_2+\Delta T_2)\cdot\sin\alpha_2+(T_3+\Delta T_3)\cdot\sin\alpha_3=mg+F_{внZ},\\
&(T_1+\Delta T_1)\cdot\cos\alpha_1\cdot\cos\beta_1+(T_2+\Delta T_2)\cdot\cos\alpha_2\cdot\sin\beta_2+(T_3+\Delta T_3)\cdot\cos\alpha_3\cdot\sin\beta_3=F_{внX},\\
&(T_1+\Delta T_1)\cdot\cos\alpha_1\cdot\sin\beta_1+(T_2+\Delta T_2)\cdot\cos\alpha_2\cdot\cos\beta_2+(T_3+\Delta T_3)\cdot\cos\alpha_3\cdot\cos\beta_3=F_{внY}.
\end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
&(T_1+\Delta T_1)\cdot\sin\alpha_1+(T_2+\Delta T_2)\cdot\sin\alpha_2+(T_3+\Delta T_3)\cdot\sin\alpha_3=mg+F_{внZ},\\
&(T_1+\Delta T_1)\cdot\cos\alpha_1\cdot\cos\beta_1+(T_2+\Delta T_2)\cdot\cos\alpha_2\cdot\sin\beta_2+(T_3+\Delta T_3)\cdot\cos\alpha_3\cdot\sin\beta_3=F_{внX},\\
&(T_1+\Delta T_1)\cdot\cos\alpha_1\cdot\sin\beta_1+(T_2+\Delta T_2)\cdot\cos\alpha_2\cdot\cos\beta_2+(T_3+\Delta T_3)\cdot\cos\alpha_3\cdot\cos\beta_3=F_{внY}.
\end{aligned} \quad (2)$$

В уравнениях (1) и (2) T_1, T_2, T_3, T_4 – измеренные значения усилий в соответствующих звеньях манипулятора при отсутствии внешней возмущающей силы $F_{вн}$, которая представлена в виде проекций на оси декартовой системы координат $F_{внX}$, $F_{внY}$, $F_{внZ}$; ΔT_1, ΔT_2, ΔT_3, ΔT_4– приращения усилий в звеньях манипулятора, вызванные действием внешней возмущающей силы $F_{вн}$. Коэффициенты $\sin\alpha_1$, $\sin\alpha_2$, $\sin\alpha_3$, $\sin\alpha_4$, $\cos\alpha_1$, $\cos\alpha_2$, $\cos\alpha_3$, $\cos\alpha_4$, $\sin\beta_1$, $\sin\beta_2$, $\sin\beta_3$, $\sin\beta_4$, $\cos\beta_1$, $\cos\beta_2$, $\cos\beta_3$, $\cos\beta_4$, получены с использованием методом элементарной геометрии.

Выразив искомые компоненты вектора внешней возмущающей силы $F_{\text{вн}}$ ($F_{\text{вн}X}$, $F_{\text{вн}Y}$, $F_{\text{вн}Z}$) из уравнений (1), (2), получим следующие аналитические формулы:

$$\begin{cases} F_{\text{вн}Z} = (T_1 + \Delta T_1) \cdot sin\alpha_1 + (T_2 + \Delta T_2) \cdot sin\alpha_2 + (T_3 + \Delta T_3) \cdot sin\alpha_3 - mg, \\ F_{\text{вн}X} = (T_1 + \Delta T_1) \cdot cos\alpha_1 \cdot cos\beta_1 + (T_2 + \Delta T_2) \cdot cos\alpha_2 \cdot sin\beta_2 - (T_3 + \Delta T_3) \cdot cos\alpha_3 \cdot sin\beta_3, \\ F_{\text{вн}Y} = -(T_1 + \Delta T_1) \cdot cos\alpha_1 \cdot sin\beta_1 + (T_2 + \Delta T_2) \cdot cos\alpha_2 \cdot cos\beta_2 - (T_3 + \Delta T_3) \cdot cos\alpha_3 \cdot cos\beta_3. \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} F_{\text{вн}Z} = (T_2 + \Delta T_2) \cdot sin\alpha_2 + (T_3 + \Delta T_3) \cdot sin\alpha_3 + (T_4 + \Delta T_4) \cdot sin\alpha_4 - mg, \\ F_{\text{вн}X} = (T_2 + \Delta T_2) \cdot cos\alpha_2 \cdot sin\beta_2 - (T_3 + \Delta T_3) \cdot cos\alpha_3 \cdot sin\beta_3 - (T_4 + \Delta T_4) \cdot cos\alpha_4 \cdot sin\beta_4, \\ F_{\text{вн}Y} = (T_2 + \Delta T_2) \cdot cos\alpha_2 \cdot cos\beta_2 - (T_3 + \Delta T_3) \cdot cos\alpha_3 \cdot cos\beta_3 + (T_4 + \Delta T_4) \cdot cos\alpha_4 \cdot cos\beta_4. \end{cases} \quad (4)$$

Таким образом, по измеренным значениям полных усилий в звеньях параллельного манипулятора и использовании полученных аналитических выражений (3) и (4) возможно определить направление и величину вектора внешней возмущающей силы, прикладываемой к точке крепления нагруженного схвата.

Нагруженный схват манипулятора будет перемещаться по линейной траектории из точки $\text{М}_{\text{нач}}(x_{\text{нач}}, y_{\text{нач}}, z_{\text{нач}})$ в точку $\text{М}_{\text{кон}}(x_{\text{кон}}, y_{\text{кон}}, z_{\text{кон}})$ с постоянной линейной скоростью, определяемой величиной внешней возмущающей силы $F_{\text{вн}}$. Так как координаты $(x_{\text{нач}}, y_{\text{нач}}, z_{\text{нач}})$ точки $\text{М}_{\text{нач}}$, определяющей начало отрезка линейной траектории движения нагруженного схвата известны, то координаты $(x_{\text{кон}}, y_{\text{кон}}, z_{\text{кон}})$ точки $\text{М}_{\text{кон}}$ можно вычислить следующим образом:

$$\begin{cases} x_{\text{кон}} = x_{\text{нач}} + S \cdot F_{\text{вн}X\text{норм}}, \\ y_{\text{кон}} = y_{\text{нач}} + S \cdot F_{\text{вн}Y\text{норм}}, \\ z_{\text{кон}} = z_{\text{нач}} + S \cdot F_{\text{вн}Z\text{норм}}, \end{cases} \quad (5)$$

где S – величина пути, пройденного схватом с грузом, на протяжении которого действовала внешняя возмущающая сила $F_{\text{вн}}$, $F_{\text{вн}X\text{норм}}$, $F_{\text{вн}Y\text{норм}}$, $F_{\text{вн}Z\text{норм}}$ – нормированные компоненты вектора $F_{\text{вн}}$, определяемые как:

$$\begin{cases} F_{\text{вн}X\text{норм}} = \frac{F_{\text{вн}X}}{|F_{\text{вн}}|}, \\ F_{\text{вн}Y\text{норм}} = \frac{F_{\text{вн}Y}}{|F_{\text{вн}}|}, \\ F_{\text{вн}Z\text{норм}} = \frac{F_{\text{вн}Z}}{|F_{\text{вн}}|}. \end{cases} \quad (6)$$

Когда ведущей координатой является координата x, ведомые координаты y и z могут быть вычислены по следующим уравнениям:

$$\begin{pmatrix} y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{y_{\text{кон}} - y_{\text{нач}}}{x_{\text{кон}} - x_{\text{нач}}}(x - x_{\text{нач}}) + y_{\text{нач}} \\ \frac{z_{\text{кон}} - z_{\text{нач}}}{x_{\text{кон}} - x_{\text{нач}}}(x - x_{\text{нач}}) + z_{\text{нач}} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

где $x_{\text{нач}} \le x \le x_{\text{кон}}$. Если ведущей является координата y, то ведомые координаты x и z могут быть вычислены следующим образом:

$$\begin{pmatrix} x \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_{\text{кон}} - x_{\text{нач}}}{y_{\text{кон}} - y_{\text{нач}}}(y - y_{\text{нач}}) + x_{\text{нач}} \\ \frac{z_{\text{кон}} - z_{\text{нач}}}{y_{\text{кон}} - y_{\text{нач}}}(y - y_{\text{нач}}) + z_{\text{нач}} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $y_{\text{нач}} \le y \le y_{\text{кон}}$. По аналогии с (7) и (8), если ведущей является координата z, то ведомые координаты x и y можно найти из уравнений:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_{кон}-x_{нач}}{z_{кон}-z_{нач}}(z-z_{нач})+x_{нач} \\ \frac{y_{кон}-y_{нач}}{z_{кон}-z_{нач}}(z-z_{нач})+y_{нач} \end{pmatrix},(9)$$

где $z_{нач} \le z \le z_{кон}$. Подставив (8) в (3), получим закон изменения обобщенных координат $L1$, $L2$, $L3$ и $L4$ вдоль линейной траектории, заданной двумя точками $M_{нач}$ и $M_{кон}$ в пространстве:

$$\begin{pmatrix} L1(x) \\ L2(x) \\ L3(x) \\ L4(x) \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} \sqrt{(x1-x)^2+(\frac{y_{кон}-y_{нач}}{x_{кон}-x_{нач}}(x-x_{нач})+y_{нач}-y1)^2+(z1-\frac{z_{кон}-z_{нач}}{x_{кон}-x_{нач}}(x-x_{нач})+z_{нач})^2} \\ \sqrt{(x2-x)^2+(\frac{y_{кон}-y_{нач}}{x_{кон}-x_{нач}}(x-x_{нач})+y_{нач}-y2)^2+(z2-\frac{z_{кон}-z_{нач}}{x_{кон}-x_{нач}}(x-x_{нач})+z_{нач})^2} \\ \sqrt{(x-x3)^2+(\frac{y_{кон}-y_{нач}}{x_{кон}-x_{нач}}(x-x_{нач})+y_{нач}-y3)^2+(z3-\frac{z_{кон}-z_{нач}}{x_{кон}-x_{нач}}(x-x_{нач})+z_{нач})^2} \\ \sqrt{(x-x4)^2+(\frac{y_{кон}-y_{нач}}{x_{кон}-x_{нач}}(x-x_{нач})+y_{нач}-y4)^2+(z4-\frac{z_{кон}-z_{нач}}{x_{кон}-x_{нач}}(x-x_{нач})+z_{нач})^2} \end{pmatrix}(10)$$

Для определения скорости изменения обобщенных координат $v1$, $v2$, $v3$ и $v4$ при движении нагруженного схвата манипулятора вдоль отрезка прямой с постоянной линейной скоростью v, используем векторный метод, сущность которого поясняет рисунок 2.

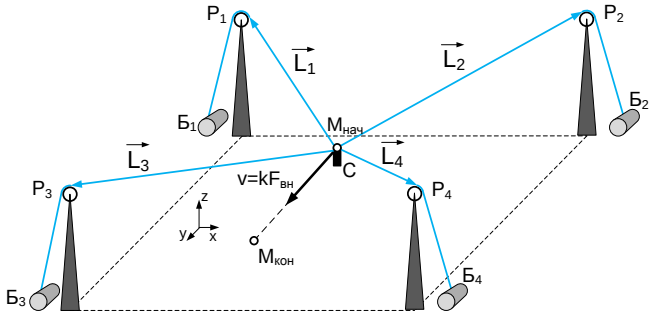


Рисунок 2 – Схема к задаче о нахождении обобщенных скоростей

Используя известные методы аналитической геометрии величины обобщенных скоростей $v1$, $v2$, $v3$ и $v4$ определим как проекции вектора линейной скорости v на вектора $\overrightarrow{L1}$, $\overrightarrow{L2}$, $\overrightarrow{L3}$, $\overrightarrow{L4}$, то есть:

$$\begin{pmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \\ v4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{(L1_X \cdot kF_{внX})+(L1_Y \cdot kF_{внY})+(L1_Z \cdot kF_{внZ})}{\sqrt{kF_{внX}{}^2+kF_{внY}{}^2+kF_{внZ}{}^2}} \\ \frac{(L2_X \cdot kF_{внX})+(L2_Y \cdot kF_{внY})+(L2_Z \cdot kF_{внZ})}{\sqrt{kF_{внX}{}^2+kF_{внY}{}^2+kF_{внZ}{}^2}} \\ \frac{(L3_X \cdot kF_{внX})+(L3_Y \cdot kF_{внY})+(L3_Z \cdot kF_{внZ})}{\sqrt{kF_{внX}{}^2+kF_{внY}{}^2+kF_{внZ}{}^2}} \\ \frac{(L4_X \cdot kF_{внX})+(L4_Y \cdot kF_{внY})+(L4_Z \cdot kF_{внZ})}{\sqrt{kF_{внX}{}^2+kF_{внY}{}^2+kF_{внZ}{}^2}} \end{pmatrix},(11)$$

Для проверки адекватности полученной математической модели с использованием среды Matlab 7.11.0 (R2010b) была разработана компьютерная модель. Вертикальные колонны установлены в точках $P_1(1;0;1)$, $P_2(1;1;1)$, $P_3(0;0;1)$, $P_4(0;1;1)$, вес груза $mg = 1$, координаты точки, определяющей его начальное положение в пространстве $M_{нач}(0{,}5;0{,}5;0{,}5)$, вектор внешней возмущающей силы направлен параллельно плоскости XOY и величины приращений ΔT_1 = 0,87, ΔT_2 = 0,015, ΔT_3 = -0,85, ΔT_4 = 0, представлены на рисунках ниже.

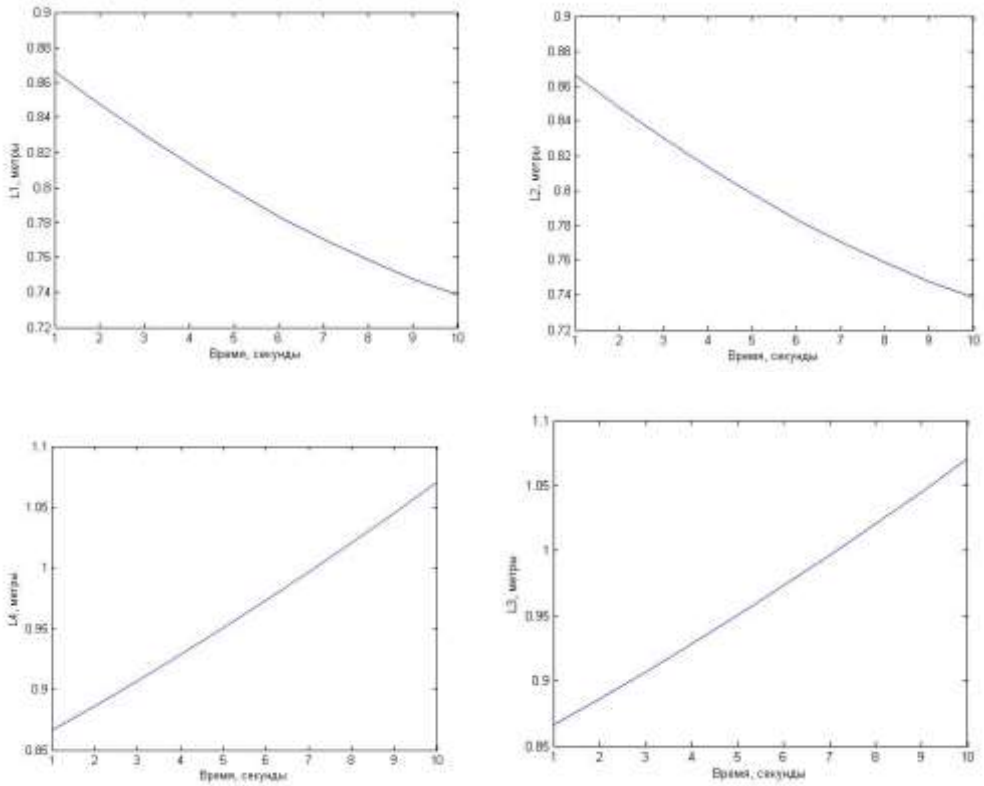


Рисунок 4 – Изменение длин тросов для перемещения нагруженного схвата согласно заданному вектору внешней силы.

В результате полученных систем нелинейных уравнений математическая модель позволяет режиме реального времени отслеживать текущее внешнее усилие и регулировать скорость перемещения груза. Данные исследования могут быть использованы при проектировании САУ данного манипулятора с целью транспортировки груза за счет прямого влияния на процесс перемещения.

Библиографический список

1. Валюкевич Ю.А., Алепко А. В., «Планирование траектории перемещения манипулятора с подвесом схвата на гибких звеньях (часть 1)», Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки», №6 (159),– Новочеркасск: 2011

2. Толстунов О.Г., Валюкевич Ю.А. Исследование и анализ характеристик параллельных манипуляторов с гибкими связями. //Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4; URL:www.science-education.ru/104-6868

Progressive Age Monitoring in Many-core for Balancing Wear-out of the Cores

Somayeh Sadeghi-Kohan, School of Electrical and Computer Engineering University of Tehran, Tehran, Iran, s.kohan@cad.ut.ac.ir

Zainalabedin Navabi, School of Electrical and Computer Engineering University of Tehran, Tehran, Iran, navabi@cad.ut.ac.ir

Abstract. Process variation in a many-core system causes heterogeneous timing characteristics among various cores. Often, cores in such a system can operate at higher frequencies than the frequency that is set for the system. Progressive age measurement of individual cores can help a better task scheduling to cause a more uniform aging among cores. This requires age monitors that collect progressive age information of cores in a many-core. This paper focuses on monitor structures for implementation of progressive age detection. Time dependent information provided by monitors will be useful in many-core dynamic task scheduling causing a longer life-time.

Keywords— self-adjusting monitors, many-core, phase-shift clock aging phenomena

A Low-Overhead Sensor for Age Monitoring in FPGAs

Mohammad Ebrahimi, School of Electrical and Computer Engineering University of Tehran, Tehran, Iran, m.ebrahimi@cad.ut.ac.ir

Zainalabedin Navabi, School of Electrical and Computer Engineering University of Tehran, Tehran, Iran, navabi@cad.ut.ac.ir

Abstract. This work is on programmable aging sensors that can be embedded in an FPGA with a minimum impact on FPGA design flow. The sensors have negligible power and area overheads as they utilize unused resources during hardware mapping. We will be monitoring paths that are more likely to be affected by aging. On such paths, late transitions at selected nodes in the circuit will indicate FPGA aging. Selected nodes are on paths with high activity, and with delay values within 85% to 95% of the circuit critical paths. Implementation steps of sensor insertion are performed automatically with a limited human interaction.

Keywords—aging sensor; field programmable gate array; late transition detection

Role of HDLs in Design and Description of Modern Digital Systems

Zainalabedin Navabi, School of Electrical and Computer Engineering University of Tehran, Tehran, Iran, navabi@cad.ut.ac.ir

The history of hardware description language goes back to 1960's when IBM introduced APL (A Programming Language) for their in-house digital circuit modeling and simulation. The early 1970's witnessed a rise of HDLs like AHPL (originally derived from APL), DDL, CDL, and other primarily register transfer level (RTL) languages. The advent of VHDL in the 1980's formalized RTL languages and gave a new meaning to electronic design automation (EDA). Thanks to today's HDL based electronic design, methodologies and tools for simulation, synthesis, verification, physical modeling, and post-manufacturing test are now well in-place and are essential for digital designers.

With the present changes in electronic system design technology, which has defined ESL as the next higher level of design abstraction, and mixed-signal simulation requirements, HDLs are being redefined and evolving to a higher level. At this level, digital design is redefined as putting together digital, analog, and software components, and defining communication between them. This requires new design methodologies based on new HDLs.

This talk begins with a presentation of history of HDLs in the last half a century. Tools as they became available to digital designers at various abstraction levels will be discussed. Environments and methodologies as they evolved and changed requirements for hardware description languages will be discussed. We will show how new HDLs are changing design of digital systems, and why it is important to focus on HDLs and abstract description of hardware. The talk concludes by presentation of shortcomings of existing HDLs and areas for research and development in this area.

УДК 658-51

Адаптация динамических систем на базе комплексного использования алгоритмов объединенного принципа максимума

Костоглотов А.А., Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия, kostoglotov@me.com

Лазаренко С.В., Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия, rh3311@mail.ru

Горбенко М.А., Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия, gorbenkomaxal@gmail.com

Лященко З.В., Ростовский государственный университет путей и сообщения, Ростов-на-Дону, Россия, lyashchenko.zoya@mail.ru

Лосев В.А., Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал)ДГТУ г. Шахты,, Россия, aibolit_773@mail.ru

Аннотация: В работе предложен новый подход к идентификации параметров динамических систем, основанный на использовании двух эффективных методов решения обратных некорректных задач – объединенного принципа максимума в сочетании с вариационным методом регуляризации [1,2,3,4,5].

Ключевые слова: фильтр Калмана, уравнение оптимальной траектории, вариационный метод, объединённый принцип максимума.

Abstract. In this paper we propose a new approach to the identification of parameters of dynamic systems based on using two effective methods for solving ill-posed inverse problems - combined maximum principle in conjunction with the variational method of regularization [1,2,3,4,5].

Keywords: Kalman filter, optimal trajectory equation, variational method, associate the maximum principle.

Современные технические, биологические и экономические системы базируются на сложных алгоритмах управления, требующих непрерывного мониторинга и своевременной коррекции их состояния. При этом к обрабатываемой в ходе работы систем измерительной информации предъявляются серьезные требования по точности оценивания параметров, скорости сходимости алгоритмов и устойчивости их работы. Так, к примеру, отклонение в 0,01 микрон луча, сканирующего шероховатость поверхностей втулок, подшипников и других авиационных деталей может явиться причиной разбалансировки и выхода из строя целого узла летательного аппарата.

Следовательно, задача повышения точности обработки измерительной информации является весьма актуальной, а ее решение на практике опирается на передовые методы и алгоритмы. При этом адаптация сложных динамических систем все чаще требует применения не отдельного алгоритма идентификации, а их комплексного использования.

В работе предложен новый подход к идентификации параметров динамических систем, основанный на использовании двух эффективных методов решения обратных некорректных задач – объединенного принципа максимума в сочетании с вариационным методом регуляризации [1,2,3,4,5]. Численный эксперимент иллюстрирует сравнение свойств разработанного подхода с фильтром Калмана. Показано, что предложенный комбинированный метод дает существенный выигрыш в точности оценивания, скорости сходимости процедуры оценивания и устойчивости к шумам.

Постановка задачи

Идентификация параметров жесткости $c = 0.5$ и сопротивления $b = 10$ динамической системы, наблюдения которой моделируется уравнением

$$\ddot{y} + b\dot{y} + cy = 0,$$
$$t = 0, b = 10,\ y(0) = 0,\ \dot{y}(0) = 1. \qquad (1)$$

При уравнении наблюдения $y(t) = x(t)$ целевой функционал имеет вид

$$J_1 = \frac{1}{2}\int_0^{t_k} N^{-1}(x - y)^2\, dt \qquad (2)$$

Требуется оценить параметр $z = c$ из условия минимума (2).

Уравнение оптимальной траектории, реализующей наблюдаемое движение согласно методологии объединенного принципа максимума

$$\ddot{x} = \lambda^{-1}\left[-\frac{\dot{x}|\dot{x}|}{L|x - y| + \varepsilon} - N^{-1}(x - y)\right]. \qquad (3)$$

где $\lambda^{-1} = 2,\ L = 0.05,\ \varepsilon = 0.01, x_k = \dot{x}_k = 0$.

Общее время процедуры идентификации составляет $t_{k,общ} = 10$.

Время на первый этап не превышает $t_k = 2$. За этот промежуток (см.рис.1) происходит настройка фильтра и определение параметров с помощью объединенного принципа максимума с δ=4.489%. Погрешность фильтра Калмана составляет δ=10.272 %.

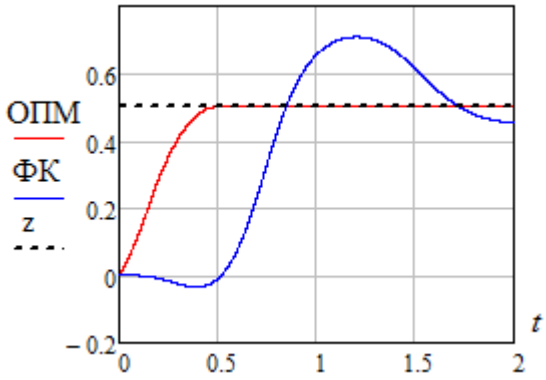


Рисунок 1 – Оценивание параметра z методом ОПМ и ФК

Затем для уточнения оценки параметра z применяется алгоритм на основе итерационной регуляризации (см.рис.2)

$$\dot{\hat{z}} = PG^T \frac{\partial H^T}{\partial \hat{x}} N^{-1}(y - H(\hat{x}(\hat{z}),t)),$$

$$\dot{P} = I - PG^T \frac{\partial}{\partial \hat{x}} \left\{ \frac{\partial H^T}{\partial \hat{x}} N^{-1}(y - H(\hat{x}(\hat{z}),t)) \right\} GP,$$

$$\ddot{G} = \frac{\partial f}{\partial \hat{x}} \dot{G} + \frac{\partial f}{\partial \hat{x}} G + \frac{\partial f}{\partial \hat{z}}, \quad G(0) = \dot{G}(0) = 0,$$

$$\ddot{\hat{x}} = f(\hat{x},\dot{\hat{x}},\hat{z}) - \mu^{-1} \frac{\partial H^T}{\partial \hat{x}} N^{-1}(y - H(\hat{x}(\hat{z}),t)),$$

$$\hat{P}(0) = P(0), \hat{x}(0) = x(0), \ \dot{\hat{x}}(0) = \dot{x}(0). \qquad (4)$$

Время действия процедуры идентификации составляет $t \epsilon 2..10$. Исходными данными для второго этапа идентификации разработанным подходом служат выходные данные полученные на первом этапе.

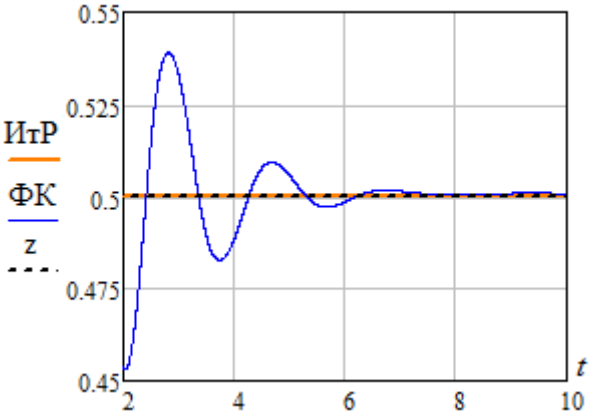


Рисунок 2 – Уточнение параметра z методом итерационной регуляризации и ФК

Оценивание с помощью алгоритма (4) проведено с погрешностью δ=0.019%. Для фильтра Калмана δ=0.12%.

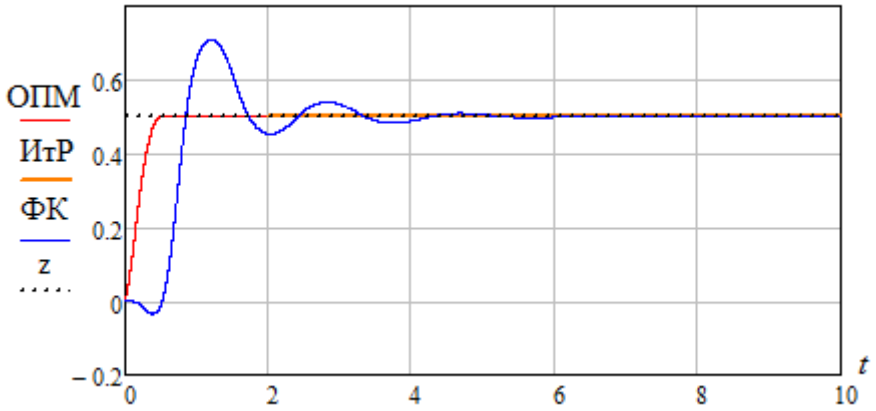


Рисунок 3 – Общая схема процедуры идентификации предложенным подходом и фильтром Калмана

Заключение

Предложенный подход к адаптации систем на основе объединенного принципа максимума и итерационной регуляризации выгодно отличается от типовых алгоритмов фильтрации Калмана [6] скоростью сходимости к оцениваемому параметру и точностью идентификации.

Благодарности.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №15-08-03798 А, 14-08-31422 мол_а

Библиографический список

1. Костоглотов А.А., Костоглотов А.И., Лазаренко С.В., Андрашитов Д.С. Многопараметрическая вариационная идентификация динамических систем на основе объединенного принципа максимума / А.А.Костоглотов, А.И. Костоглотов, С.В. Лазаренко, Д.С. Андрашитов. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 4. С. 68-76
2. Дерябкин И.В., Костоглотов А.А., Лазаренко С.В., Чеботарев А.В., Ценных Б.М. Метод идентификации параметров динамических систем на основе совмещенного с физическими принципами синтеза / И.В. Дерябкин, А.А. Костоглотов, С.В. Лазаренко, А.В. Чеботарев, Б.М. Ценных.//Нелинейный мир. 2012. Т. 10. № 11. С. 801-809
3. Костоглотов А.А., Костоглотов А.И., Лазаренко С.В. Многопараметрическая идентификация конструктивных параметров методом объединенного принципа максимума / А.А. Костоглотов, А.И. Костоглотов, С.В. Лазаренко. // Инженерный вестник Дона. 2011. Т. 15. № 1. С. 208-218.
4. Костоглотов А.А., Кузнецов А.А., Андрашитов Д.С., Дерябкин И.В., Лазаренко С.В. Синтез алгоритма автономного управления математическим маятником на основе объединенного принципа максимума /А.А. Костоглотов, А.А. Кузнецов, Д.С. Андрашитов, И.В. Дерябкин, С.В.Лазаренко. // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2010. № 3. С. 9-14.

5. Костоглотов А.А. Решение задачи А. Фуллера на основе объединенного принципа Понтрягина -Гамильтона -Остроградского. /А.А. Костоглотов. // Автоматика и вычислительная техника. 2007. № 4. С. 3.

6. Костоглотов А.А., Таран В.Н. Субоптимальная оценка параметров динамических систем / А.А. Костоглотов, В.Н. Таран. //Автоматика и телемеханика. 1997. № 4. С. 83.

УДК 62-50

Объединенный принцип максимума в задаче структурного синтеза систем с заданным состоянием на основе функций Крылова

А.А. Костоглотов, Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия, kostoglotov@me.com

С.В. Лазаренко, Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия, rh3311@mail.ru

М.А. Горбенко, Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия,gorbenkomaxal@gmail.com

В.А. Лосев, Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ г. Шахты, Россия, aibolit_773@mail.ru

Аннотация: В работе предложен новый подход к задаче структурного синтеза систем с заданным состоянием на основе функции Крылова, установлена связь между объединенным принципом максимума в форме двухточечной краевой задачи и принципом максимума Л.С. Понтрягина.

Ключевые слова: уравнение двухточечной краевой задачи, принцип стационарности Гамильтона – Остроградского, уравнение Аппеля, функция Крылова, объединенный принцип максимума.

Abstract. In this paper we propose a new approach to the problem of structural synthesis of systems with a given condition based on the function of Krylov, a link between the combined maximum principle in the form of a two-point edge-value problem and the principle of maximum L.S. Pontryagin.

Keywords: equation of the two-point boundary value problem, the principle of stationary Hamilton – Ostrogradskii, equation Appell, function Krylov, combined maximum principle.

Введение.

В [1] получены уравнения двухточечной краевой задачи, использование которых обеспечивает синтез терминальных управлений. Это достигается за счет использования принуждения по Гауссу при формировании расширенного целевого функционала. Исследование его первой вариации обеспечило установление необходимого условия минимума целевого функционала. Развертывание уравнений двухточечной краевой задачи целесообразно производить для конкретных случаев.

Уравнения двухточечной краевой задачи.

Анализ теоремы принципа максимума[2-6], вытекающий из знакопостоянства всюду на траектории скалярного произведения

$$(\psi, \Delta q) = (\psi, \dot{q})\Delta t \le 0, \qquad (1)$$

показывает, что между сопряженными функциями и фазовыми координатами существует пропорциональная связь во всех точках траектории [7].

Эту связь для объектов, уравнения движения которых вытекают из принципа стационарности Гамильтона – Остроградского для истинных траекторий движения, устанавливают следующим образом. Пусть объект описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка

$$\ddot{q}_s - u_s = 0, \mathrm{s} = \overline{1,\mathrm{n}};\ q_s(t_0) = q_{0s}, \dot{q}_s(t_0) = \dot{q}_{0s}\,. \qquad (2)$$

Мерой качества управляемого процесса определен интегральный функционал

$$J = \int_{t_0}^{t_k} F(q)dt. \qquad (3)$$

С помощью сопряженных функций ψ_s, $s = \overline{1,n}$ известным способом составим расширенный функционал и преобразуем его по следующему правилу:

$$J_{ext} = \int_{t_0}^{t_k}\left[\sum_{s=1}^{n}\psi_s(\ddot{q}_s - u_s) + \psi_0 F\right]dt = \int_{t_0}^{t_k}\left[\sum_{s=1}^{n}\left(\frac{\psi_s}{2\ddot{q}_s}\right)(2\ddot{q}_s - 2u_s)\ddot{q}_s + \psi_0 F\right]dt =$$

$$= \int_{t_0}^{t_k}\left[\left(\frac{\psi_s}{2\ddot{q}_s}\right)Z_s + \psi_0 F\right]dt \to \min\,. \qquad (4)$$

В соответствии с принципом наименьшего действия

$$\delta Z_s = 0\,. \qquad (5)$$

Из (4), (5) следует: для того, чтобы минимумы функционала меры качества (3) и расширенного функционала (4) были эквивалентны, и при этом выполнялось условие (5) необходимо, чтобы для сопряженных функций и обобщенных скоростей всюду на траектории выполнялось условие пропорциональности:

$$\frac{\psi_s}{2\ddot{q}_s} = 0;\ \psi_s = \lambda\ddot{q}_s, \lambda = const,\ s = \overline{1,n}\,. \qquad (6)$$

Доказанное утверждение показывает, что условия оптимальности могут быть получены из условия минимума расширенного функционала, объединяющего принуждение и исходный целевой функционал:

$$J_{ext} = J + \lambda Z\,. \qquad (7)$$

где λ - неопределенный множитель Лагранжа. Исследование первой вариации (4) приводит к условию минимума (3) в форме условия максимума функции обобщенной мощности [4]. Решение терминальной задачи определяется следующим уравнением [1]:

$$\frac{d^2}{\partial t^2}\frac{\partial^2 S}{\partial \ddot{q}} - \lambda^{-1}\frac{\partial F}{\partial q} = 0,$$

$$t = 0, \quad q = q^0, \quad \dot{q} = \dot{q}^0;$$

$$t = t_k, \quad q = q^*, \quad \dot{q} = \dot{q}^*. \qquad (8)$$

Синтез терминального управления.

Пусть целевой функционал имеет вид

$$J = \int_0^{t_k} q^2 dt; n = 1. \qquad (9)$$

Уравнение Аппеля представлено выражением:

$$\ddot{q} = u,$$

$$t = 0, \quad q = 3, \quad \dot{q} = 0;$$

$$t_k = 6, \quad q = 10, \quad \dot{q} = 11. \qquad (7)$$

Тогда (5) записывается в следующей форме:

$$q^{IV} + \lambda^{-1} q = 0. \qquad (8)$$

Решение этого уравнения может быть получено с помощью функций А.Н. Крылова

$$q = A_1 K_1(\beta t) + A_2 K_2(\beta t) + A_3 K_3(\beta t) + A_4 K_4(\beta t), \qquad (9)$$

где $\beta = \sqrt[4]{\frac{\lambda^{-1}}{4}}$, а управление находится по уравнению:

$$u_s = -4\beta_s^2 A_1 K_3(\beta_s t) - 4\beta_s A_2 K_4(\beta_s t)\beta_s^2 A_3 K_1(\beta_s t) + \beta_s^2 A_4 K_2(\beta_s t); \qquad (10)$$

дифференциальные уравнения

$$a_{ss}\ddot{q}_s = u_s;$$

$$\ddot{u}_s = -4\beta_s^4 q_s; \qquad (11)$$

константы A_1, A_2, A_3, A_4 находятся как в [5].

Результаты математического моделирования приведены на рисунках 1 - 3.

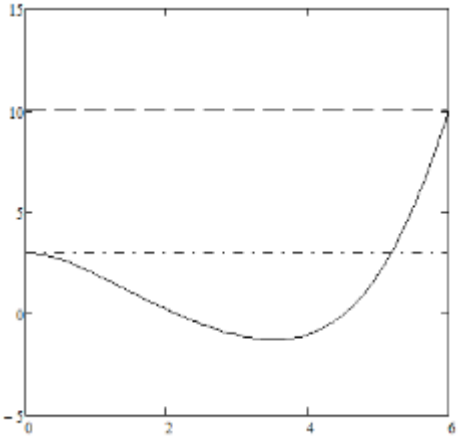


Рисунок 1 – Координата

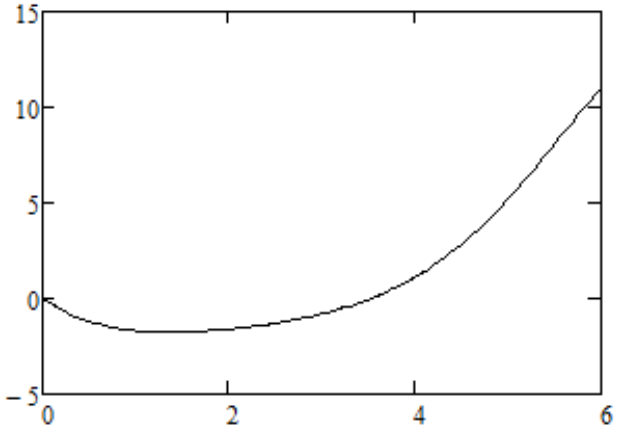


Рисунок 2 – Скорость

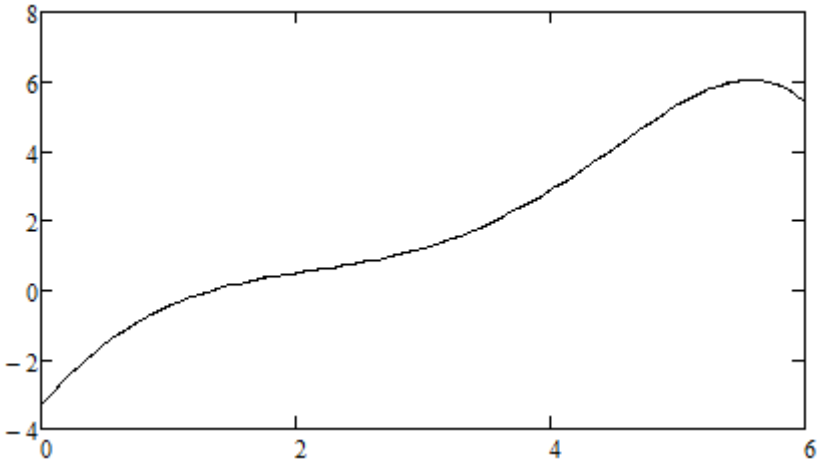


Рисунок 3 - Управление

Заключение.

Установлена связь между объединенным принципом максимума в форме двухточечной краевой задачи (8) [1] и принципом максимума Л.С. Понтрягина. Решена задача терминального управления с использованием функций Крылова.

Благодарности и признательности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 15-38-20835 мол_а_вед, 15-38-51258 мол_нр.

Библиографический список

1. Лазаренко С.В. Метод синтеза оптимального управления с использованием принципа Гаусса // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. Т. 11. № 12. С. 37 - 43.
2. Костоглотов А.А., Костоглотов А.И., Лазаренко С.В., Андрашитов Д.С. Многопараметрическая вариационная идентификация динамических систем на основе объединенного принципа максимума / А.А.Костоглотов, А.И. Костоглотов, С.В. Лазаренко, Д.С. Андрашитов. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 4. С. 68-76
3. Дерябкин И.В., Костоглотов А.А., Лазаренко С.В., Чеботарев А.В., Ценных Б.М. Метод идентификации параметров динамических систем на основе

совмещенного с физическими принципами синтеза / И.В. Дерябкин, А.А. Костоглотов, С.В. Лазаренко, А.В. Чеботарев, Б.М. Ценных.//Нелинейный мир. 2012. Т. 10. № 11. С. 801-809

4. Костоглотов А.А., Костоглотов А.И., Лазаренко С.В. Многопараметрическая идентификация конструктивных параметров методом объединенного принципа максимума / А.А. Костоглотов, А.И. Костоглотов, С.В. Лазаренко. // Инженерный вестник Дона. 2011. Т. 15. № 1. С. 208-218.

5. Костоглотов А.А., Кузнецов А.А., Андрашитов Д.С., Дерябкин И.В., Лазаренко С.В. Синтез алгоритма автономного управления математическим маятником
на основе объединенного принципа максимума /А.А. Костоглотов, А.А. Кузнецов, Д.С. Андрашитов, И.В. Дерябкин, С.В.Лазаренко. //Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2010. № 3. С. 9-14.

6. Костоглотов А.А. Решение задачи А. Фуллера на основе объединенного принципа Понтрягина -Гамильтона -Остроградского. /А.А. Костоглотов. // Автоматика и вычислительная техника. 2007. № 4. С. 3.

7. Костоглотов А.А., Таран В.Н. Субоптимальная оценка параметров динамических систем / А.А.Костоглотов, В.Н. Таран. //Автоматика и телемеханика. 1997. № 4. С. 83.

УДК 519.711.3 +502/504

Математическая обработка данных по загрязнению атмосферы

Рябых Г.Ю., Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия
Николенко Г.В., Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия
Курень С.Г., Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия
Литвин А.В., Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

Abstract. Atmospheric pollution with harmful substances bear the greatest risk to humans, so many industrialized countries are paying close attention to the protection of the atmospheric air. In the given study the mathematical model of environmental pollution was constructed and studied.

Keywords: air pollution from motor vehicles, mathematical models in ecology, logistic model, least square method, approximation error.

Проведён анализ материала [1-3]по выбросам в атмосферу загрязняющих веществ в городе Ростове-на-Дону и Ростовской области за последние годы, построена и проверена на адекватность математическая модель загрязнения атмосферы, и осуществлено прогнозирование экологической ситуации на её основе [4-6]. Для выбросов от автотранспорта разработана логистическая модель, а для выбросов от стационарных источников разработана модель комменсального типа.

Математическое моделирование объемов выбросов от автотранспорта с помощью уравнения Ферхюльста

Процесс загрязнения воздуха выбросами от автотранспорта рассмотрен без учёта очистки. В самом простом случае количество выбросов ежегодно увеличивается пропорционально количеству источников (автомобилей). Это увеличение есть линейная функция.

Для более сложных реальных условий, простейшей функцией, является зависимость, предложенная Ферхюльстом:

$$\dot{N} = RN\left(1 - \frac{N}{K}\right).$$

Это уравнение также называется логистическим. Величина *R* является коэффициентом роста. Член*(1–N/K)* удерживает рост объемов выбросов в определенных границах, так как когда *N* возрастает *(1-N/K)* уменьшается. Величины *N* лежат в интервале от *0* до *K*. *N=0* означает полную очистку, а *N=K* наибольшее предельно достижимое количество выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от автотранспорта.

На основе логистического уравнения была построена математическая модель роста загрязнений. Расчет проведён в математическом пакете Mathcad. Для аппроксимации исходных данных использовали функцию, описывающую логистическую модель:

$$N(x) := \frac{k}{1 + \left(\frac{k}{N0} - 1\right) \cdot e^{-r \cdot x}} + p$$

где *N0*— начальное количество естественного загрязнения атмосферы,*N(x)* – объем загрязнения в момент времени *x*,*p*— положительный параметр (возникающий в результате сдвига по времени), *r*— удельная скорость роста объема загрязнений (увеличение объемов выбросов), *k*— поддерживающая ёмкость среды (то есть, максимально возможный объем (концентрация) выбросов).

Для аппроксимации методом наименьших квадратов найдены частные производные и приравнены к нулю. Получена система линейных алгебраических уравнений, которую решили встроенной функцией Find:

Функция Find возвращает решение системы уравнений в виде вектора. Число аргументов должно быть равно числу неизвестных, которые получаем равными *k=387,54* (тыс. тонн), *r=0,58*(тыс. тонн/год), N0=8,13(тыс. тонн), *p=186,35*(лет).

После подстановки полученных коэффициентов в исходное уравнение получаем, что предел роста загрязнений равен:

$$\lim_{t \to \infty} N(t) \to 573{,}8 \text{ (тыс. тонн)}$$

Для того чтобы численно проанализировать полученные результаты, посчитываем невязку системы

$$\sum_{i=0}^{9} \left(N(t_i) - N1_i\right)^2 = 643.903$$

$$\begin{pmatrix} k \\ r \\ N0 \\ p \end{pmatrix} := \text{Find}\left(\begin{pmatrix} k \\ r \\ N0 \\ p \end{pmatrix}\right) = \begin{pmatrix} 387.537 \\ 0.583 \\ 8.13 \\ 186.347 \end{pmatrix}$$

а также относительную погрешность

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{9} \left(N(t_i) - N1_i\right)^2}{\sum_{i=0}^{9} \left(N(t_i)\right)^2}} = 0.022$$

Такой результат говорит о том, что модель с высокой точностью описывает рост загрязнения атмосферы.

Математическое моделирование процесса загрязнения воздуха на основе модели комменсального типа.

Опишем модель взаимодействия загрязнения с окружающей средой на основе модели комменсального типа (то есть модели с двумя параметрами, каждый из которых положительно влияет на рост другого) [4-6].

Пусть X(t) – объем (концентрация) загрязнений в момент времени t; Y(t) – объем уловленных загрязнений в момент времени t.

$$\begin{cases} \dot{X} = aX - bXY, \\ \dot{Y} = -dY + cXY; \end{cases} \qquad (3)$$

где *a, b, c, d* — положительные постоянные, характеризующие скорость изменения выброшенных и уловленных загрязнений и взаимодействия между ними.

Определяем коэффициенты*a, b, c, d*методом наименьших квадратов.

Коэффициенты *a,b,c,d*получаем равными:

$$\begin{cases} a := 0.4; \\ b := 0.002; \\ c := -0.4; \\ d := -0.001. \end{cases}$$

Далее проверяем адекватность модели.

Считаем относительную погрешность по формуле $\frac{\sqrt{\sum (x_i - x_i^*)^2 + (y_i - y_i^*)^2}}{\sqrt{\sum x_i^{\,2} + y_i^{\,2}}}$, которая равна $\delta = 9\%$. Это говорит о том, что построенная модель вполне адекватна.

Выводы

1. Проведена математическая обработка статистических данных по загрязнению воздуха в городе Ростове-на-Дону и Ростовской области валовых выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта и от стационарных источников.
2. Для выбросов загрязняющих веществ от автотранспорта построена математическая модель загрязнения атмосферы логистического типа.
3. Для выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников построена математическая модель загрязнения атмосферы комменсального типа.
4. Обе модели адекватны.

Данные модели можно рекомендовать для прогнозирования загрязнения воздуха в городе и области.

Библиографический список

1. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2008 году» / Под общ. ред. С.Г. Курдюмова, Г.И. Скрипки, М.В. Паращенко. Ростов-на-Дону, 2009г., 356 с.

2. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2009 году» / Под общ. ред. С.Г. Курдюмова, Г.И. Скрипки, М.В. Паращенко. Ростов-на-Дону, 2010г., 372 с.

3. Экологический вестник Дона «О состоянии окружающей среды и природных ресурсов Ростовской области в 2010 году» / Под общ. ред. С.Ф. Трифонова, Г.И. Скрипки, М.В. Паращенко. Ростов-на-Дону, 2011г., 349 с.

4. Ризниченко Г.Ю. Математические модели биологических продукционных процессов / Г.Ю. Ризниченко, А.Б. Рубин // Учебное пособие. – М.: Изд-во МГУ, 1993. – 302 с.

5. Романов М.Ф. Математические модели в экологии / М.Ф. Романов, М.П. Федоров.– Спб.: «Иван Федоров», 2003. - 240 с.

6. Братусь А.С. Динамические системы и модели в биологии / А.С. Братусь, А.С. Новожилов, А.П. Платонов. – М.: Физматлит, 2010. – 400 с.

УДК 681.51

Синергетический синтез алгоритмов комплексной оптимизации тяги подвижного состава

Попов А.Н., Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия, anpopov@sfedu.ru
Радионов И.А., Южный федеральный университет, г. Таганрог, Россия, radionovivan@sfedu.ru

Аннотация. В статье рассматривается актуальная проблема синтеза системы управления асинхронным тяговым электроприводом локомотива с учетом нестационарных процессов в контакте«колесо – рельс». В исследуемой системе имеет место процесс проскальзывания колес относительно рельсового полотна, при этом чрезмерное значение скольжения негативно сказывается на тяговых свойствах локомотива, а также увеличивает износ колесной пары и поверхности рельса. Изложен новый подход к синтезу регуляторов тяги локомотивов, основанный на методах и принципах синергетической теории управления. Предлагаемый регулятор для системы автоведения локомотива позволяет осуществить комплексную оптимизацию тяги подвижного состава, а именно: выдерживает заданную скорость скольжения колесной пары относительно полотна рельса, тем самым реализуя режим максимальной тяги; обеспечивает минимизацию потерь энергии в силовой части электропривода при изменении скоростных и силовых характеристик движения, тем самым реализуя режим максимальной энергоэффективности.

Ключевые слова: системы управления тяговым электроприводом, оптимизация тяги, синтез энергосберегающих регуляторов, адаптивное управление.

Abstract. In the paper we explore the problem of design of the control system of train asynchronous electric traction drives with regard to transitional processes in the wheel-rail contact. In this system, the wheels can slip relative to the rail, and the excessive slippage has a negative effect on the train traction properties and increases the wear of the wheel pair and rail surface. A new approach to the synthesis of train traction regulators is proposed that is based on the theory of synergetic control. The proposed train auto pilot regulator ensures complex optimization of train traction, namely: keeping of desired speed of the wage wheels slippage relative to the rail thus ensuring the maximum traction; minimizes the loss of energy in the power unit of the electric traction drive under changing of speed and power of motion process. The last feature provides, in turn, the maximum rate of energy efficiency during operation.

Keywords: control systems for traction drive, traction optimization, synthesis of energy saving regulators, adaptive control.

Введение

Несмотря на достаточно долгую историю железнодорожного транспорта, проблема формирования тяги остается для него ключевой. Связано это с особенностями свойств сцепления колесной пары (КП) с рельсовым полотном. В случае превышения момента тяги предельного значения момента сцепления, развивается процесс боксования – чрезмерного проскальзывания колес относительно рельса, что негативно сказывается на тяговых свойствах локомотива. В связи с этим, разработка автоматических регуляторов для систем тягового электропривода (ТЭП), позволяющих наиболее полно реализовать потенциальные свойства сцепления является одной из наиболее актуальных задач при проектировании современных и перспективных локомотивов.

В настоящей статье представлено решение задачи синтеза автоматического регулятора ТЭП локомотива, обеспечивающего комплексную оптимизацию тяги в условиях резко меняющихся характеристик сцепления. Для решения указанной задачи используется синергетический подход в теории управления, основанный на принципах направленной самоорганизации и управляемой декомпозиции нелинейных динамических систем [1, 2].

Математическое представление динамики асинхронного тягового электропривода локомотива

Как правило механическая часть ТЭПП класса (опорно-осевого тягового двигателя с опорно-осевым редуктором) рассматривается как крутильная система, состоящая из КП и вращающихся масс привода, моменты инерции которых приведены к оси КП [3].

Математическая модель, описывающая динамику ТЭП с асинхронным электродвигателем представляет собой систему дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned}
&\frac{d\varphi_r}{dt}=\omega_r;\ \frac{d\varphi_w}{dt}=\omega_w;\ \frac{dX_w}{dt}=V_w;\\
&J_w\frac{d\omega_w}{dt}=-\frac{\hat{M}_{ah}}{K}-b_m\left(\omega_w K-\omega_r\right)-c_m\left(\varphi_w K-\varphi_r\right);\\
&m_w\frac{dV_w}{dt}=\frac{\hat{M}_{ah}}{R_w K}-b_x V_w-c_x X_w;\\
&\frac{d\psi_r}{dt}=\frac{r_r L_m}{L_r}i_{sx}-\frac{r_r}{L_r}\psi_r;\\
&J_r\frac{d\omega_r}{dt}=\frac{pmL_m}{2L_r}\psi_r i_{sy}-b_m\left(\omega_r-\omega_w K\right)-c_m\left(\varphi_r-\varphi_w K\right);\\
&\frac{di_{sx}}{dt}=-L^* i_{sx}+\omega_r p i_{sy}+\frac{r_r L_m}{L_r}\frac{i_{sy}^2}{\psi_r}+\frac{L_m r_r}{L_r L}\psi_r+\frac{L_r}{L}u_{sx};\\
&\frac{di_{sy}}{dt}=-L^* i_{sy}-\omega_r p i_{sx}-\frac{r_r L_m}{L_r}\frac{i_{sx}i_{sy}}{\psi_r}-\frac{L_m}{L}\omega_r p\psi_r+\frac{L_r}{L}u_{sy},
\end{aligned}\qquad (1)$$

где J_r, J_w – моменты инерции ротора ТЭП и КП соответственно; m_w – масса локомотива, приведенная к одной КП; φ_r, φ_w – углы поворота ротора и КП относительно оси вращения соответственно; ω_r, ω_w – угловые скорости ротора и КП соответственно; X_w, V_w – перемещение КП и скорость перемещения вдоль направления движения локомотива; c_x – жесткость продольной связи КП с тележкой; c_m – жесткость связи КП с тяговым двигателем; b_x – коэффициент демпфирования продольной связи КП с тележкой; b_m – коэффициент демпфирования связи КП с тяговым двигателем; M_{ah} – момент сцепления колеса с рельсом; R_w – радиус колеса; u_{sx}, u_{sy} и i_{sx}, i_{sy} –проекции

напряжения и тока статора на оси вращающейся системы координат; ψ_r –модуль результирующего вектора потокосцепления ротора; L_s, L_r, L_m –собственные и взаимная индуктивности обмоток; r_s, r_r – их активные сопротивления; p –число пар полюсов; m –число фаз обмотки статора K –коэффициент редуктора; $L = L_s L_r - L_m^2$; $L^* = \left(r_r L_m^2 + r_s L_r^2\right)/\left(L_r L\right)$ [3, 4].

Особенности процедуры синергетического синтеза алгоритмов комплексной оптимизации тяги

Рассмотрим задачу синергетического синтеза регулятора ТЭП, обеспечивающего реализацию режима максимальной тяги при минимальных потерях в электрическом двигателе. Эта задача заключается в нахождении управлений u_{sx} и u_{sy} как функций координат состояния системы (1), гарантирующих выполнение соответствующих инвариантов [2, 4, 5]:

1. технологического – $\omega_w R_w\left(1-\frac{\varepsilon}{100}\right)-V=0$ (поддержание требуемого значения скорости скольжения колеса), где ε – относительное значение скорости скольжения, а V – скорость движения состава;
2. энергетического – $\psi_r = \left(M_{ah}/K\right)^{0,5}\left(k_1/\left(k_2+k_3\omega_r^{\beta}\right)\right)^{0,25}$ (поддержание оптимального с точки зрения минимума потерь энергии модуля вектора потокосцепления ротора) [6].

Процедура синергетического синтеза в данном случае включает в себя три этапа декомпозиции исходной задачи управления с введением параллельно-последовательной совокупности инвариантных многообразий. Побробное описание процедуры можно найти в работах [7,8]

Момент сцепления в контакте «КП – путь» априоре неизвестен и его величина должна постоянно оцениваться. Для этой цели используется асимптотический наблюдатель

$$\begin{aligned}\hat{M}_{ah} &= -l_1 m_w R_w V_w K - z;\\ \frac{dz}{dt} &= l_1 z + l_1^2 m_w R_w V_w K + l_1 R_w K\left(b_x V_w + c_x X_w\right),\end{aligned} \qquad (2)$$

постороенный в соответствии с методикой, описанной в монографии [5].

Компьютерное моделирование замкнутой системы

На рис. 1 – 8 представлены результаты моделирования замкнутой системы в условияхрезкого измененияхтекущих условий сцепления.

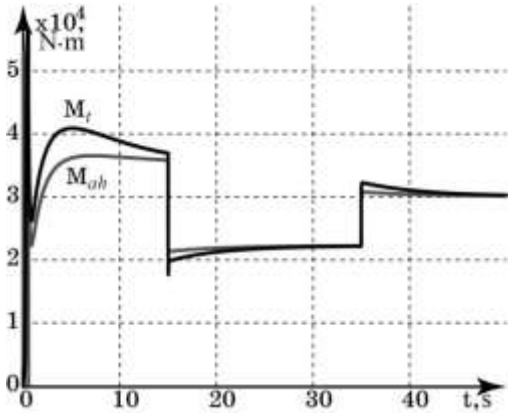


Рис. 1. Изменение момента тяги и момента сцепления

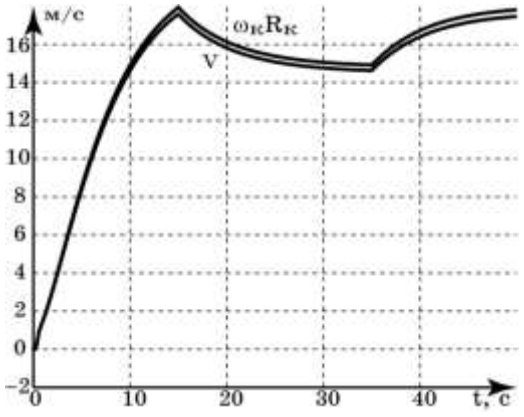


Рис. 2. Изменение скорости поступательного движения состава и приведенной скорости КП

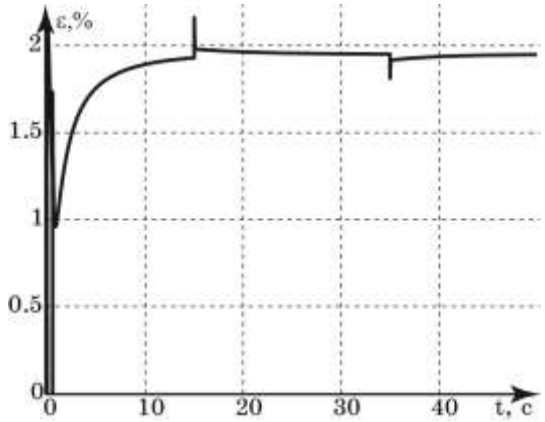


Рис. 3. Изменение относительной скорости скольжения КП

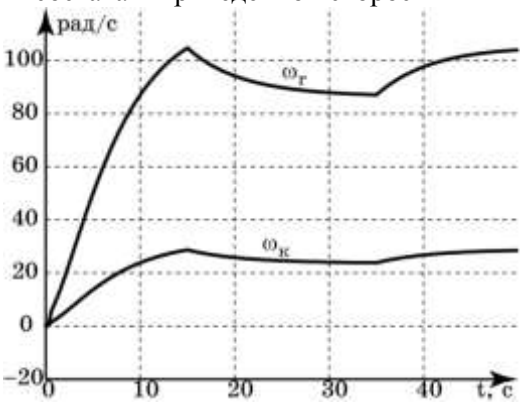


Рис. 4. Изменение угловой скорости ротора и КП

Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что резкое падение момента сцепления (более чем на 35%) не приводит к развитию процесса боксования КП. Относительная скорость скольжения поддерживается на заданном уровне, при этом скорость подвижного состава снижается до значения, соответствующего текущим условиям сцепления, тем самым обеспечивая условия формирования максимальной тяги.

Помимо этого, синтезированный регулятор формирует оптимальное значение модуля вектора потокосцепления ротора в зависимости от оказываемой на систему механической нагрузки, обеспечивая максимальный для данного режима работы привода КПД асинхронного двигателя [6].

Заключение

Таким образом, применение принципов и методов синергетической теории управленияпозволяет существенно продвинуться в решении проблемы комплексной оптимизации тяги подвижного состава, а полученные алгоритмы могут использоваться при проектировании современных и перспективных систем автоведения.

Благодарности и признательности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант №13-08-00995-а)

Библиографический список

1. Колесников А.А. Синергетическая теория управления / А.А. Колесников – М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.

2. Колесников А.А., Веселов Г.Е., Попов А.Н. и др. Синергетические методы управления сложными системами: Механические и электромеханические системы / Под общ. ред. А.А. Колесникова М.: КомКнига, 2006. 300 с.

3. Коропец П.А. Флаттер в тяговом приводе локомотива в режиме буксования // Исследовано в России.2009. № 12. С. 716-772.

4. PopovA.N., Radionov I.A., Mushenko A.S. Synergetic synthesis of power saving control for locomotive asynchronous drive systems // Proceedings of 6th International Congress on Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT-2014), 6-8 October 2014, St. Petersburg, Russia. - Pp. 546-550.

5. Современная прикладная теория управления. Ч.III. Новые классы регуляторов технических систем // Под ред. А.А. Колесникова – Таганрог, Изд-во ТРТУ, 2000. 656 с.

6. Попов А.Н. Синергетический синтез систем энергосберегающего управления электромеханическими процессами // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2011. Т. 119. № 6. С. 74–84.

7. Popov A., Radionov I., Mushenko A. Synergetic Design of Autopiloting Systems with Complex Optimization of Train Traction / Proceedings of 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (MICNON 2015), June 24-26, 2015, Saint Petersburg, Russia. – P. 467-472.

8. Попов А.Н., Радионов И.А. Синергетический синтез систем автоведения с комплексной оптимизацией тяги подвижного состава / Сборник трудов 7-й Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика» (ССПС-2015). – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 59-71.

УДК 519.6

Эволюционный алгоритм решения задачи поиска глобального оптимума с естественным критерием останова

Баранов И.В., Донской Государственный Технический Университет, Ростов-на-Дону, Россия
Воронин И.В., Донской Государственный Технический Университет, Ростов-на-Дону, Россия
Соловьев А.Н., Донской Государственный Технический Университет, Ростов-на-Дону, Россия, solovievarc@gmail.com

Аннотация. В задачах минимизации со сложным рельефом целевой поверхности с успехом применяются вероятностные эволюционные подходы, такие, как генетические алгоритмы. В работе предложен один из вариантов генетического алгоритма “мультистарт”, для задачи поиска глобального оптимума, с естественным критерием останова вычислений. Приведены результаты тестовых численных экспериментов.

Ключевые слова: метод оптимизации, глобальный поиск, генетический алгоритм.

Abstract. In minimization problems with complex target surface have been successfully applied evolutionary probabilistic approaches such as genetic algorithms. In this paper we propose a variant of the genetic algorithm "multistart" for the task of searching the global optimum, with natural stop criteria. There are computer experiments results.

Keywords: method optimization, global search, genetic algorithm.

Введение.

Многие прикладные исследования могут быть сведены к задаче поиска набора аргументов $(x_1, x_2, \ldots, x_n)$ доставляющих глобальный минимум функционала

$$\Phi(x_1, x_2, \ldots, x_n) \to global_\min \quad (1)$$

в некотором заданном брусе

$$P = \left\{ (x_1, x_2, \ldots, x_n) \in R^n \mid x_i \in [a_i, b_i], \quad i = \overline{1, n} \right\}. \quad (2)$$

Функционал Φ может вычисляться численно, иметь очень сложный рельеф, и, вообще говоря, может не быть дифференцируемым и даже непрерывным. В этом случае обычные градиентные методы поиска не дают результата. В последнее время набирают популярность так называемые эволюционные методы решения оптимизационных задач, в том числе и непрерывных [1]. Несмотря на свою недостаточную теоретическую обоснованность, они позволяют за приемлемое с точки зрения вычислений время найти если не оптимальное (в точном смысле), то достаточно “хорошее” в смысле оптимальности решение. Один из классов таких методов - генетические алгоритмы, идея которых восходит к Дж. Холланду [2]. Они не требуют от Φ ни дифференцируемости, ни непрерывности, и способны работать на сложном рельефе. По вычислительным затратам они занимают промежуточное положение между чисто стохастическими и

градиентными методами поиска. В связи с тем, что вычисление каждого значения Φ может занимать значительное время, представляется актуальной задача разработки и исследования свойств эволюционных алгоритмов, решающих задачу (1)-(2). Данная работа посвящена разработке и изучению свойств одного из таких алгоритмов. Достоинством предлагаемого алгоритма является наличие естественного критерия останова вычислений.

Описание алгоритма.

В работе описана и исследована идея алгоритма “мультистарт”, сочетающегося со “сжатием” бруса поиска, работа которого может быть описана следующим образом:

Обозначим через $R(P)=\max\limits_i |b_i - a_i|, (i=\overline{1,n})$ наибольшую длину ребра бруса поиска P.Зададим число $\varepsilon > 0$, абсолютную (или относительную) точность, с которой хотим знать решение. Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. В брусе поиска P многократно (M раз) запускаем алгоритм локального поиска (АЛП), который будет описан ниже, и формируем множество $X=\{\tilde{x}^{(k)}, \quad k=\overline{1,M}\}$, каждый элемент $\tilde{x}^{(k)}$ которого есть результат работы k – того АЛП.
2. По множеству X строим подбрус P_1:

   По каждой переменной с номером i находим числа

   $a_i=\min\limits_k \tilde{x}_i^{(k)}, b_i=\max\limits_k \tilde{x}_i^{(k)}, \quad d_i=(b_i-a)/2, c_i=(b_i+a)/2$,и принимаем

$P_1=\{x_i \in R^n \mid c_i - 1.1d_i \le x_i \le c_i + 1.1d_i, \quad i=\overline{1,n}\}$.

Если по некоторой переменной значение оказывается за пределамиP, то присваиваем этой переменной граничное значение из P.Заметим, что $P_1 \subseteq P$).

3. Принимаем в качестве P построенный P_1 .(т.е. $P := P_1$). Как правило, P_1 строго вложен в P , и, таким образом, брус поиска сжимается.

4. Проверяем условие:

Если $R(P) < \varepsilon$, то завершаем работу алгоритма, иначе переходим к пункту 1.

Замечание. Алгоритм не гарантирует, что точное оптимальное решение будет найдено с вероятностью 1 и с погрешностью ε . Однако, можно ожидать, что с вероятностью w найденное решение будет отличаться от точного (глобального) не более, чем на ε .

Достоинством предложенной вычислительной схемы является наличие естественного критерия останова вычислений, а именно, условия $R(P) < \varepsilon$.

Алгоритм локального поиска (АЛП) состоит из следующих шагов:

1. Инициализация: полагаем регион поиска *B* совпадающим со всем брусом P. В регионе *B*генерируем случайную точку $\tilde{y}^{(0)}$, вычисляем в ней значение Ф и принимаем в качестве лучшего.
2. В регионе *B* запускаем генетический алгоритм (ГА) который останавливается по прошествии 10 эпох.
3. Сравниваем решение $\tilde{y}^{(1)}$, найденное генетическим алгоритмом с $\tilde{y}^{(0)}$. Если решение $\tilde{y}^{(1)}$ не лучше чем старое решение $\tilde{y}^{(0)}$, то уменьшаем линейные размеры региона *B* в 8 раз. Иначе изменяем линейные размеры каждого ребра l_i (*i*номер переменной) региона *B* по правилу $l_i := \max(8^* | \tilde{y}_i^{(0)} - \tilde{y}_i^{(1)} |, l_i / 8)$. Присваиваем $\tilde{y}^{(0)} := \tilde{y}^{(1)}$ и строим новый регион *B* с центром в точке $\tilde{y}^{(0)}$ и вычисленными размерами l_i.
4. Проверяем критерий остановки АЛП: если $\max_i l_i < 0{,}2\varepsilon$ то останов, иначе переходим к пункту 1.

В вычислительных экспериментах использован упрощённый вариант ГА, в котором использованы модифицированный оператор скрещивания и оператор многоточечной мутации. В результате скрещивания формируется один потомок, каждый бит которого случайно наследуется от одного из родителей. При этом один из родителей выбирается из «лучшей» части популяции, а второй выбирается случайно из всей популяции. Оператор мутации состоит в том, что с некоторой фиксированной вероятностью p, каждый бит хромосомы может изменить своё значение на противоположное. Отметим, что для кодирования хромосом использован двоичный код Грея.

Обсуждение результатов вычислительного эксперимента.

Свойства описанного выше алгоритма были изучены на примере известных тестовых функций: мультимодальных функций Растригина, Швефеля, Гривонка и одноэкстремальной овражистой функции Розенброка [3]. Эксперименты проводились для числа переменных $n = 5$. Абсолютная погрешность, с которой разыскивалось решение во всех случаях (кроме функции Розенброка) была принята равной $\varepsilon = 10^{-5}$.

Для функции Растригина эксперименты проводились в области поиска $[-5.12, 5.12]^n$, для функции Швефеля $[-500, 500]^n$, для функции Гривонка $[-600, 600]^n$. Результаты экспериментов для первых трёх функций приведены в таблице 1, в которой *M*–число запусков АЛП, w – относительная частота обнаружения решения (с заданной точностью ε), *F_Calc_cp*–среднее количество обращений к целевой функции Φ.Данные, приведённые в таблице 1, были получены осреднением по достаточно большому числу экспериментов.

Таблица 1.

	Функция					
	Растригина		Швефеля		Гривонка	
M	w	F_Calc_cp	w	F_Calc_cp	w	F_Calc_cp
2	0,313	11277	0,436	13088	0,02	19845
3	0,691	20379	0,767	23410	0,11	47434
4	0,894	30347	0,913	34295	0,39	97452
5	0,968	41483	0,967	45612	0,58	175210
6	0,985	53540	0,987	57645	0,79	315333
7	0,994	66565	0,997	69488	0,87	528757
8	0,996	80254	1	81817	0,95	889209
9	0,999	94708	0,998	94199	0,95	1406607
10	1	110456	0,999	107526	0,99	2223897
11	1	126456	0,998	121068	0,99	3402129
12	1	143041	0,999	134396	0,99	5065560
13	1	161468	1	146391	1	7851161
14	1	180917	0,998	161350	0,99	12486068
15	1	201234	0,998	175067		

На первых трёх функциях, рельеф которых имеет очень большое число локальных экстремумов при отсутствии оврагов, алгоритм показал приемлемые с точки зрения объема вычислений результаты.

Проведенный численный эксперимент показал, что для овражистой функции Розенброка алгоритм работает существенно хуже. Так, чтобы обнаружить решение с вероятностью 0,9 и погрешностью $\varepsilon = 10^{-4}$ требовалось порядка 3 500 000 вычислений целевой функции. По всей видимости, это связано с тем, что в данном алгоритме регион поиска весьма быстро сжимается в процессе АЛП, что приводит к довольно медленному дрейфу по “дну” оврага в сторону экстремума.

Библиографический список

1. Hu XM, Zhang J, Li Y. Orthogonal methods based ant colony search for solving continuous optimization problems. Journal of computer science and technology 23(1): 2-18 Jan. 2008.

2. Holland J H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Second Edition (First Edition, 1975), Cambridge: the MITPress, MA, 1992.

3. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы: Учебно-методическое пособие / под ред. Ю.Ю. Тарасевича. - Астрахань: АГУ, 2007. - 87 с.

УДК 519.87: 681.51

Анализ и обобщение типичных статических и динамических нелинейностей технологических процессов химической и пищевой промышленности

Мохсен М.Н., Донской Государственный Технический Университет, Ростов-на-Дону, Россия, Ирак,
mohammed.naima@gmail.com

Аннотация: В статье решена анализируются свойства задача построения формального алгоритма получения обобщенных математических моделей технологических объектов управления произвольной конструкции и назначения характерных для производств, осуществляющих превращения сырьевых компонентов и формирование конечных продуктов в жидких и газообразных средах. Подход Анализ осуществляется в предположении, модели получены основывается на использовании основании описания универсальных законов природы - законов сохранения вещества и энергии, т.е. используется математическая модель закона сохранения, представленная уравнением баланса. В предположении наличия в любом объекте конструктивно выделенных накопительных объемов со свойствами, приближающимися к идеальному смешению, строится иерархическая модель аппарата, представляющая собой систему балансовых дифференциальных уравнений в полных производных рассматриваются математические структуры, описывающие процессы накопления, а также обмена накопителя с внешней средой веществом и энергией. Показывается, что эти структуры нелинейны. Поскольку обобщенная модель превращается в рабочую при подстановке в нее частных математических моделей, выражающих предметно обусловленные свойства протекающих в объекте физических процессов, анализируются наиболее распространенные для рассматриваемого типа производств частные модели. Показывается, что все из них в большей или меньшей степени нелинейны. Делается вывод о необходимости решения задачи синтеза законов локального управления такими производствами на основе предварительных исследований характера этих нелинейностей.

Ключевые слова: математическая модель, законы сохранения, уравнение баланса, вещество, энергия, признак, накопитель, поток обмена, дифференциальное уравнение, этапы построения, частные модели, рабочая модель.

Abstract: The paper analyzing the properties of solved the problem of constructing a formal algorithm for obtaining the generalized mathematical models of engineering systems of any design and purpose specific to industries. carried out conversion of raw materials and formation of the final products in liquid and gases materials. Analysis approach is performed under the assumption model obtained based on the use based on the description of the universal laws of nature - the law of conservation of substances and energy, i.e. using mathematical model of the law of conservation, provided the balance equation. Assuming the presence of any object allocated constructively accumulated volume with properties approaching the ideal mixing, built hierarchical model of the device, which is a system of differential equations in the balance in total derivatives considered mathematical structure describing the processes of accumulation, and exchange drive externally among the substances and energy. It is shown that these structures are non-linear. Because the generalized model is turning the Stage by substituting in its particular mathematical model expressing the subject due to take place in the object properties of the physical processes, The conclusion about the necessity of solving the problem of synthesis of local control production on the basis preliminary research character these non-linearities. Analyzes the most common for this type of production the private model. It turns out that all of them more or less linear. The conclusion about the necessity of solving the problem of synthesis of local control production on the basis preliminary research character these non-linearities.

Keyword: mathematical model, conservation laws, balance equation, substance, energy, indication, accumulator, flow exchange, differential equation, the stages of building, private models, working model.

Введение

Автоматизация технологических процессов (ТП) и производств, осуществляющих превращения сырьевых компонентов и формирование конечных продуктов в жидких и газообразных средах, предполагает решение широкого спектра сложных научных и технических задач. Эти задачи возникают в связи с изучением этих процессов и реализующих их аппаратов, их математическим описанием, экспериментальным, аналитическим и компьютерным исследованием их свойств, а также разработкой законов и систем управления. Последняя задача является стержневой для проектирования АСУ ТП, т.к. локальные автоматические системы составляют фундамент всей автоматизированной системы. От качества их работы в наибольшей степени зависит эффективность автоматизации.

Для разработки результативно работающих законов управления необходимы ТП математические модели (ММ) объектов управления (ОУ), адекватные их динамическим и статическим свойствам. Как показано многочисленными исследованиями, теоретической основой построения любых ММ являются законы сохранения вещества и энергии [1-3], с изменением накопления которых всегда связана динамика процессов, протекающих в любых объектах. В ТП объектом накопления всегда является вещество или энергия перерабатываемых материальных субстанций. Субъектами же их накопления являются аппараты, а также составляющие их функционально обособленные части, обладающие конечной физической емкостью. От сложности ММ динамики функционирования каждого аппарата или его части зависит сложность решения задачи нахождения требуемого по условиям технологии закона управления соответствующим процессом. Однако этим не ограничивается сложность задач автоматизации ТП.

Например, дистилляционная или ректификационная колонна, состоящая из множества т.н. «тарелок», является субъектом накопления преобразуемых ею фракций. При этом каждая ее тарелка также является субъектом накопления этих фракций, так что суммарное изменение их запасов в колонне зависит от процессов накопления в каждой тарелке. Таким образом, ММ сложного технологического аппарата или линии может быть и векторной моделью, в которой состояние описывается совокупностью накопленных в субъектах накопления количеств вещества или энергии. В таких случаях возникает более сложная задача нахождения требуемого по условиям технологии закона векторного управления подобным многоемкостным аппаратом.

Таким образом, задача математического моделирования ТП и реализующей их аппаратуры является одним из стержневых этапов разработки АСУ ТП, от качества выполнения которого зависит, как качество разработки локальных автоматических систем управления, так и качество разработки всей автоматизированной системы в целом [2-4].

Основное уравнение ММ ТП в отдельном накопителе

В работах [1-3] излагается универсальная концепция построения ММ аппаратов, для которых характерно, протекание ТП производства продукции в жидких, газообразных или паровых средах. Следствием универсальности этой концепции является универсальность как всей структуры, так и составляющих базовой ММ ТП и аппаратов, рассматриваемых в качестве ОУ. Стандартная накопительная структура такой ММ, выражающая какой-либо закон сохранения, имеет предельно простой вид дифференциального уравнения (ДУ) первого порядка:

$$\frac{dQ_{acc}}{dt} = q_{inp} - q_{out}, \qquad (1)$$

где обобщенные потоки q_{inp}, приносящие в различных формах накапливаемую субстанцию, и обобщенные потоки q_{out}, уносящие ее из аппарата, определяют скорость изменения накопления во времени t субстанции - dQ_{acc}/dt.

Математические особенности ММ ТП в отдельном накопителе

Однако простота ММ (1) объясняется фундаментальностью описываемого явления. Любая конкретизация физической сути ее составляющих резко усложняет уравнение (1), делая его, чаще всего, нелинейным. Так запас накапливаемой в аппарате субстанции $p_V(t)$ описывается мультипликативной функцией вида

$$Q_{acc}(t) = V_{acc}(t,\{\pi_{Vi}\}) \cdot p_V(t), \qquad (2)$$

где $V_{acc}(t,\{\pi_{Vi}\})$ - условный объем аппарата, как количественная мера способности запасать накапливаемую субстанцию. Эта мера может быть нестационарной и зависеть от множества некоторых параметров $\{\pi_{Vi}\}$, влияющих на емкость накопителя. Так накопления вещества или тепла определяются произведениями массы (расхода) на концентрацию или на теплоемкость и температуру и т.п.

Например, масса запасенной в технологической емкости жидкости задается формулой $M(t) = H(t) \cdot S(t) \cdot \rho(t)$, где H, S, ρ - уровень, площадь сечения и плотность жидкости в емкости, которые в общем случае могут переменными или параметрически зависимыми.

Если в (2) и $V_{acc}(...)$ и $p_V(t)$ являются переменными технологического состояния (ПТС) производственного процесса в аппарате, эта зависимость уже оказывается существенно нелинейной, давая при взятии производной сумму произведений одной из них на производную другой. Если же среди параметров π_{Vi}, определяющих объем накопления, оказываются другие ПТС аппарата (уровень для не цилиндрических емкостей, плотность для растворов с меняющейся концентрацией и т.п.), то в левой части ДУ (1) может сформироваться очень сложное выражение.

Математические особенности ММ взаимосвязей отдельных накопителей

Мультипликативны обычно и физически развернутые ММ потоков обмена аппаратом субстанцией с внешней технологической средой (другими аппаратами и их накопителями вещества или энергии):

$$\forall ind \in \{inp, out\} \rightarrow q_{ind}(t) = G_{ind}(t, \{\pi_{G_{ind}}\}) \cdot p_{G_{ind}}(t),$$

где $q_{ind}(t)$ - потоки, приносящие в аппарат (или уносящие из него) накапливаемую субстанцию $p_{G_{ind}}$; $\{\pi_{G_{ind}}\}$ - некоторое множество параметров потока, определяющих интенсивность переноса субстанции $p_{G_{ind}}$. Потоки вещества или тепла определяются произведениями массы (расхода) на концентрацию или на теплоемкость и температуру и т.п. Отдельные параметры $\pi_{G_{ind}}$ потока сами по себе могут определяться ПТС процесса, протекающего в аппарате, причем зачастую также мультипликативно. В результате и в правую часть ДУ (1) попадают довольно сложные мультипликативно сформированные нелинейные функции. Например, если переносимой потоком субстанцией является растворенное в носителе вещество, то его концентрация влияет на плотность потока, которая, в свою очередь, влияет на объемный расход [1,4,5].

Выражения (2) и (3) отображают частные закономерности протекания соответствующих процессов и представляют собой, соответственно, накопительные и потоковые естественные инварианты моделируемого ОУ, которые являются исключительно объектными характеристиками, присущими ММ только данного исследуемого технологического аппарата. Математическим результатом их подстановок в (1) является то, что ММ ОУ структурно значительно усложняется, что требует обычно специальных аналитических и компьютерных исследований свойств объекта [1,2,4,6].

Математические особенности ММ частных закономерностей протекания технологических процессов

Однако описанными факторами степень нелинейности и, соответственно, сложность ММ ОУ ТП не ограничивается. Во многих производственных процессах, в частности, химико-технологических, теплоэнергетических, и родственных им влияние ПТС и входных воздействий на параметры π_{Vi} и $\pi_{G_{ind}}$, входящие в (2) и (3), описываются, зачастую, еще более сложными, чем произведение, существенно нелинейными аналитическими выражениями. Они могут иметь подобные друг другу математические структуры, но описывать совершенно разнородные физические и химические процессы. Так, и зависимость кинетической энергии $E_{fl}(...)$ потока в длинном трубопроводе от его скорости $v(t)$ [5], и закон действующих масс при описании зависимости скорости химической реакции от концентраций реагентов [6-8], выражаются степенными функциями:

$$E_{fl}(v) = \frac{M(t)\cdot v(t)^2}{2},$$

где $M(t)$ единовременная масса потока в трубопроводе;

$$v_r(c,t) = k_0 \cdot {c_a}^{\lambda_a}(t)\cdot {c_b}^{\lambda_b}(t)\cdot \ldots,$$

где k_0 - константа скорости реакции, c_a, c_b - концентрации реагентов, λ_a, λ_a - стехиометрические коэффициенты реакции.

Зависимость константы скорости химической реакции от температуры $T(t)$ описывается законом Аррениуса [9], имеющим показательную форму:

$$k(t,T.p) = k_0 \cdot \exp\left(\frac{E(T,p)}{R(T,p)\cdot T(t)}\right),$$

а зависимость скорости химической реакции от всех важнейших параметров и переменных ТП объединяет эти нелинейности, добавляя к ним нелинейную операцию деления:

$$w_p(t) = k_0 \cdot \exp\left(\frac{E(\theta,p)}{R(\theta,p)\cdot \theta(t)}\right)\cdot {c_a}^{\lambda_a}(t)\cdot {c_b}^{\lambda_b}(t),$$

где $E(...)$ - энергия активации, $R(\ldots)$ - универсальная газовая постоянная, $\theta(\ldots)$ - температура, p - давление, [7-9].

Достаточно существенна и нелинейность расхода газа или жидкости через регулирующий орган. Его ММ, даже в первом приближении, определяется выражением, содержащим возведение в квадрат, знак радикала и разрывные по производной функции модуля и сигнатуры:

$$G(t)=\alpha(t)\cdot\mathbf{sign}[p_1(t)-p_2(t)]\cdot\sqrt{\left|p_1{}^2(t)-p_2{}^2(t)\right|},$$

где α - пропускная способность, p_1, p_2 - давления на входе и выходе регулирующего органа.

Заключение

Демонстрируемое формулами (4-8) многообразие структур и компонентов ММ накопительных и потоковых инвариантов химической технологии, а также внутренних частных механических, физических, химических и др. закономерностей их протекания требует специального исследования каждого типа процесса для выявления как универсальных инвариантов, унифицирующих математические свойства моделей таких объектов, так и построения специфических инвариантов, требующих индивидуального исследования и индивидуального применения при синтезе законов управления соответствующими объектами [10-13].

При решении задач построения АСУ ТП любого производства, связанного с превращением сырьевых компонентов и формированием конечных продуктов в жидких и газообразных средах, необходимо проведение узкоспециализированных математических исследований по математическому моделированию соответствующих процессов и аппаратов и построению методик и алгоритмов учета в законах управления их математических особенностей [14-15].

Библиографический список

1. Нейдорф Р.А., Ситников А.В. Моделирование химико-технологических процессов на микроЭВМ: Учебное пособие. - Новочеркасск: НПИ, 1986.- 88 с.

2. Нейдорф Р.А. Инварианты объектов синергетического управления в химической технологии// Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем/ Под ред. А.А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. С. 238-256.

3. Мохсен М.Н. Алгоритм формализованного построения математических моделей технологических процессов на основе обобщенного уравнения накопления// Труды 6-го Международного семинара (п. Дивноморское, 19 – 24 октября 2015 г.) / Под общ. ред. Р.А. Нейдорфа. – Ростов-н/Д: ДГТУ, 2015.– 472 с.- С. С.56-60.

4. Нейдорф Р.А. Характерные нелинейные инварианты и математические модели объектов управления химических производств// Современная прикладная теория управления: Новые классы

регуляторов технических систем/ Под ред. А.А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. С. 257-270.

5. Зельдович Я.Б. Химическая физика и гидродинамика. - М.: Наука, 1984. - 374 с.

6. Пинаев Г. Ф., Печковский В. В. Основы теории химико-технологических процессов. - Минск: Вышэшие школа, 1973. - 332 с.

7. Дикерсон Р. и др. Основные законы химии. В 2-х ч. - М.: Мир, 1982. - 652 с.

8. Эмануэль Н.М. Химическая кинетика (Наука о химическом процессе). - М.: Знание, 1966. - 48 с.

9. Бенсон С.У. Химическая кинетика. Термохимическая кинетика. - М.: Мир, 1971. - 308 с.

10. Кафаров В.В. и др. Принципы математического моделирования химико-технологических систем. Введение в системотехнику химических производств. - М.: Химия, 1974. - 256 с.

11. Кафаров В.В., Мешалкин В.П. Анализ и синтез химико-технологических систем: [Учеб. пособ. для хим.-технол. спец. вузов]. - М.: Химия, 1991. - 431 с.

12. Алексеев В.Л., Пахомов В.Ф. Моделирование и оптимизация технологических процессов в пищевой промышленности. М.: Агропромиздат, 1987. – 272 с.

13. Мохсен М.Н, Нейдорф Р.А. Эффективный формализованный подход к задаче построения математических моделей технологических процессов// Труды 6-го Международного семинара (п. Дивноморское, 19 – 24 октября 2015 г.) / Под общ. ред. Р.А. Нейдорфа. – Ростов-н/Д: ДГТУ, 2015.– 472 с.- С.43-47.

14. Нейдорф Р.А. Теория автоматического управления в технологических системах: учебное пособие [Текст] / Р.А. Нейдорф, Н.С. Соловей. – Ухта: Институт управления, информации и бизнеса, 2005. –212 с.: ил.

15. Мохсен М.Н, Нейдорф Р.А. Синтез законов квазиоптимального управления технологическими объектами первого порядка/ Инженерный Вестник Дона, №4 (2015), http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3348

УДК 519.87: 681.51

Синтез закона квазиоптимального управления теплообменником с существенной объектно обусловленной связностью переменных технологического состояния

Нейдорф Р.А., Донской Государственный Технический Университет, Ростов-на-Дону, Россия, ran_pro@mail.ru

Мохсен М.Н., Донской Государственный Технический Университет, Ростов-на-Дону, Россия, Ирак, mohammed.naima@gmail.com

Аннотация. Рассмотрена проблема синтеза закона управления с технологическими ограничениями на значения внутренних переменных состояния. Моделируется теплообменник с передачей потока тепла перегородки. Показана значительная и сильную нелинейность и связность между технологическими переменными состояния. Решена задача синтеза нелинейного закона управления, обеспечивающего высокую скорость и технологическое равновесие. Использованы методы эталонных моделей, идентификации производных и квази-оптимизации. В результате выполнен синтез сложного нелинейного закона управления, который предназначен для использования в технологии утилизации тепла при обработке растительных масел.

Ключевые слова: технологический процесс, аппарат, теплообменник, технологический поток, продукт, теплоноситель, математическая модель, переменная состояния, закон управления, быстродействие.

Abstract: The problem of the synthesis of the control law with a strong technological units internal connection state variables. modeled common thermal unit preparation of process flow with heat transfer through the partition. Showing significant and a strong nonlinearity and connectedness its technological state variables. solved a task development of non-linear control law, provides high-speed and technology equilibrium. Used methods of reference models, identification derivatives and - a quasi optimization. The result is a synthesis of complex non-linear control law, which is intended to be used in the heat recovery technology in the processing of vegetable oils.

Keyword: technological process, apparatus, heat exchanger, process flow, product, coolant, mathematical model, state variable, control law, speed.

Введение

Технологические аппараты многих производств (химической, пищевой и др.) характеризуются сильными, в основном нелинейными внутренними взаимосвязями между переменными их состояния. Без учета этой особенности невозможно обеспечить широкие функциональные возможности АСУ технологическими процессами (АСУ ТП) [1-3], их высокие технические характеристики, живучесть и надежность, обеспечиваемые локальными системами управления (ЛСАУ) [4-6].

Именно ЛСАУ обрабатывают первичную информацию о состоянии технологического процесса и обеспечивают оперативное воздействие на исполнительные механизмы регулирующих

органов управления процессом. Этими системами формируются фундаментальные свойства АСУ ТП: технологическая корректность, связность, устойчивость и быстродействие управления.

Характерным примером технологического объекта управления (ТОУ) является чрезвычайно распространенный в различных производствах теплообменник, реализующий тепловую подготовку перерабатываемого сырья или полуфабриката без прямого контакта технологического потока и теплоносителя. Его математическая модель демонстрирует жесткую и существенно нелинейную связь переменных как самой нагреваемой субстанции, так и теплоносителя. На примере синтеза закона управления таким аппаратом можно показать и сложность, и современные возможности теории управления при решении подобных задач.

Постановка задачи

В настоящей статье ставится задача разработки закона управления теплообменником, который позволяет реализовать связное, технологически синхронизированное управление нагревом технологического потока, обеспечивающее при этом быстродействие, близкое к максимальному, технологически обусловленному.

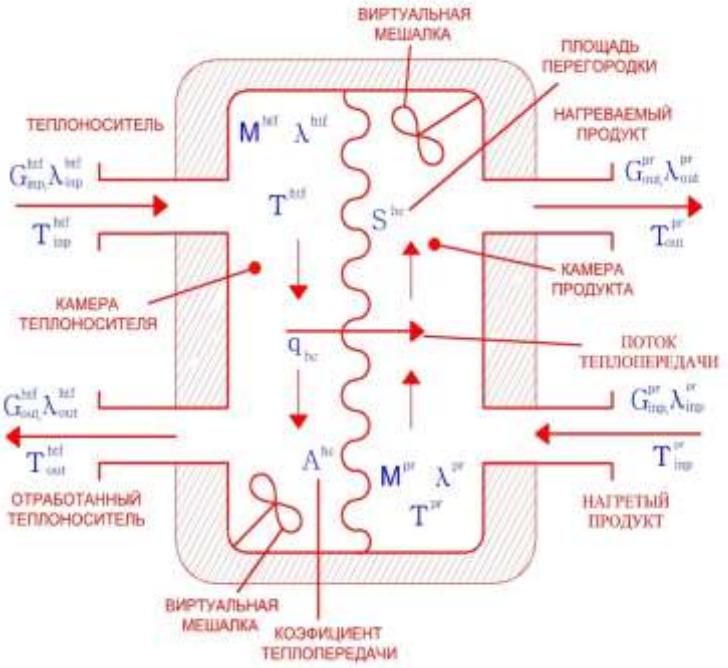


Рис.1 Расчетная схема аппарата с теплообменом через перегородку

Математическая модель динамики теплообмена через стенку

Упрощенная модель аппарата с теплообменом через непроницаемую перегородку (ТНП), приведенная на рис. 1, рассматривается с допущением об идеальном смешении (ИС) в обеих секциях (ИС обозначено «виртуальными мешалками» в каждой секции). Примерами близких реальных объектов являются термостаты, аппараты с паровой рубашкой и т.п. Однако и более далекие от них

по конструкции теплообменники (ТО), типа кожухотрубных или пластинчатых, могут, в первом приближении, описываться такими моделями.

В связи с наличием перегородки в таких ТО образуются две камеры: теплоносителя и технологического потока (продукта). То есть аппарат имеет две отдельные накопительные емкости, разделенные перегородкой. Поэтому он описывается двумя ДУ, составленными для каждого накопителя в отдельности [7-9]. Тогда в базовую модель ТО будут входить модели мгновенного накопления тепловой энергии в средах каждой из камер [10-11]:

$$\begin{cases} Q_{acc}^{htf}(t) = M^{htf}(t) \cdot \lambda^{htf}(t) \cdot T^{htf}(t); & (a) \\ Q_{acc}^{pr}(t) = M^{pr}(t) \cdot \lambda^{pr}(t) \cdot T^{pr}(t), & (b) \end{cases} \quad (1)$$

где $Q_{acc}^{htf}(t)$, $Q_{acc}^{pr}(t)$ - количества тепловой энергии (Дж), накопленные в камере теплоносителя и технологического потока (продукта) в момент времени t; $M^{htf}(t)$ и $M^{pr}(t)$ - массы (кг) соответствующих субстанций; $\lambda^{htf}(t)$, $\lambda^{pr}(t)$ - их теплоемкости (Дж/кг*К); $T^{htf}(t)$, $T^{pr}(t)$ - некие температуры (К), характеризующие общий тепловой запас объема камеры. Незначительна зависимость теплоемкости большинства жидких веществ, используемых в технологиях, от температуры, а также их несжимаемость, позволяют положить $M^{htf}(t) = M^{htf}$, $M^{pr}(t) = M^{pr}$, $\lambda^{htf}(t) = \lambda^{htf}$, $\lambda^{pr}(t) = \lambda^{pr}$, а допущение об ИС потоков в камерах позволяет положить $T^{htf}(t) = T_{out}^{htf}(t)$ и $T^{pr}(t) = T_{out}^{pr}(t)$.

Входящие и выходящие тепловые потоки, конвективно осуществляемые теплоносителем $q_{inp}^{htf}(t)$, $q_{out}^{htf}(t)$ и нагреваемым продуктом $q_{inp}^{pr}(t)$, $q_{out}^{pr}(t)$, с учетом сделанного выше допущения о неизменности теплоемкостей, определяются следующими мультипликативными выражениями [7,8,10]:

$$\begin{cases} q_{inp}^{htf}(t) = \lambda^{htf} \cdot G_{inp}^{htf}(t) \cdot T_{inp}^{htf}(t); & (a) \\ q_{out}^{htf}(t) = \lambda^{htf} \cdot G_{out}^{htf}(t) \cdot T_{out}^{htf}(t); & (b) \\ q_{inp}^{pr}(t) = \lambda^{pr} \cdot G_{inp}^{pr}(t) \cdot T_{inp}^{pr}(t); & (c) \\ q_{out}^{pr}(t) = \lambda^{pr} \cdot G_{out}^{pr}(t) \cdot T_{out}^{pr}(t), & (d) \end{cases} \quad (2)$$

где $\lambda_{inp}^{htf}(t)$, $\lambda_{out}^{htf}(t)$, $\lambda_{inp}^{pr}(t)$, $\lambda_{out}^{pr}(t)$ - теплоемкости (Дж/кг*К) входного (*inp*) и выходного (*out*) теплоносителя (*htf*) и продукта (*pr*), соответственно; $G_{inp}^{htf}(t)$, $G_{out}^{htf}(t)$, $G_{inp}^{pr}(t)$, $G_{out}^{pr}(t)$ - входные (*inp*) и выходные (*out*) расходы теплоносителя (*htf*) и продукта (*pr*) через камеры аппарата, соответственно; $T_{inp}^{htf}(t)$, $T_{out}^{htf}(t)$, $T_{inp}^{pr}(t)$, $T_{out}^{pr}(t)$ - их температуры в соответствующих точках. В большинстве случаев изменения температуры взаимодействующих агентов процесса теплообмена не

столь велики, и справедливы допущения: $\lambda_{inp}^{htf}(t) \approx \lambda_{out}^{htf}(t) = \lambda^{htf}(t)$ и $\lambda_{inp}^{pr}(t) \approx \lambda_{out}^{pr}(t) = \lambda^{pr}(t)$. Если теплоноситель и продукт являются жидкостями, то, в силу практической несжимаемости последних, $G_{inp}^{htf}(t) = G_{out}^{htf}(t) = G^{htf}(t)$ и $G_{inp}^{pr}(t) = G_{out}^{pr}(t) = G^{pr}(t)$.

Особенностью ММ аппарата ТНП является наличие нематериального внутреннего потока теплообмена между его камерами. Это сложный процесс, связанный с передачей тепла к поверхности перегородки в камере теплоносителя, теплопередачей через перегородку (теплопроводностью) и теплоотдачей от нее в среду нагреваемого продукта. Протекание процесса определяется рядом частных законов (Фурье, Ньютона и др.), но в целом для теплового потока $q_{hc}(t)$ (Дж/с) подчиняется теоретико-эмпирическому закону следующего вида:

$$q_{hc}(t) = A^{hc} \cdot S^{hc} \cdot \left(T_{out}^{htf}(t) - T_{out}^{pr}(t)\right) \qquad (3)$$

где A^{hc} - обобщенный коэффициент теплопередачи (Вт/м2*К); S^{hc} - поверхность теплообмена (м^2).

С учетом выражений (1-3) и универсальной ММ закона сохранения в нестационарной накопительной системе можно для камеры подогреваемого продукта записать следующее ДУ:

$$M^{pr} \cdot \lambda^{pr} \cdot \frac{d\,T_{out}^{pr}(t)}{d\,t} = -\left(\lambda^{pr} \cdot G^{pr}(t) + A^{hc} \cdot S^{hc}\right) \cdot T_{out}^{pr}(t) +$$

$$+ \lambda^{pr} \cdot G^{pr}(t) \cdot T_{inp}^{pr}(t) + A^{hc} \cdot S^{hc} \cdot T_{out}^{htf}(t); \qquad (4)$$

Аналогично формируется ДУ для камеры теплоносителя:

$$M^{htf} \cdot \lambda^{htf} \cdot \frac{d\,T_{out}^{htf}(t)}{d\,t} = -\left(\lambda^{htf} \cdot G^{htf}(t) + A^{hc} \cdot S^{hc}\right) \cdot T_{out}^{htf}(t) +$$

$$+ \lambda^{htf} \cdot G^{htf}(t) \cdot T_{inp}^{htf}(t) + A^{hc} \cdot S^{hc} \cdot T_{out}^{pr}(t); \qquad (5)$$

Для приведения ММ, состоящей из ДУ (4) и (5) целесообразно провести формальную замену обозначений переменных и параметров ММ по следующей схеме:

$$T_{out}^{pr}(t) = x_1(t);\ T_{out}^{htf}(t) = x_2(t);\ G^{htf}(t) = u(t);\ G^{pr}(t) = v_1(t);\ T_{inp}^{pr}(t) = v_2;\ T_{inp}^{htf}(t) = v_3(t) \qquad (6)$$

$$\alpha_1 = \frac{A^{hc} \cdot S^{hc}}{M^{pr} \cdot \lambda^{pr}};\ \alpha_2 = \frac{A^{hc} \cdot S^{hc}}{M^{htf} \cdot \lambda^{htf}};\ \gamma = \frac{1}{M^{pr}};\ \beta = \frac{1}{M^{htf}}. \qquad (7)$$

Тогда ММ аппарата с ТНП примет следующий вид:

$$\begin{cases} \dfrac{d\,x_1(t)}{d\,t} = -\alpha_1 \cdot x_1(t) + \alpha_1 \cdot x_2(t) - \gamma \cdot v_1(t) \cdot x_1(t) + \gamma \cdot v_1(t) \cdot v_2(t); & (a) \\ \dfrac{d\,x_2(t)}{d\,t} = \alpha_2 \cdot x_1(t) - \alpha_2 \cdot x_2(t) - \beta \cdot u(t) \cdot x_2(t) + \beta \cdot u(t) \cdot v_3(t). & (b) \end{cases} \qquad (8)$$

Переменная технологического состояния (ПТС) $x_1(t)$ является, одновременно, выходной переменной ОУ. Поэтому к ней можно применить подход, описанный в работах [12-14], и

осуществить квазиоптимизацию быстродействия с использованием нелинейной дробно-радикальной функции:

$$\frac{d\,x_1(t)}{d\,t}=\frac{\dot{x}_m\cdot(z_1(t)-x_1(t))}{\sqrt{(z_1(t)-x_1(t))^2+\varepsilon_1^2}} \qquad (9)$$

где $z_1(t)$ - заданное значение температуры $x_1(t)$ потока продукта на выходе теплообменника; $\dot{x}_m$ - максимально допустимая по технологическим условиям скорость изменения температуры продукта.

Сопоставляя производные переменной $x_1(t)$ в левых частях (8а) и (9), получим условие квазиоптимизации процесса нагрева продукта:

$$-\alpha_1\cdot x_1(t)+\alpha_1\cdot x_2(t)-\gamma\cdot v_1(t)\cdot x_1(t)+\gamma\cdot v_1(t)\cdot v_2(t)=\frac{\dot{x}_m\cdot(z_1(t)-x_1(t))}{\sqrt{(z_1(t)-x_1(t))^2+\varepsilon_1^2}}.$$

Структура ММ аппарата с ТНП такова, что $x_1(t)$ непосредственно не зависит от управления. Поэтому в данном случае целесообразно применить прием, состоящий в формировании псевдоуправления, роль которого играет внутренняя ПТС объекта - эквивалентная температура в кожухе теплоносителя $x_2(t)$. Действительно, полученное выше уравнение можно разрешить относительно нее:

$$x_2(t)=\frac{\dot{x}_m\cdot(z_1(t)-x_1(t))}{\alpha_1\cdot\sqrt{(z_1(t)-x_1(t))^2+\varepsilon_1^2}}-x_1(t)+\frac{\gamma}{\alpha_1}\cdot v_1(t)\cdot x_1(t)-\frac{\gamma}{\alpha_1}\cdot v_1(t)\cdot v_2(t) \qquad (10)$$

Дифференцируя (10) в предположении постоянства задания на температуру продукта, его входной температуры и производительности технологической линии, получаем т.н. желаемое или эталонное ДУ [15,16], которым должна описываться камера теплоносителя. Производная $\frac{d\,x_1(t)}{d\,t}$ в полученном выражении заменяется на эталонное ДУ (9):

$$\frac{d\,x_2(t)}{d\,t}=\frac{\dot{x}_m^{\,2}}{\alpha_1}\cdot\frac{(z_1-x_1(t))}{\sqrt{(z_1-x_1(t))^2+\varepsilon_1^2}}\cdot\left\{\frac{(z_1-x_1(t))^2}{\left[(z_1-x_1(t))^2+\varepsilon_1^2\right]^{3/2}}-\frac{1}{\sqrt{(z_1-x_1(t))^2+\varepsilon_1^2}}\right\}-$$

$$-\left(1-\frac{\gamma}{\alpha_1}\cdot v_1(t)\right)\cdot\frac{\dot{x}_m\cdot(z_1-x_1(t))}{\sqrt{(z_1-x_1(t))^2+\varepsilon_1^2}} \qquad (11)$$

Приравнивая производные $\frac{d\,x_2(t)}{d\,t}$ в эталонном для САУ ДУ (11) и фактической ММ ОУ, получаем выражение для управления потоком теплоносителя:

$$u(t)=\frac{1}{\beta\cdot(v_3-x_2(t))}\cdot\left\{\alpha_2\cdot x_2(t)-\alpha_2\cdot x_1(t)-\left(1-\frac{\gamma}{\alpha_1}\cdot v_1(t)\right)\cdot\frac{\dot{x}_m\cdot(z_1-x_1(t))}{\sqrt{(z_1-x_1(t))^2+\varepsilon_1^2}}+\right.$$

$$+\frac{\dot{x}_m^{\,2}}{\alpha_1}\cdot\left[\frac{(z_1-x_1(t))^3}{\left[(z_1-x_1(t))^2+\varepsilon_1^2\right]^2}-\frac{(z_1-x_1(t))}{(z_1-x_1(t))^2+\varepsilon_1^2}\right]\Bigg\} \qquad (12)$$

Заключение

Полученный закон управления выглядит довольно громоздким, однако современные методы микропроцессорного управления фактически стирают грань между простейшими П- и ПИ-законами и сложными нелинейными законами типа (1»). Следует заметить, что если отказаться от допущения о постоянстве задания на температуру и технологического потока, будет получен еще более сложный, но и более функциональный закон управления. Тем не менее возможность его реализации не вызывает сомнений.

Библиографический список

1. Фёдоров А.Ф., Кузьменко Е.А. Системы управления химико-технологическими процессами: Учебное пособие. -Томск: ТПУ, 2009.-213 с.

2. Алейников, А.К. Системы управления химико-технологическими процессами / А.К. Алейников, Е.П. Решетняк, А.В. Комиссаров. -Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2008. - 416 с. ISBN 978-5-9758-0740-3

3. Беспалов, А.В. Системы управления химико-технологическими процессами. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. - 690 с.

4. Бородин, И.Ф. Автоматизация технологических процессов / И.Ф. Бородин, Ю.А. Судник. - М.: КолосС, 2004. -344с. ISBN 5-9532-0030-7

5. Нейдорф Р.А. Теория автоматического управления в технологических системах: учебное пособие [Текст] / Р.А. Нейдорф, Н.С. Соловей. – Ухта: Институт управления, информации и бизнеса, 2005. –212 с.: ил.

6. Ogunnaike B., Ray W.H. Process Dynamics, Modeling and Control. – New York, Oxford: Oxford University Press, 1994. – 1260 p.

7. А. Нейдорф Р.А., Ситников А.В. Моделирование химико-технологических процессов на микроЭВМ: Учебное пособие.- Новочеркасск: НПИ, 1986.-88 с.

8. Нейдорф Р.А. Инварианты объектов синергетического управления в химической технологии. В кн. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем / Под ред. А.А. Колесникова.- Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. Ч. III, п. 14.6, с. 238-256.

9. Мохсен М.Н, Нейдорф Р.А. Синтез законов квазиоптимального управления технологическими объектами первого порядка/ Инженерный Вестник Дона, №4 (2015), http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/3348

10. Нейдорф Р.А., Соловей Н.С. Теория автоматического управления в технологических системах// Ухта: Институт управления, информации и бизнеса, 2005,- 212 с.: ил.

11. Математическое моделирование химико-технологических процессов: Учебное пособие / Ас.М. Гумеров, Н.Н.Валеев, Аз.М. Гумеров, В.М.Емельянов; Казан. гос. технол. ун-т. – Казань, 2006. – 216 с.

12. Нейдорф Р.А. Нелинейное ускорение динамических процессов управления объектами первого порядка с учетом ограниченности воздействий // Вестник ДГТУ: Управление и диагностика в динамических системах. Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 1999.-С. 13—21.

13. Нейдорф Р.А., Волков Р.В. Теория и практика квазиоптимального по быстродействию управления в технических системах и АСУ ТП// Информатика и системы управления, №2 (6), 2003.-С. 144-155.

14. Neydorf, R., "Synthesis of Time Quasi-Optimal Asymptotically Stable Control Laws," SAE Technical Paper 2015-01- 2481, 2015, doi:10.4271/2015-01-2481.

15. Синтез законов управления в технических системах: Учеб. пособие. Ч.1. Инженерные методы синтеза законов управления в технических системах по эталонным математическим моделям/ Р.А. Нейдорф, Б.А. Иванов, П.С. Обухов, Н.С. Тимошенко и др.; Под общ. ред. Р.А. Нейдорфа, З.Х. Ягубова. - Ухта: УГТУ, 2000. - 168 с., ил.

16. Нейдорф Р.А., Соловей Н.С. Инженерные методы синтеза автоматических систем управления: Учеб. пособие; Под общ. ред. Р.А. Нейдорфа. – Ухта: УГТУ, Ростов-н/Д: РГАСХМ, 2004. – 255 с., ил.

УДК 621.837.7

О точности расчета кинематических параметров кривошипно-шатунного привода

Фридрих Р.А., Донской Государственный Технический Университет, Ростов-на-Дону, Россия, ralf_0711@mail.ru
Окунева Н.В., Донской Государственный Технический Университет, Ростов-на-Дону, Россия,
Золотовский А.В., Донской Государственный Технический Университет, Ростов-на-Дону, Россия,

Аннотация. Достоверность математической модели, предлагаемой для расчета кинематических параметров кривошипно-шатунного привода, имеет влияние на последующие теоретические расчеты процессов, протекающих в рабочих камерах различных поршневых машин. Наличие неточностей на начальном этапе в дальнейших расчетах может привести к эффекту мультипликации погрешностей до неприемлемых значений. В данной работе предпринята попытка численно оценить расхождение в математических моделях, предлагаемых в современной технической литературе. Приведена последовательность вывода зависимостей для расчета таких кинематических параметров как путь, пройденный поршнем и его мгновенная скорость, как функции от угла поворота выходного (входного) вала. Далее в виде графиков приведены результаты сравнения теоретических значений двух математических моделей – упрощенной и более точной.

Ключевые слова: Математическая модель, кинематические параметры, кривошипно-шатунный механизм

Abstract. Reliability of mathematical model proposed for the calculation of kinematic parameters of crank drive has an impact on subsequent theoretical calculation processes working of cellsin different piston machines. Inaccuracies in the initial phase in further calculations can lead to multiplier effects of errors to an unacceptable values. In this paper an attempt has been made to evaluate numerically the difference in mathematical models proposed in modern technical literature. There are presented sequence output dependencies for calculation of kinematic parameters such as the path traversed by the piston and its instantaneous velocity as a function of the angle of rotation of the output (input) shaft. Further are shown the graphs show the results of comparison of theoretical values of two mathematical models a more simple one and a more accurate one.

Keywords: Mathematical model, kinematical parameters, crank mechanism.

Теоретическое описание процессов, протекающих в поршневых ДВС, компрессорах, гидромашинах и других подобных устройствах, неразрывно связано с математическими моделями кинематики механизмов привода, применяемых для преобразования возвратно-поступательного движения поршня во вращательное движение выходного вала.

Варианты исполнения таких приводов достаточно разнообразны. Для этих целей применяют рычажные, кулачковые, зубчатые, винтовые с гидравлическими, электрическими и пневматическими устройствами и другие механизмы. Но наибольшее распространение получило преобразование, осуществляемое с помощью кривошипно-шатунного механизма (КШМ).

Рассмотрим вывод зависимостей, позволяющих рассчитать такие кинематические параметры как путь, пройденный поршнем и его скорость на примере КШМ поршневого компрессора, у которого ось цилиндра пересекает ось кривошипа (так называемый «центральный» КШМ). Расчетная схема приведена на рисунке 1.

Полагаем, что кривошип вращается с постоянной угловой скоростью ω_1 вокруг оси O_1. В этом случае шатун 2 будет поворачиваться со скоростью ω_2 вокруг оси O_2, а поршень 4 будет совершать возвратно поступательное движение относительно цилиндра 3.

При повороте кривошипа на угол α поршень переместится на величину x:

$$x=(r+R)-(r\cdot\cos\alpha+R\cdot\cos\gamma) \qquad (1)$$

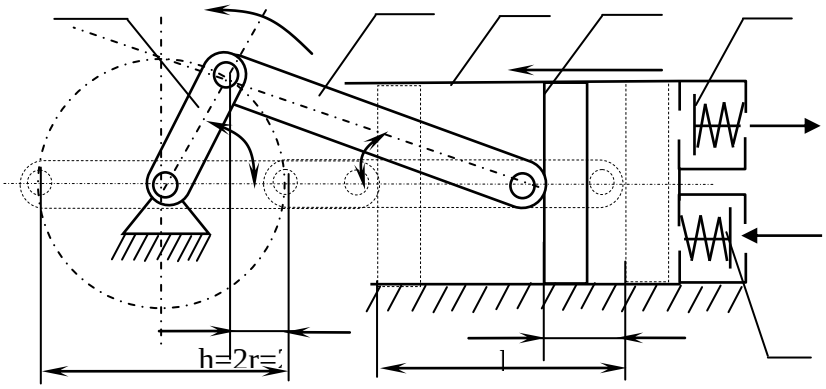


Рисунок 1 Поршневой компрессор с кривошипно-шатунным приводом и клапанным распределением: 1-кривошип; 2-шатун; 3 –цилиндр; 4-поршень; 5, 6 – выпускной и впускной клапана

Из теоремы синусов следует, что:

$$\frac{R}{r}=\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} \qquad (2)$$

Приведем эту зависимость к виду:

$$\sin\gamma=\frac{r}{R}\cdot\sin\alpha \qquad (3)$$

Следовательно,$\cos\gamma$ можно представить как:

$$\cos\gamma=\sqrt{1-\sin^2\gamma}=\left(1-\frac{r^2}{R^2}\cdot\sin^2\alpha\right)^{0,5} \qquad (4)$$

Тогда, ход поршня из (1.1) можно представить как функцию угла α:

$$x=(R+r)-\left[r\cdot\cos\alpha+R\cdot\left(1-\frac{r^2}{R^2}\cdot\sin^2\alpha\right)^{0,5}\right] \qquad (5)$$

Мгновенная скорость поршня υ в цилиндре может быть найдена как первая производная пути по времени, а именно:

$$\upsilon=\frac{dx}{dt} \qquad (6)$$

Проведем дифференцирование:

$$\upsilon = \frac{dx}{dt} = -r \cdot (-\sin\alpha) \cdot \frac{d\alpha}{dt} - R \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \cdot \sin^2\alpha\right)^{-0,5} \cdot \left(-\frac{r^2}{R^2} \cdot 2 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \cdot \frac{d\alpha}{dt}\right) \quad (7)$$

С учетом того, что $\frac{d\alpha}{dt} = \omega_1$, а $2 \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha = \sin 2\alpha$, выражение для определения мгновенной скорости примет вид:

$$\upsilon = r \cdot \omega_1 \left[\sin\alpha + \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \cdot \sin^2\alpha\right)^{-0,5} \cdot \frac{r}{R} \cdot \sin 2\alpha\right] = r \cdot \omega \left[\sin\alpha + \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{r}{R} \cdot \sin 2\alpha}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{R^2} \cdot \sin^2\alpha}}\right] \quad (8)$$

Однако, в литературных источниках [1…5] указывается зависимость вида:

$$\upsilon^* = r \cdot \omega_1 \left[\sin\alpha + \frac{1}{2} \cdot \frac{r}{R} \cdot \sin 2\alpha\right] \quad (9)$$

В одних случаях такая форма записи выводится путем разложения уравнения (4), как бинома Ньютона, в ряд слагаемых и пренебрежением членами ряда выше второго порядка вследствие их малости [1,2,3,5], в других [4] - подкоренное выражение (делитель) приравнивают единице, мотивируя это тем, что длина кривошипа ***r*** много меньше длины шатуна ***R***[2, 4]. Авторы утверждают, что такое допущение дает достаточную точность для практических расчетов.

Рассмотрим, насколько приемлем такой подход, сопоставив численные значения скоростей υ и υ^* между собой. Для этого воспользуемся данными о том, что отношение радиуса кривошипа к длине шатуна (безразмерный параметр КШМ $\lambda = r/R$)для автомобильных и тракторных двигателей находится в пределах 1/3...1/4,2, (т. е. 0,333...0,238) [1, 2].

Ниже представлены графики зависимости мгновенных скоростей поршня от угла поворота с учетом делителя $\sqrt{1 - \frac{r^2}{R^2} \cdot \sin^2\alpha}$ и без его учета для случая, когда безразмерный параметр КШМ равен *λ1*=0,333 (рис.*2, υ1(t) и υ12(t)*)и когда *λ2*=0,238 (рис.*3,υ2(t) и υ22(t)*). Значение радиуса кривошипа принималось равным *r=40 мм (ход поршня 80 мм)*, а угловая скорость полагалась постоянной величиной и равной ω_1*=42 рад/с* (*n≈400 об/мин*, минимально допускаемое число оборотов коленчатого вала двигателя ДВС для его устойчивой работы на холостом ходу).

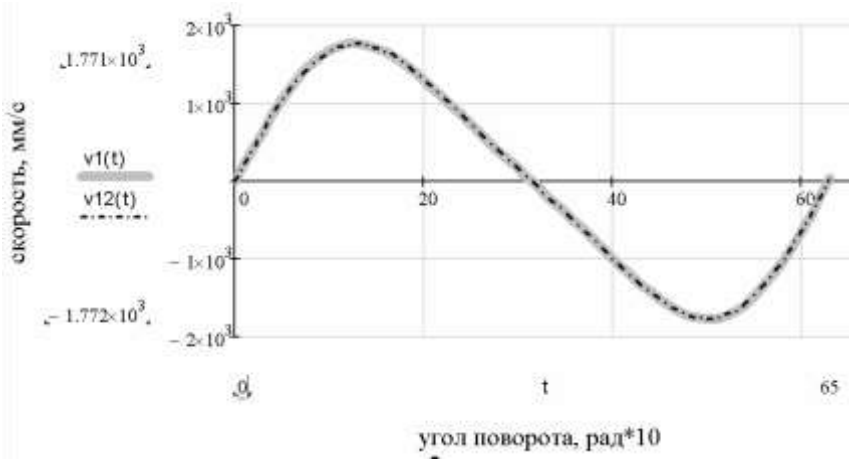


Рисунок 2 Мгновенные скорости υ1(t) и υ12(t), рассчитанные при λ1=0,333 по уравнениям (8) и (9) соответственно.

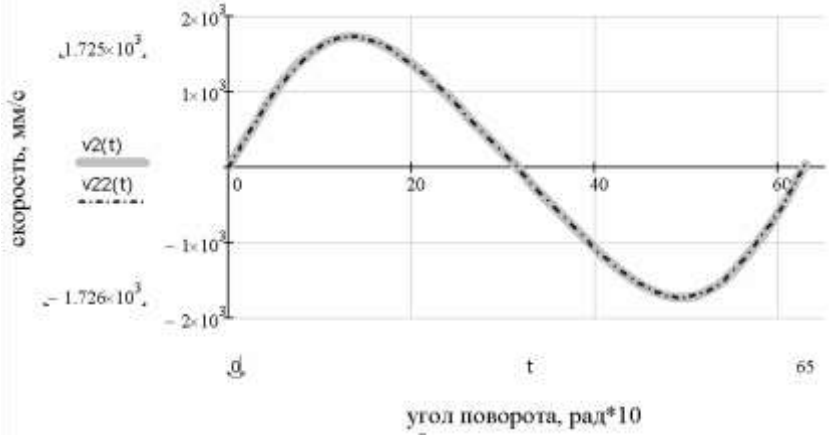


Рисунок 3 Мгновенные скорости υ2(t) и υ22(t), рассчитанные при λ2=0,238 по уравнениям (8) и (9) соответственно.

В представленном масштабе линии зрительно сливаются, но на рисунке *4* приведено расхождение значений скоростей в зависимости от текущего угла поворота (*deltaV1=υ1(t)-υ12(t) и deltaV2=υ2(t)-υ22(t)*).Из графика видно, что отклонение может достигать порядка 10,8 мм/с при *λ1*=0,333 и 3,8 мм/с при *λ2*=0,238

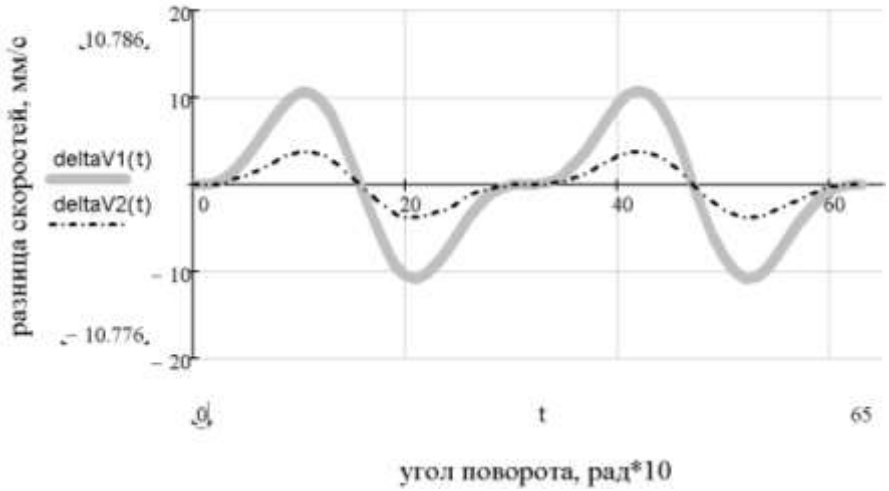


Рисунок 4 Расхождение значений мгновенных скоростей: deltaV1=υ1(t)-υ12(t); deltaV2=υ2(t)-υ22(t)).

Из дальнейшего анализа следует также, что при таком допущении погрешность Δ, определяемая как:

$$\Delta = \frac{\upsilon(t) - \upsilon 2(t)}{\upsilon(t)} * 100\% \quad , \qquad (10)$$

может изменяться при λ1=0,333 в пределах от -0,946% до 0,634 %, а при λ2=0,238 - от -0,312% до 0,235% (*рис.5*)

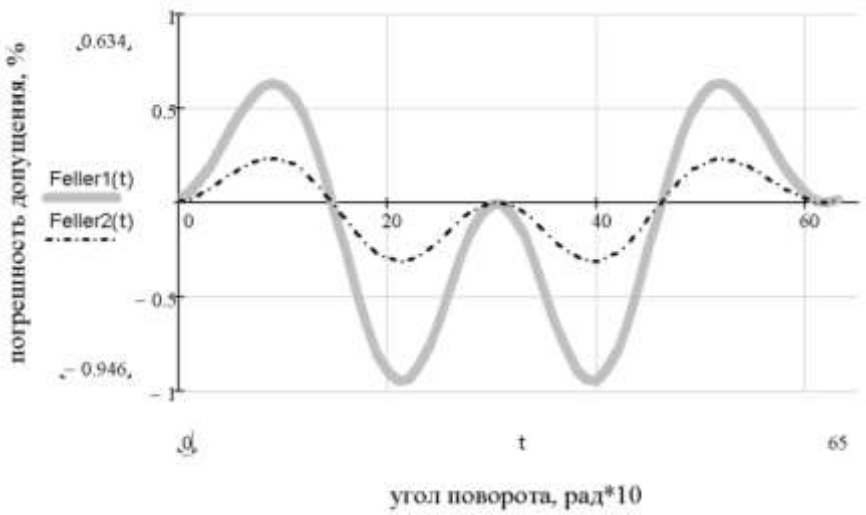


Рисунок 5 Погрешность мгновенных скоростей при принимаемых допущениях: Feller1=(υ1(t)-υ12(t))/υ1(t) и Feller1=(υ2(t)-υ22(t))/υ2(t)

Выполненное сравнение позволяет прийти к выводу, что предлагаемое авторами допущение приводит как к занижению, так и завышению мгновенной скорости до 1 %. Вероятно, такое отклонение в точности вычислений было вполне оправданно для середины 20-го века [5]. Однако, при современном уровне развития математического аппарата и вычислительной техники, упрощение рассмотренной расчетной зависимости представляется недостаточно корректным.

Библиографический список

1. Гоц А. Н. Кинематика и динамика кривошипно-шатунного механизма поршневых двигателей: учеб. пособие /А. Н. Гоц; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Редакционно-издательский комплекс ВлГУ, 2005. – 124 с.

2. М. Д. Артамонов, М. М. Морин, Г. А. Скворцов Основы теории и конструирования автотракторных двигателей: Конструирование и расчет автомобильных и тракторных двигателей. Учебник для вузов.- М.: Высш. школа, 1978. 133 с,

3. Луканин В. Н. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 книгах. Книга 2. Динамика и конструирование В.Н. Луканин, И.В. Алексеев, М.Г. Шатров, А.В. Павлов, Ю.В. Горшков, Н.И. Назаров, С.П. Ежов, Л.М. Матюхин, В.В. Синявский: М., ФГУП «Издательство «Высшая школа», 2007 г., 400 с.

4. Орлов Ю.М. Авиационные объемные гидромашины с золотниковым распределением. Пермь, ПГТУ ,1993. -252 с.

5 И. А. Биргер, Н. И. Дружинин, В. К. Житомирский и др. Авиационные поршневые двигатели. Кинематика, динамика и расчет на прочность. Пособие для инженеров. — М.: Оборонгиз, 1950. — 871 с.

Электромеханическая активация нефти и нефтяных остатков в аппаратах вихревого слоя

Минкин М.С. , Донской Государственный Технический Университет, Ростов-на-Дону, msi_58@mail.ru
Куимов Д.Н., Донской Государственный Технический Университет, Ростов-на-Дону,
Кулинич М.Н., Донской Государственный Технический Университет, Ростов-на-Дону

Аннотация. Представлен способ переработки нефти и нефтяных остатков с использованием технологии активации в аппаратах вихревого слоя. Описана техническая реализация аппарата вихревого слоя. Проанализированы достоинства и недостатки метода. Показана эффективность метода для очистки нефтепродуктов от сернистых соединений.

Ключевые слова: нефть и нефтепродукты, сернистые соединения, микрокрекинг, активация, аппарат вихревого слоя.

Abstract. The way of processing of petroleum and petroleum residues using techniques activation apparatus vortex sheet. Describes the technical realization of the device vortex layer. The advantages and disadvantages of the method. The efficiency of methods for cleaning oil from sulfur compounds.

Keywords: oil and petroleum products, sulfur compounds mikrokreking activation, fluidized-bed unit.

На сегодняшний день, основным методом выделения «светлых» фракций на нефтеперерабатывающих заводах является крекинг (термический, каталитический, гидрокрекинг). Данные процессы расщепления углеводородов, достаточно сложны, энергоемки и требуют использования большого количества дорогостоящих расходных катализаторов. Помимо трудности осуществления, процессы крекинга требуют первичной очистки сырой нефти от вредных примесей, негативно воздействующих на оборудование. К основным примесям, негативно воздействующим на активные свойства катализаторов можно отнести металлы, азотсодержащие соединения (анилин, пиридин, хинолин). Сера, не являясь вредной примесью при крекинге, способствует процессу коксообразованию, что также требует снижения содержания серосодержащих примесей при первичной обработке.

Таким образом, трудность и большая себестоимость получения ценных качественных нефтепродуктов заставляет искать новые технологии обработки сырой нефти. Разрабатываемые устройства предкрекинговой обработки, помимо основной задачи повышения выхода «светлых» фракций и снижения содержания вредных примесей должны соответствовать достаточно многим условиям, чтобы получить возможность применения на нефтеперерабатывающих предприятиях. Среди основных задач устройства предкрекинговой обработки можно выделить минимизацию энергопотребления и снижение использования расходных материалов в виде дорогостоящих катализаторов при термическом и каталитическом крекинге.

На сегодняшний день, известны различные способы воздействия на нефть и нефтепродукты, сопровождающиеся сообщением в систему энергии: акустической, тепловой, механической и т.д.

Главная проблема подобных устройств, заключается в сложной конструкции, а также необходимостью точной настройки при изменяющихся внешних условиях.

Прорывом в создании устройств в области предкрекинговой обработки стало применение эффекта кавитации, процесса возникновения в потоке жидкости полостей (пузырьков, каверн) заполненных газом, в результате местного понижения давления, и последующего схлопывания, сопровождающегося местными повышениями давления и температуры, микровзрывами, ультразвуком. Явление кавитации существует различных типов и имеет несколько источников возникновения, так если появление каверн и пузырьков осуществляется под влиянием понижения давления в потоке жидкости, кавитация является гидродинамической, если под влиянием акустических волн ультразвукового диапазона, то акустической.

Распространенным способом интенсификации явления кавитации является ультразвуковое воздействие на жидкость. Основная масса устройств, использующих для активации кавитации акустические волны ультразвукового диапазона, требует высокой длительности обработки, исчисляемой минутами, что ограничивает области их применения, так как для нефтеперерабатывающей промышленности экономически выгодно использовать устройства проточного типа.

Перспективным направлением предкрекинговой обработки может стать применение устройства электромеханической активации, проточного типа. Данный тип устройств находит широкое применение в различных областях промышленности, для выполнения технологических процессов, связанных с дисперсией, очисткой, а также получением эмульсий, суспензий и коллоидных растворов:

-очистка сточных вод;

-обработка лакокрасочных материалов;

-утилизация отходов:

-промышленных предприятий;

-животноводческих производств;

-жизнедеятельности человека;

-создание различных растворов;

-смешивание жидких и сыпучих веществ;

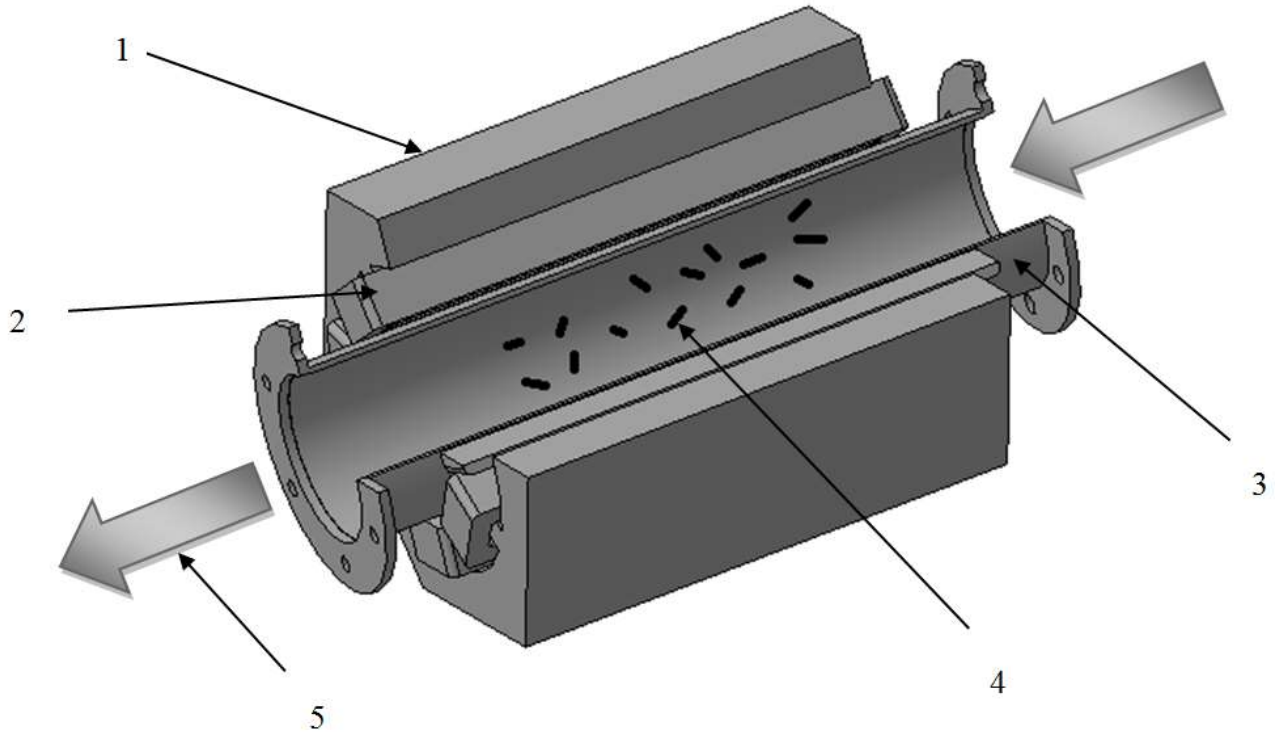


Рис.1 Типовая конструкция электромеханического активатора вихревого слоя
1 – корпус устройства; 2 – сосредоточенная обмотка; 3 – труба из немагнитного материала; 4 – ферромагнитные элементы; 5 – поток обрабатываемого сырья

Возможность применения электромеханической активации в области предкрекинговой обработки нефти и нефтяных остатков, подтверждают проведенные предварительные исследования, продемонстрировавшие возможность углубления переработки нефти, с увеличением выхода «светлых» фракций на 12%.

После электромеханической обработки нефти также было обнаружено уменьшение содержания серосодержащих и азотсодержащих примесей. Полученные результаты, объясняются особенностями протекания процессов, позволяющих при достаточно простой конструкции, обеспечивать высокую плотность энергии на единицу рабочего объема.

В общем случае, конструкция устройства состоит из 4 основных частей: индуктор цилиндрической формы, выполненный из электротехнической стали; сосредоточенная обмотка, уложенная в пазы статора; расположенная в расточке рабочая камера, представленная в виде немагнитной трубы, с помещенными в ней ферромагнитными элементами

Принцип работы электромеханического активатора вихревого слоя заключается в перемешивании обрабатываемого сырья интенсивно движущимися сквозь него ферромагнитными частицами, размещенными внутри рабочей камеры. Под воздействием внешнего магнитного поля, на каждую отдельно взятую ферромагнитную частицу действует комплекс сил. Эти силы заставляют их совершать сложное движение с большим числом степеней свободы, что создает возможность для возникновения большого количества разнообразных энергетических воздействий, обеспечивающих обработку сырья:

-магнитострикция;

-трение и соударение частиц;

-местное повышение температуры;

-акустические волны, возникающие под влиянием магнитострикции;

-электролиз;

-кавитационные процессы;

Важнейшей составляющей процесса электромеханической активации, согласно предварительным исследованиям, можно считать образование кавитационных пузырьков в обрабатываемой жидкой среде, оказывающих существенное влияние на физико-химические свойства обрабатываемого сырья.

Явление кавитации дает возможность дробить длинные углеводородные цепочки на более короткие, разрывая углеводородные связи с целью получения «светлых» фракций. Происходит разрушение структурированной системы с изменением плотности и вязкости.

В процессе обработки нефти кавитационным воздействием, энергии схлопывания достаточно для обеспечения разрыва углеводородных связей. А резкое локальное повышение давления и температуры, значения которых могут достигать сотен МПа и тысяч К° соответственно, создают условия для возникновения процессов, свойственных термическому крекингу. В соответствии с изученными механизмами протеканием процесса термического крекинга, можно предположить, что повышение температуры приводит к гомолитическому разрыву углерод-углеродной связи и образованию свободных радикалов. Энергия, необходимая для разрыва связей С-С находится в диапазоне 250-350 кДж/моль, энергия разрыва связей С-Н – в пределах 320-450 кДж/моль. Причем прочность связи С-Н в середине молекулы оказывается меньше, чем в конце, и в результате разрыв осуществляется в центральной части углеводородной цепочки. В дальнейшем происходит присоединение к оторвавшейся части свободного радикала, либо происходит процесс ароматизации углеводородов, путем превращения открытой цепочки углеводорода в углеводород циклического строения.

С процессом микрокрекинга частично связаны процессы снижения присутствия вредных азотсодержащих и серосодержащих примесей в нефти. В процессе обработки нефти и нефтепродуктов электромеханической активацией происходит разрыв связей C-S и C-N. При этом, образовавшиеся осколки связей способны вступать в реакцию с освободившимся после углерод-водородных связей водородом, с образованием сероводорода и аммиака.

Выводы

Востребованность в создании нетрадиционных технологий и устройств углубления переработки нефти будет постоянно возрастать. В первую очередь это связано с постепенным

истощением залежей легких углеводородов, что требует модернизацию нефтеперерабатывающей промышленности для возможности переработки «тяжелых» фракций нефти.

В этой связи, согласно проведенным исследованиям, единственным на сегодня перспективным направлением в области предкрекинговой обработки являются кавитационные процессы, способные обеспечивать переработку нефти и нефтяных остатков без использования химических присадок, заменяя существующие методы первичной обработки.

Предлагаемая технология непрерывной обработки нефти электромеханическим аппаратом вихревого слоя в будущем может стать альтернативой применяемым в нефтеперерабатывающей промышленности процессам термического и каталитического крекинга.

Библиографический указатель

1. Володин Г.И. Электромагнитные процессы в устройствах с произвольной подвижной частью: дис. ... докт. техн. наук : 05.09.01 / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). Новочеркасск, 2009. 304 с.

2. Бахвалов А.Ю. Электромеханические устройства с дискретной вторичной частью: алгоритмы анализа и синтеза и усовершенствованные конструкции: дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). Новочеркасск, 2008.137 с.

3. Логвиненко, Д. Д. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем / Д. Д. Логвиненко, О. П. Шеляков. – Киев : Техника, 1976.

Анализ и синтез методом АКАР системы управления колесного транспортного средства

Лапшин В.П., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,
Кравец В.С., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Аннотация. В статье приводится модель, отражающая анализ и синтез методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР). Отличие приведенной модели от существующей состоит в том, что данный метод позволяет увеличить показатели быстродействия системы. Помимо синтеза модели, приведен пример анализа динамики конкретного транспортного средства, в качестве которого выступил современный пассажирский электровоз ЭП2К. Результаты анализа представлены графиками переходных процессов, отражающие динамику движения электровоза и графики зависимости времени переходного процесса от постоянных времени в апериодических законах, используемых при синтезе системы управления методом АКАР. В целом полученные результаты позволяют говорить о том, что применение метода АКАР, в задаче синтеза системы управления, приводит к улучшению быстродействия системы управления без потери устойчивости.

Ключевые слова: метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), динамика транспортного средства, контактное взаимодействие колеса и поверхности дороги (колесной пары и рельс).

Abstract. The article presents a model that reflects analysis and synthesis method of analytical design of aggregated regulators (ACAR). The difference of the model from the existing one is that this method allows to increase the performance of the system. In addition to the synthesis model, an example of the analysis of the dynamics of the particular vehicle, which was made by a modern passenger locomotive EP2K. The results are shown in graphs of transient processes, reflecting the dynamics of the movement of the locomotive and graphs of time dependence of the transition process from continuous time aperiodic laws used in the synthesis of control systems by the method of ACAR. In General, these results suggests that the application of the method ACAR, in the problem of synthesis of control systems, leads to improved performance of the control system without loss of stability.

Keywords: method of analytical design of aggregated regulators (ACAR), the dynamics of the vehicle, the contact interaction of the wheel and the road surface (the wheelset and the rail).

Введение

Проектирование современных систем автоматического управления транспортными средствами, в контуре управления которыми нет человека, позволит существенно удешевить перевозки как в железнодорожном, так и в автотранспорном сообщении. Для синтеза современных систем управления транспортными средствами необходимо решить ряд проблем, одной из которых является проблема учета нелинейного взаимодействия колеса с дорогой (рельсом) и диссипативного рассеивания скорости движения транспортного средства воздушной средой и их влияние на тяговые и скоростные характеристики процесса управления. В связи с этим эффективное применение стандартных методов синтеза систем управления, к примеру, широко известных ПИД-регуляторов для таких систем может быть затруднительным или вовсе невозможным. Поэтому в качестве метода синтеза системы управления транспортного средства в работе был использован, получивший в

последнее время распространение метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР).

1. Метод АКАР

Метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов играет очень важную роль в проблеме синтеза систем управления нелинейными динамическими объектами.

Метод АКАР опирается на идею введения притягивающих *инвариантных многообразий (*ИМ) $\varphi_s(x_1,...,x_n)=0,$ с которыми наилучшим образом согласуются естественные (энергетические, механические, тепловые и т.д.) свойства объекта и требования задач управления.

С математической точки зрения отличительная особенность постановки проблемы синергетического синтеза состоит в способе генерации такой совокупности обратных связей — законов управления $u(\varphi)=u(x,z)$, которые переводят систему из произвольного исходного состояния сначала в окрестность ИМ $\varphi_s(x)=0$, а затем обеспечивают асимптотически устойчивое движение вдоль этих ИМ вплоть до попадания на целевые аттракторы. На этих аттракторах гарантируется выполнение заданных инвариантов — технологических, механических, энергетических и др.

В методе АКАР, основанном на процедуре агрегирования (декомпозиции), для обеспечения асимптотической устойчивости синтезируемых нелинейных систем высокой размерности используется параллельно-последовательная совокупность функций Ляпунова. При этом сначала вводятся простейшие функции Ляпунова вида $V_s=0.5\varphi_s^2$, относительно макропеременных $\varphi_s(x_1,...,x_n)$, а затем на конечном многообразии $\varphi_r=0$ исследуется устойчивость движения только по отношению к части координат $(n-rm)$, которые описывают поведение изображающей точки декомпозированной системы на заключительном этапе движения. Указанная совокупность функций Ляпунова представляет собой своего рода аналог метода векторных функций Ляпунова (ВФЛ), развитый в работах академика РАН В.Ф. Матросова, в применении к синергетической теории синтеза нелинейных систем. В теории АКАР метод ВФЛ отличается асимптотически точной динамической декомпозицией исходной системы. Кроме того, не требуется поиск соответствующих систем и теорем сравнения для оценки асимптотической устойчивости движения системы. Эта важная особенность связана с тем, что в методе АКАР рассматриваются задачи устойчивости управляемых динамических систем. Иначе говоря, в синергетическом подходе метод ВФЛ естественным образом связан с процедурой АКАР. Именно возможность структурного синтеза управлений, переводящих изображающие точки от одного многообразия к другому, пониженной размерности, позволяет в методе АКАР осуществить строгую процедуру аналитического построения ВФЛ для текущего анализа асимптотической устойчивости синтезируемых нелинейных систем.

Эти особенности метода АКАР позволяют наделить синтезируемые системы замечательным свойством *грубости* (робастности) переходных процессов к структурным вариациям и

параметрическим возмущениям. Известно, что асимптотическая устойчивость систем в определенной области фазового пространства является грубым свойством, которое усиливается в случае экспоненциальной устойчивости систем. Системы управления, синтезируемые по синергетическим принципам, являются как асимптотически устойчивыми в целом (т.е. во всей области фазового пространства), так и экспоненциально устойчивыми относительно вводимых инвариантных многообразий $\varphi_s = 0$. Это означает, что такие системы обладают отличительным свойством грубости (робастности) переходных процессов.

2. Система управления

Математическая модель двигателя постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением задается системой уравнений (2.1).

$$\begin{cases} U - C_e\omega = L\dfrac{di}{dt} + Ri \\ C_m i = J\dfrac{d\omega}{dt} + M_c(\omega) \end{cases} \qquad (2.1)$$

где U – напряжение (В); C_e – электрическая постоянная; L – индуктивность обмотки якоря (Гн); ω – угловая скорость вращения якоря (рад/с); R – сопротивление обмотки якоря (Ом); C_m – механическая постоянная двигателя; J – момент инерции якоря (кг·м^2); $M_c(\omega)$ – момент сопротивления.

Момент сопротивления на валу двигателя $M_c(\omega)$ в нашем случае определяется так:

$$M_c(\omega) = r(m\frac{dV}{dt} + h_{аэр}V^2 + f_{т.к.}) \qquad (2.2)$$

где r – радиус колеса (м), m – масса кузова (кг), $h_{аэр}$ – удельное аэродинамическое сопротивление, V – скорость поступательного движения электровоза(м/с) , $f_{т.к.}$ – сила трения качения. Величина силы трения качения не зависит от скорости движения поезда и определяется как $f_{т.к.}$ = $\mu_{кач}$P, где $\mu_{кач}$ – коэффициент трения качения, для пары “колесо-рельс” примерно равен 0,001, P – вес электровоза:

$$f_{т.к.} = 0{,}001 \cdot 135000 \cdot 9.81 = 1323\ \text{кг} \cdot \text{м/с}^2$$

Таким образом, система уравнений принимает вид:

$$\begin{cases} U - C_e\omega = L\dfrac{di}{dt} + Ri \\ C_m i = J\dfrac{d\omega}{dt} + r(m\dfrac{dV}{dt} + h_{аэр}V^2 + f_{т.к.}) \end{cases} \qquad (2.3)$$

Пусть в нашей системе “колесо-рельс” отсутствует проскальзывание, тогда скорость поступательного движения определяется как V = ωr. Учитывая данное допущение произведем замену и раскроем скобки в системе (1.3).

$$\begin{cases} U - C_e\omega = L\dfrac{di}{dt} + Ri \\ C_m i = (J + r^2 m)\dfrac{d\omega}{dt} + r(r^2 h_{аэр}\omega^2 + f_{т.к.}) \end{cases} \quad (2.4)$$

В задаче синтеза системы управления применим основной метод синергетической теории управления – аналитическое конструирование агрегированных регуляторов (АКАР).

Для дальнейшего синтеза системы управления методом АКАР необходимо перейти от системы дифференциальных уравнений (2.4) к системе дифференциальных уравнений в форме Коши.

$$\begin{cases} \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{C_m}{J + r^2 m} i - \dfrac{r(r^2 h_{аэр}\omega^2 + f_{т.к.})}{J + r^2 m} \\ \dfrac{di}{dt} = \dfrac{U}{L} - \dfrac{C_e}{L}\omega - \dfrac{R}{L} i \end{cases} \quad (2.5)$$

Введем вместо переменных тока и частоты вращения якоря некоторые обобщенные координаты:

$$\begin{cases} x_1 = \omega \\ x_2 = i \end{cases} \quad (2.6)$$

Для удобства дальнейших преобразований обозначим константы в системе (2.5):

$$\frac{C_m}{J + r^2 m} = K_{11} \quad \frac{r}{J + r^2 m} = K_{12} \quad \frac{1}{L} = K_{21} \quad \frac{C_e}{L} = K_{22} \quad \frac{R}{L} = K_{23} \quad (2.7)$$

А также обозначим функцию:

$$f(x_1) = r^2 h_{аэр}\omega^2 + f_{т.к.} \quad (2.8)$$

Таким образом получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{dx_1}{dt} = K_{11}x_2 - K_{12} f(x_1) \\ \dfrac{dx_2}{dt} = K_{21}U - K_{22}x_1 - K_{23}x_2 \end{cases} \quad (2.9)$$

Введем дополнительные координаты (макропеременные) по следующему правилу:

$$\begin{cases} \Psi_1 = x_1 - x_{01} \Rightarrow 0 \\ \Psi_2 = x_2 - \varphi(x_1) \Rightarrow 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

где x_{01} – стационарное значение скорости вращения колеса.

В [5] указано, что для объектов второго порядка макропеременные (2.10) должны удовлетворять функциональным уравнениям (апериодическим законам):

$$\begin{cases} T_1 \dfrac{d\Psi_1}{dt} + \Psi_1 = 0 \\ T_2 \dfrac{d\Psi_2}{dt} + \Psi_2 = 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Из системы (2.10) следует:

$$\begin{cases} x_1 \Rightarrow x_{01} \\ x_2 \Rightarrow \varphi(x_1) \end{cases} \tag{2.12}$$

Подставим первое уравнение из (2.10) в первый закон из (2.11). Получим:

$$T_1 \frac{dx_1}{dt} + x_1 - x_{01} = 0 \tag{2.13}$$

Выражение $\frac{dx_1}{dt}$ известно из (2.9). Подставим его в (2.13).

$$T_1 K_{11} x_2 - T_1 K_{12} f(x_1) + (x_1 - x_{01}) = 0 \tag{2.14}$$

Учитывая закон управления (2.12) заменим x_2 на $\varphi(x_1)$

$$T_1 K_{11} \varphi(x_1) - T_1 K_{12} f(x_1) + (x_1 - x_{01}) = 0 \tag{2.15}$$

Выразим $\varphi(x_1)$ из полученного выражения

$$\varphi(x_1) = \frac{K_{12}}{K_{11}} f(x_1) - \frac{1}{T_1 K_{11}} (x_1 - x_{01}) \tag{2.16}$$

Подставим полученную функцию $\varphi(x_1)$ из (2.16) во второе уравнение из (2.10).

$$\Psi_2 = x_2 - \frac{K_{12}}{K_{11}} f(x_1) + \frac{(x_1 - x_{01})}{T_1 K_{11}} \tag{2.17}$$

Подставим полученную функцию (2.17) во второе уравнение из (2.11) и возьмем производные

$$T_2 \frac{dx_2}{dt} - T_2 \frac{K_{12}}{K_{11}} \frac{df(x_1)}{dt} + \frac{T_2}{T_1 K_{11}} \frac{dx_1}{dt} + x_2 - \frac{K_{12}}{K_{11}} f(x_1) + \frac{1}{T_1 K_{11}} (x_1 - x_{01}) = 0 \tag{2.18}$$

Найдем производную от $f(x_1)$.

$f(x_1) = r^2 h_{аэр.} x_1^2 + f_{т.к.}$. Пусть $r^2 = K$, тогда

$$\frac{df(x_1)}{dt} = 2Kh_{аэр}(K_{11} x_2 - K_{12} f(x_1)) = 2Kh_{аэр}(K_{11} x_2 - K_{12} K h_{аэр} x_1^2 - K_{12} f_{т.к.}) \tag{2.19}$$

Подставим $\frac{dx_1}{dt}$, $\frac{dx_2}{dt}$, $\frac{df(x_1)}{dt}$ и $f(x_1)$ в (2.18) и получим (2.20)

$$T_2(K_{21} U - K_{22} x_1 - K_{23} x_2) - T_2 \frac{K_{12}}{K_{11}} 2Kh_{аэр}(K_{11} x_2 - K_{12} K h_{аэр} x_1^2 - K_{12} f_{т.к.}) + \tag{2.20}$$

$$+ \frac{T_2}{T_1 K_{11}} (K_{11} x_2 - K_{12} K h_{аэр.} x_1^2 - K_{12} f_{т.к.}) + x_2 - \frac{K_{12}}{K_{11}} (K h_{аэр.} x_1^2 + f_{т.к.}) +$$

$$+ \frac{1}{T_1 K_{11}} (x_1 - x_{01}) = 0$$

Раскроем скобки в уравнении (2.20) и выразим управление U:

$$U = \frac{K_{22}}{K_{21}} x_1 + \frac{K_{23}}{K_{21}} x_2 + \frac{K_{12} 2Kh_{аэр}}{K_{11}K_{21}} (K_{11}x_2 - K_{12}Kh_{аэр}x_1^2 - K_{12} f_{т.к.}) - \quad (2.21)$$

$$- \frac{1}{T_1 K_{11} K_{21}} (K_{11}x_2 - K_{12}Kh_{аэр.}x_1^2 - K_{12} f_{т.к.}) - \frac{1}{T_2 K_{21}} x_2 +$$

$$+ \frac{K_{12}}{K_{11}T_2K_{21}} (Kh_{аэр.}x_1^2 + f_{т.к.}) - \frac{1}{T_1 K_{11} T_2 K_{21}} (x_1 - x_{01})$$

Уравнение (2.21) и есть искомое управление, которое получено методом АКАР.

3. Результаты численного моделирования

Исходные данные для осуществления моделирования в Matlab:

напряжение на коллекторе двигателя, В: U = 1500;

радиус колеса, м: r = 0,625;

удельное аэродинамическое сопротивление, кГс/тс: h = 9,89;

сила трения качения колеса, кгм/с^2: Ftk = 1323;

механическая постоянная двигателя: Cm = 21;

масса кузова, кг: m = 45000;

момент инерции якоря, кгм^2: J = 75;

сопротивление обмоток якоря постоянному току, Ом: R = 3,145;

индуктивность якоря, Гн: L = 0,072;

электрическая постоянная двигателя: Ce = 19,143.

3.1 Построение модели системы управления без применения метода АКАР в MATLAB/SIMULINK

Система уравнений (2.9) является исходной математической моделью системы управления до применения метода АКАР. Данную систему можно представить в виде следующей блок-схемы Simulink (рис. 3.1).

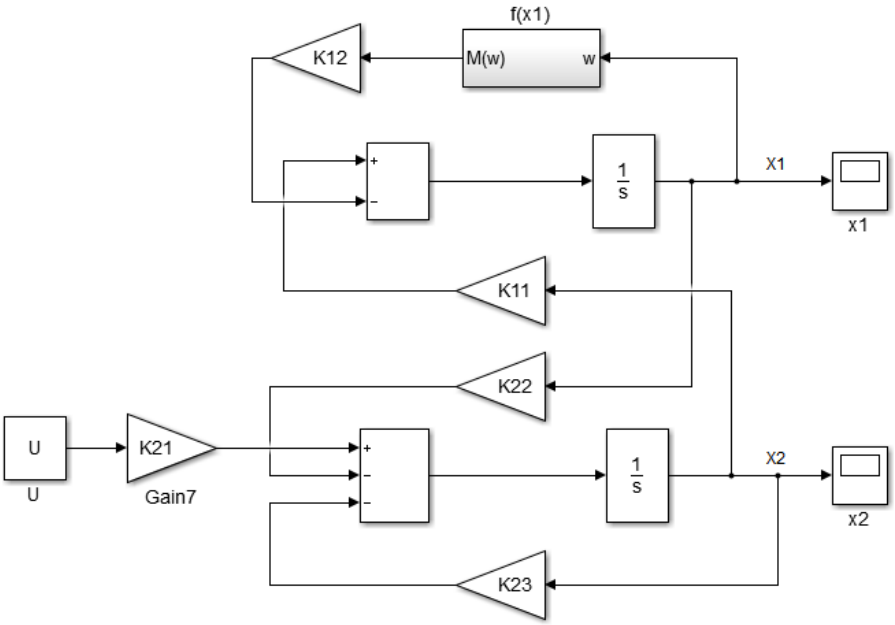


Рис. 3.1. Система управления без применения метода АКАР

Функция (2.8) в Simulink задается подсистемой «f(x1)» (рис 3.2).

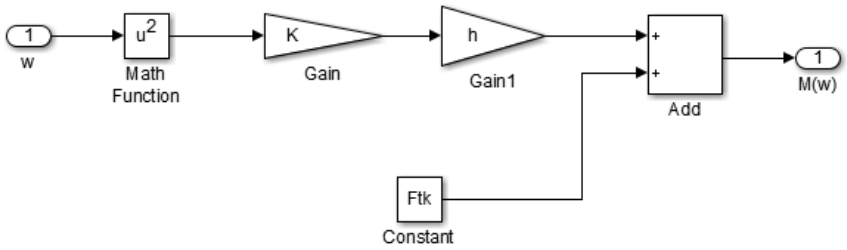


Рис. 3.2. Функция $f(x_1)$ (здесь $K = r^2$)

Произведем моделирование системы на рис.3.1 в Simulink. Зависимость угловой скорости вращения якоря x_1 от времени можно посмотреть после моделирования в блоке x_1 (рис. 3.3).

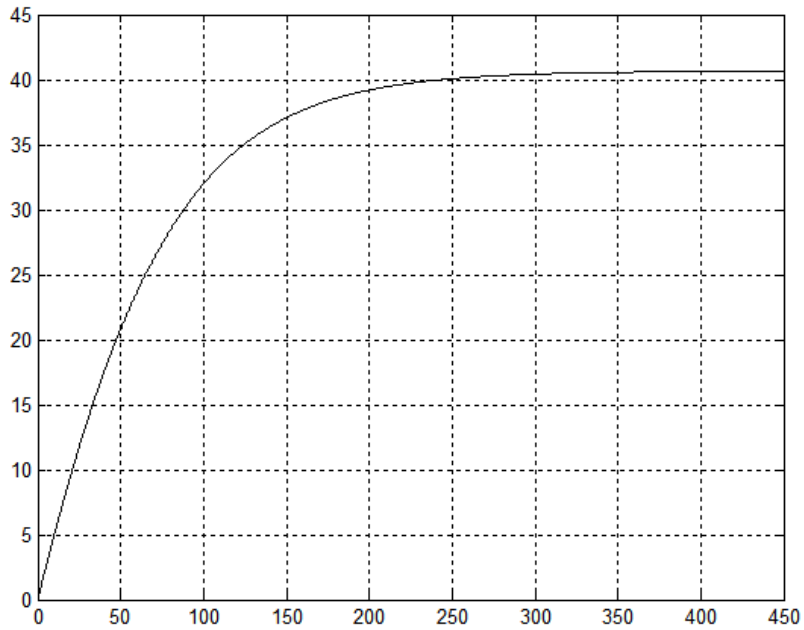


Рис. 3.3. Зависимость угловой скорости вращения якоря x_1 от времени

Как видно, время переходного процесса составляет примерно 360 секунд. Установившееся значение скорости вращения якоря двигателя составляет 40,6 рад/с, что соответствует скорости движения электровоза V = 91,35 км/ч. Зависимость тока якоря x_2 от времени показана на рис. 3.4.

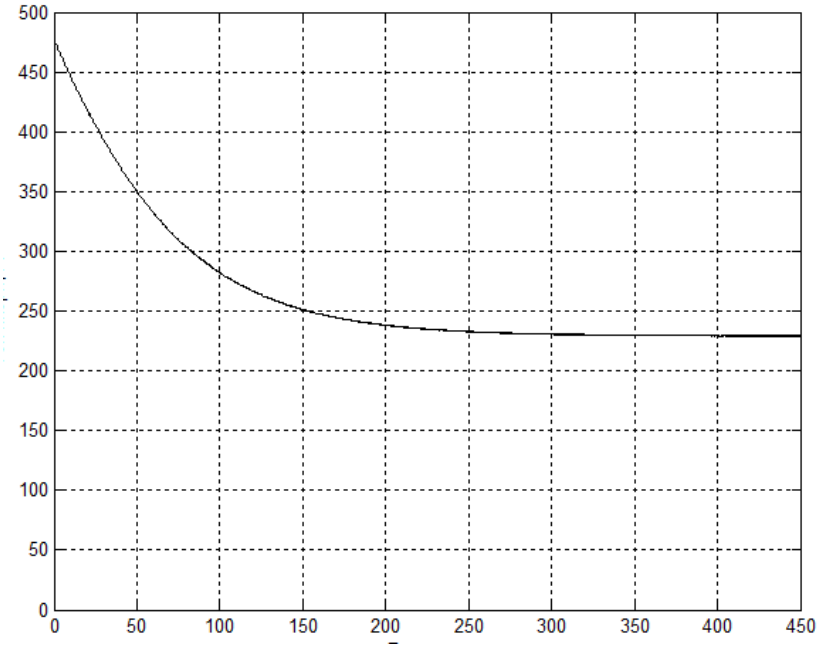


Рис. 3.4. Зависимость тока якоря x_2 от времени.

1.2 Построение модели системы управления с применением метода АКАР в MATLAB/SIMULINK

В разделе 2. с помощью метода АКАР получено управление (2.21), которое должно «навязывать» изменение координат x_1 и x_2. Применение метода АКАР в задаче синтеза системы управления должно привести к улучшению быстродействия нашей системы т.е. время переходного процесса должно сократится.

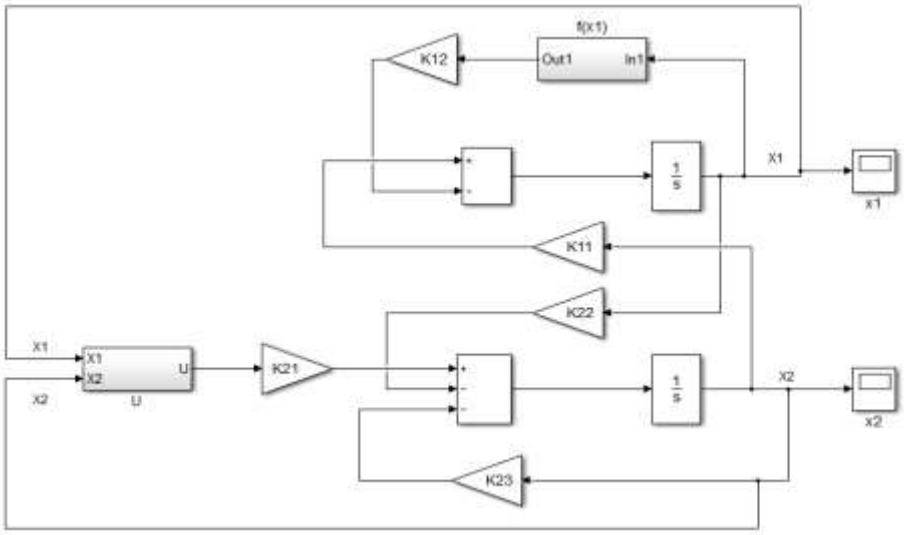


Рис. 3.5. Система управления в Simulink, синтезированная по методу АКАР

Произведем замену блока U в схеме исходной системы управления, изображенной на рис 3.1 на построенную схему функции управления (рис.3.6) и соединим входы x_1 и x_2. Получим Simulink-модель системы управления приводом синтезированной по методу АКАР (рис. 3.5).

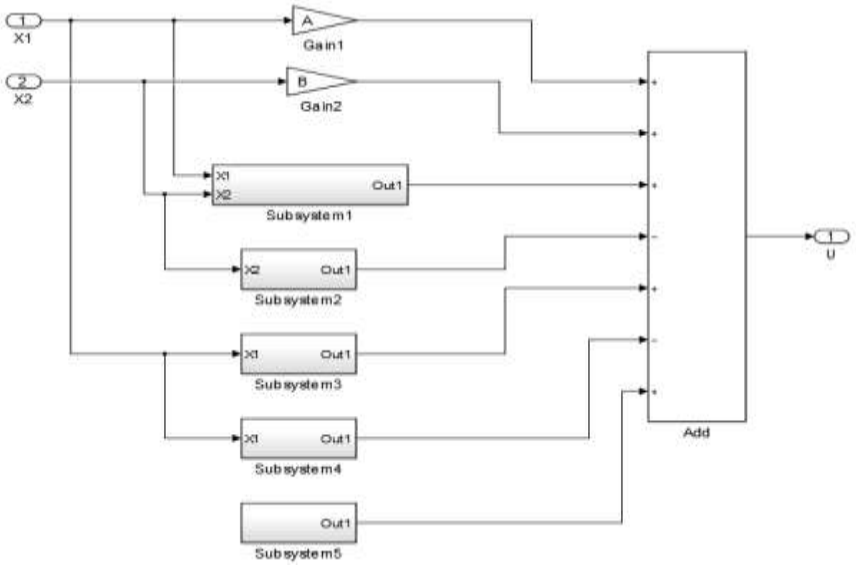


Рис. 3.6. Управление U

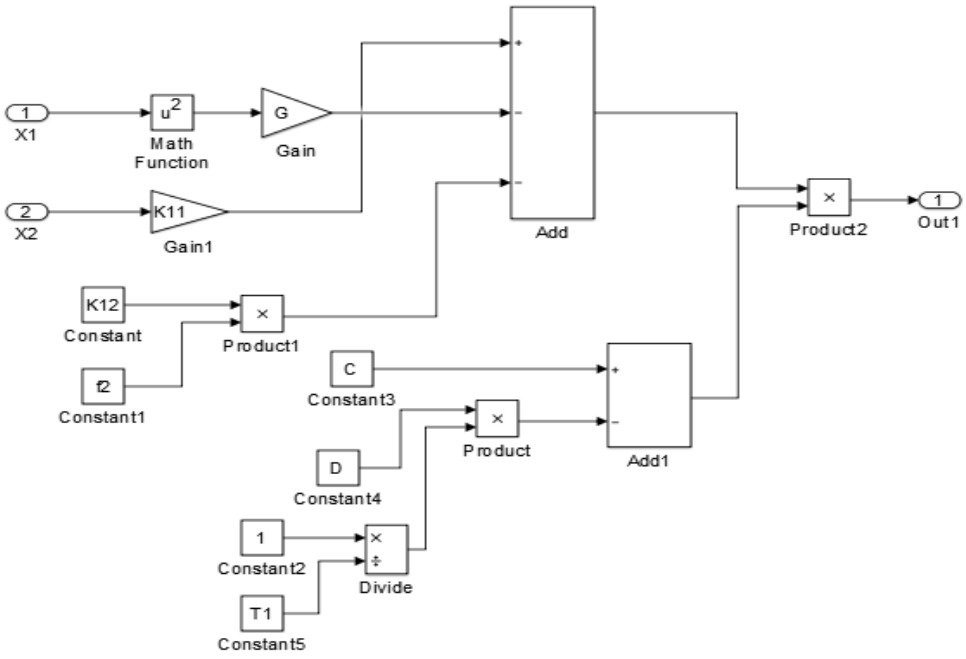


Рис.3.7. Блок Subsystem1.

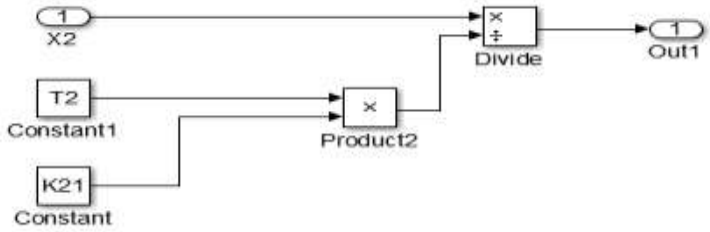


Рис. 3.8. Блок Subsystem2.

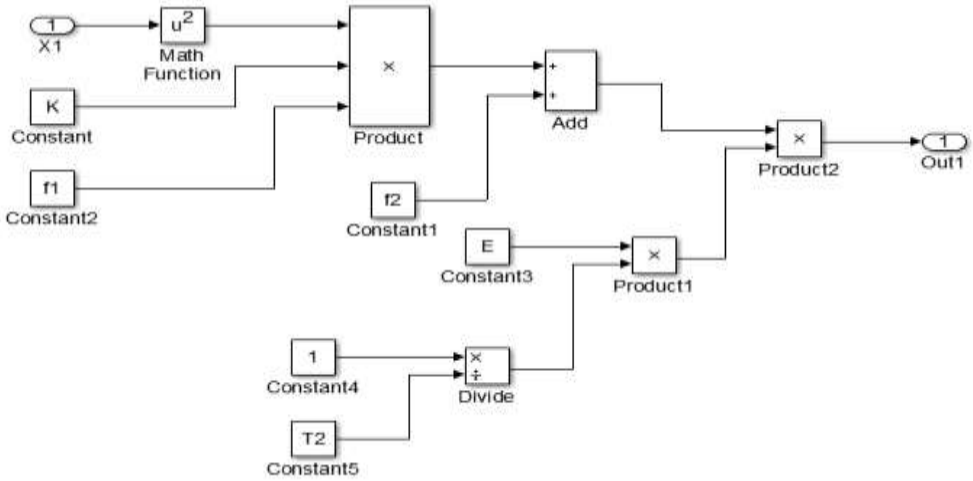


Рис. 3.9. Блок Subsystem3.

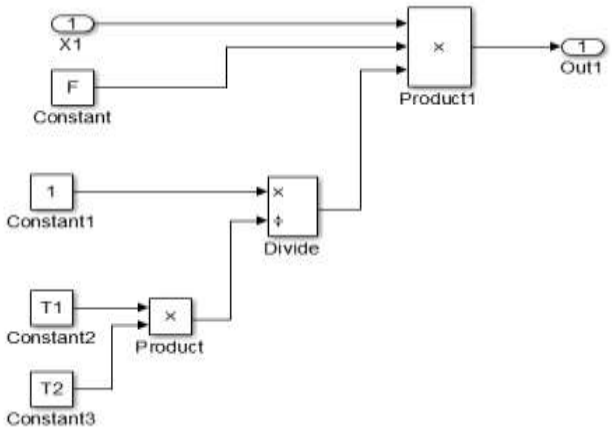


Рис. 3.10. Блок Subsystem4.

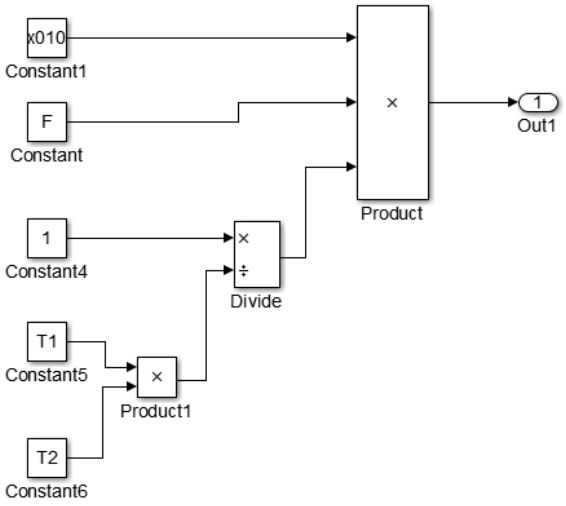


Рис. 3.11. Блок Subsystem5.

Все данные для проведения моделирования известны. Постоянные времени T_1 и T_2 следует варьировать от 0 до 1.

Произведем моделирование системы на рис. 3.6 в Simulink при T_1 = 0,5 и T_2 = 0,65. Зависимость угловой скорости вращения якоря ДПТ x_1 от времени можно посмотреть после моделирования в блоке x_1.

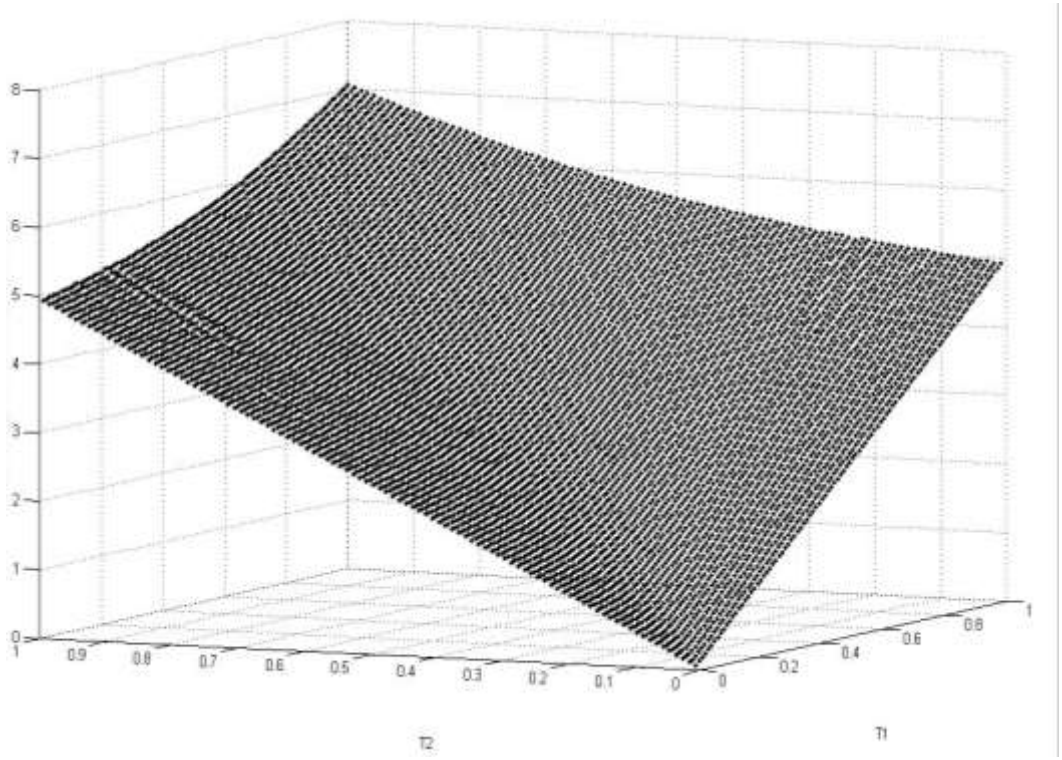


Рис. 3.12. График зависимости времени переходного процесса от постоянных времени T_1 и T_2.

По графикам переходных процессов можно оценить быстродействие системы. Время переходного процесса в зависимости от величины постоянных времени T_1 и T_2 изменяется от 1 до 7 секунд. Учитывая, что время переходного процесса до применения метода АКАР составляло 360

секунд можно сделать вывод о том, что использование метода АКАР позволило, без потери устойчивости, увеличить быстродействие системы, в зависимости от параметров T_1 и T_2 в 50-360 раз.

Построим трехмерный график зависимости времени переходного процесса от постоянных времени T_1 и T_2. По графику изображенному на рис 3.12 видно, что время переходного процесса тем меньше, чем меньше постоянные времени T_1 и T_2.

Заключение

В работе решена задача синтеза системы управления приводом, обеспечивающим поступательное движение электровоза ЭП2К методом АКАР. Проведен анализ динамики системы управления как до введения синтезированного закона управления, так и после. Результаты численного моделирования позволяют сделать следующие выводы:

- при значениях величин постоянных времени T_1=0.25 и T_2=0.3 быстродействие системы повысилось в 144 раза,
- при значениях T_1=0.1и T_2=0.1быстродействие системы повысилось в 360 раз,
- при значениях T_1=0.5и T_2=0.65быстродействие системы повысилось в 72 раза,
- при значениях T_1=0.8и T_2=0.4быстродействие системы повысилось в 60 раз,
- при значениях T_1=0.5и T_2=0.01быстродействие системы повысилось в 120 раз,
- при всех приведенных испытаниях качество регулирования не ухудшилось.

Библиографический список

1. В.В. Шаповалов, А.А. Зарифьян, А.Л. Озябкин, И.В. Колесников, А.В. Челохьян, А.М. Лубягов Транспортная триботехника Т.3. Динамический мониторинг мобильных фрикционных систем: Ростов н/Д: Издательство РГУПС, 2010. – 421 с.

2. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение. 1967. 359 с.

3. Кудинов В.А. колебания в станках//Вибрации в технике: Справочник: В 6 т./ Под редакцией Ф.М. Диментберга, К.С. Колесникова. М.,1980 Т.3. с.118-130.

4. Кудинов В.А., Лисицын Н.М. Основные факторы, влияющие на равномерность перемещения столов и суппортов станков при смешанном трении// Станки и инструмент. 1962.№2 с.1-5.

5. А.А. Колесников Современная прикладная теория управления : синергетический подход в теории управления. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. - Ч. 2. 68 с.

6. В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров, М.И. Озеров Теория электрической тяги: М.: Транспорт, 1995. - 294 с.

7. Г.С. Гура. Качение тел с трением. Фретинг: Сочи: Дория, 2009.-294 с.

Моделирование динамических процессов в системе рекуперативной вентиляции с реверсированием потока

Лукьянов А.Д., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, lex1998@rambler.ru,

Павлов П.П., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, pppavlov@bk.ru

Аннотация. В проекте представлены результаты компьютерного моделирования системы рекуперативной вентиляции, обеспечивающей массообмен воздуха, но препятствующей теплообмену с внешней средой. Рассмотрен варианты построения системы с традиционным теплообменником. Методами имитационного моделирования исследованы модели замкнутой и разомкнутой системы вентиляции. Получены зависимости эффективности работы системы от времени цикла реверсирования. Получена оценка достижимой эффективности системы по критерию энергосбережения.

Ключевые слова: вентиляция, рекуперация тепла, управление, реверсирование, моделирование, теплообмен, энергосбережение.

Abstract. The results of computer simulation of recuperative ventilation system that provides mass transfer of air, but prevent heat exchange with the environment were presented in the paper. The system with a conventional heat exchanger was considered. The model of ventilation system with open and closed control loop were studied by the imitation modeling. The dependence of the efficiency of the system by the duration of reversing cycle was got. Also the estimate of the achievable efficiency of the system by the criterion of energy saving was calculated.

Keywords: ventilation, heat recovery, control, reversal, modeling, heat transfer, energy saving

Введение

Учитывая актуальность задачи энергосбережения при отоплении и вентиляции зданий, а также существование ряда конкурирующих разработок систем вентиляции, предназначенных для снижения потерь тепла и работающих на принципе рекуперации, задача их моделирования с целью оптимизации конструкции и режимов работы представляется актуальной и практически значимой.

Описание существующих устройств можно найти в [1, 2, 3]. В [4] приведена сравнительная таблица выпускаемых промышленных образцов, которую можно дополнить информацией о достоинствах и недостатках систем с разным принципом реализации теплообмена. Заявленная эффективность рекуператора лежит в пределах от 70 до 96%, в зависимости от его конструкции. В [5] приведены некоторые соображения и представлена упрощенная модель системы рекуперативной вентиляции с реверсированием потока. В научной литературе вопросы моделирования теплообмена

обсуждаются достаточно активно: [8 – 13], что подтверждает актуальность заявленной тематики исследования.

1. Цели и задачи проекта

Целью работы является совершенствование и повышение энергетической эффективности конструкции рекуперативной вентиляции с реверсированием потока.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие задачи:

- построена математическая модель системы рекуперативной вентиляции, позволяющая анализировать величину теплопотерь в вентилируемой системе;
- исследовано влияние длительности цикла рекуперации на энергоэффективность системы.
- обобщены полученные результаты.

2. Построение математической модели системы энергоэффективной вентиляции

В развитие [5] разрабатываемая математическая модель должна позволять моделировать теплообменники с различными геометрическими параметрами и физическими характеристиками, включая различное соотношение объем/поверхность теплообмена, эффект фазового перехода в теплообменнике и анизотропию коэффициента теплопередачи. Кроме этого, модель должна позволять определять температуру воздуха, прошедшего через теплообменник.

Схема моделируемой тепловой системы представлена на рис. 1 [5]. Она включает в себя комнату с воздухом (описываемую параметрами температуры, объема и плотности), нагреватель мощностью P, два блока рекуперативной реверсивной вентиляции с производительностью $G_в$ и внешнюю среду с температурой воздуха $Q_{вн}$.

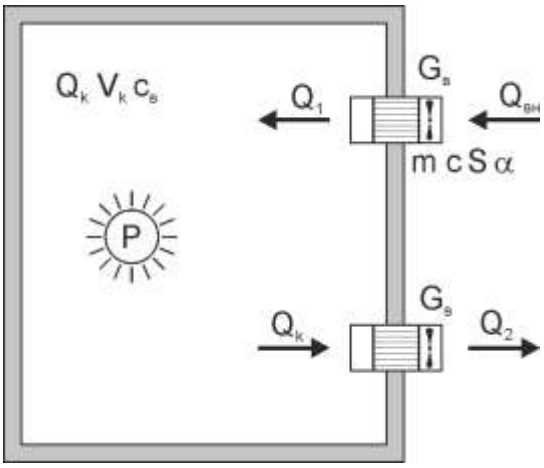


Рис. 1. Схема моделирования теплообмена

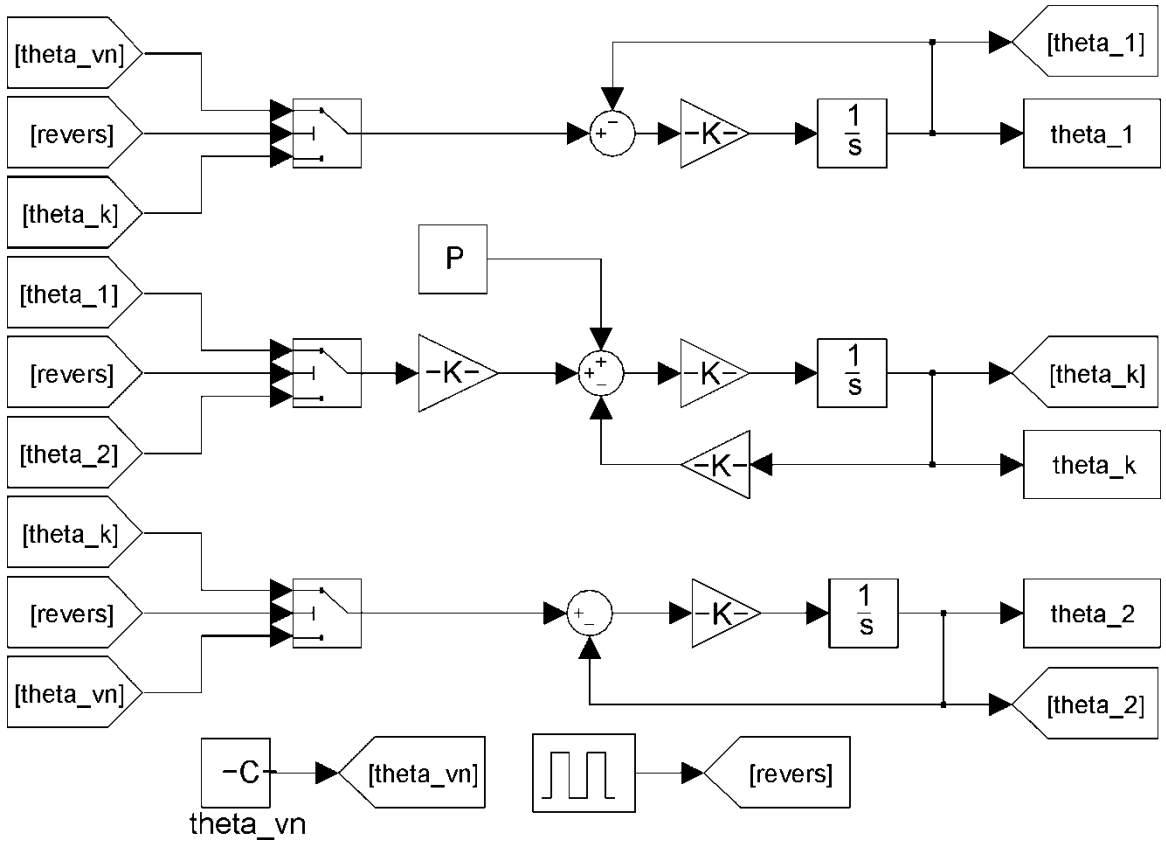
Процесс теплообмена при прямом движении воздуха описывается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_k = \left[P + G_в c_в \left(\theta_1 - \theta_k \right) \right] / V_k \rho_в c_в \\ \dot{\theta}_1 = \left[S \left(\alpha_0 + \alpha_v v \right) \left(\theta_{вн} - \theta_1 \right) \right] / mc \\ \dot{\theta}_2 = \left[S \left(\alpha_0 + \alpha_v v \right) \left(\theta_k - \theta_2 \right) \right] / mc \end{cases}$$

Процесс теплообмена при реверсном направлении движения воздуха описывается (в отличие от (1)) следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_k = \left[P + G_в c_в \left(\theta_2 - \theta_k \right) \right] / V_k \rho_в c_в \\ \dot{\theta}_1 = \left[S \left(\alpha_0 + \alpha_v v \right) \left(\theta_k - \theta_1 \right) \right] / mc \\ \dot{\theta}_2 = \left[S \left(\alpha_0 + \alpha_v v \right) \left(\theta_{вн} - \theta_2 \right) \right] / mc \end{cases}$$

Объединенная модель включающая в себя системы и (1) и (2) приведена на рис. 2. Параметры модели приведены [5] сформированы по материалам [7].



ис. 2 Температура воздуха в комнате и температуры теплообменников приточного и вытяжног каналов

3. Имитационное моделирование процесса работы рекуперативной вентиляции.

На рис. 3 приведен пример результата моделирования, при котором реверсирование потоков осуществлялось каждые 30 минут. На графике температуры в комнате θ_k видно, что в результате

рекуперации энергии выходящего воздуха температура в комнате повышается до 308 К, а не понижается до 273 К, как в случае с однонаправленной вентиляцией. При этом следует учитывать, что предложенная модель (1) – (2) с сосредоточенными параметрами достаточно приближенна, и описывает процесс теплообмена только качественно.

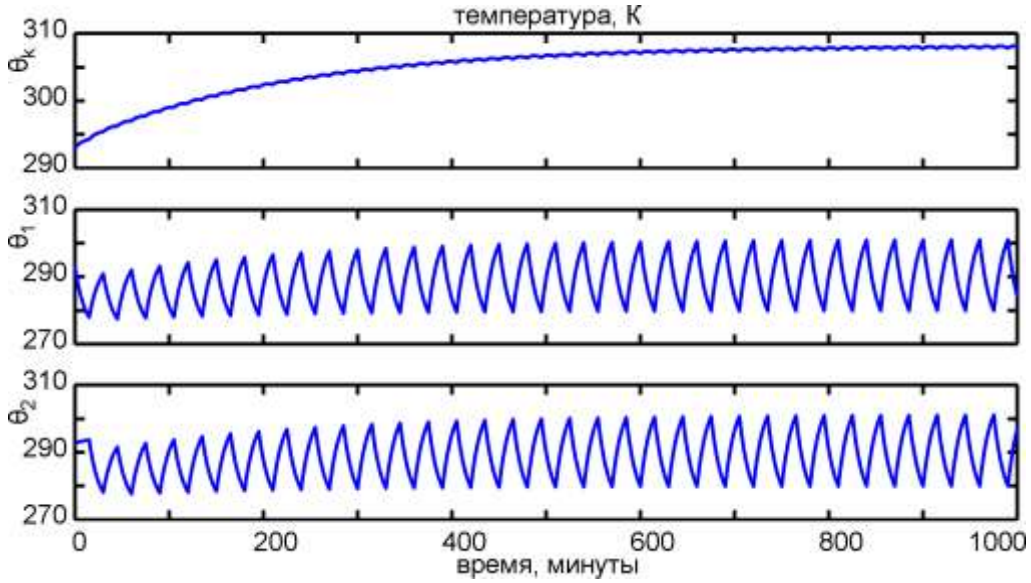


Рис. 3 Температура воздуха в комнате и температуры теплообменников приточного и вытяжного каналов при реверсировании направления каждые 30 минут

На рис. 4 показана зависимость температуры в комнате при включенном обогревателе мощностью 200 Вт и работе рекуперативного вентилятора с различной длительностью цикла рекуперации. Результат получен с помощью модели на рис. 2 многократным запуском для различной длительности цикла и усреднением температуры в комнате.

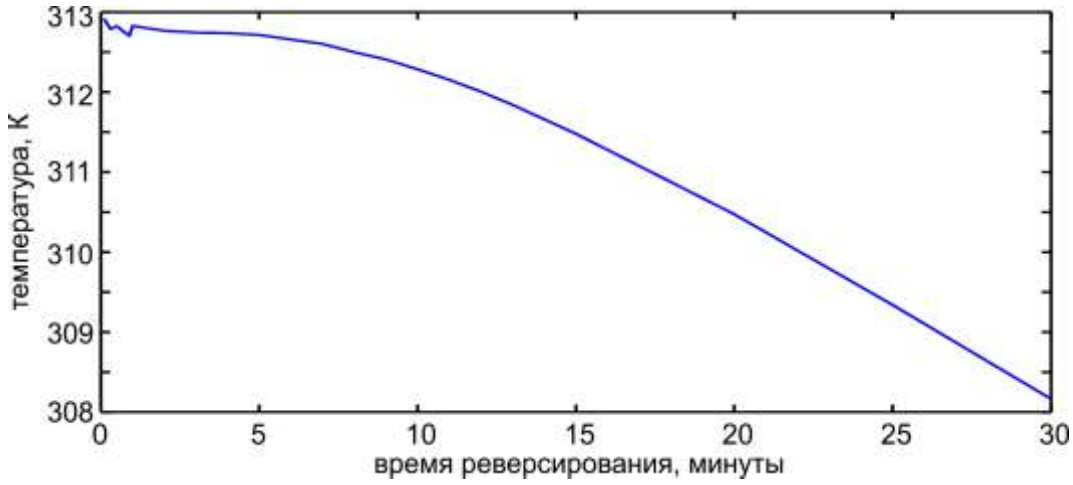


Рис. 4 Установившаяся температура в комнате θ_k в зависимости от длительности цикла реверсирования

Общая тенденция понятна: чем более длительный цикл реверсирования, тем больше тепла теряется. Однако для оценки энергосберегающей эффективности системы вентиляции модель (1), (2) была замкнута в систему управления с пропорциональным регулятором, и для получившейся системы была оценена мощность, необходимая для поддержания в помещении температуры 20°C

(~273 K). Полученная зависимость необходимой мощности от длительности цикла реверсирования приведена на рис. 5.

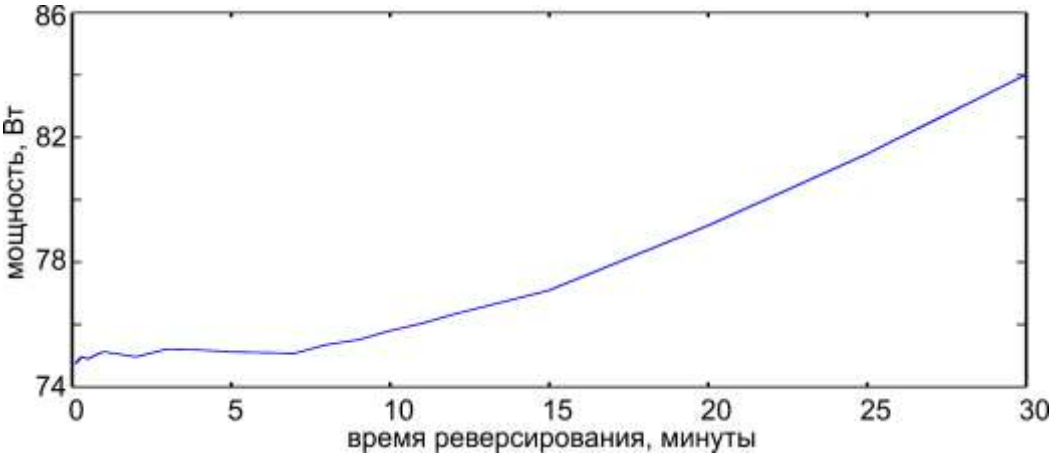


Рис. 5Мощность обогревателя, необходимая для поддержания постоянной температуры θ_k = 20°C в зависимости от длительности цикла реверсирования.

Полученная тенденция подтверждает результат на рис. 4. Учитывая, что мощность обогревателя для расчетов на рис. 4 составляла 200 Вт, рекуперативная вентиляция обеспечивает существенное энергосбережение, в пределах 58-62%.

Заключение

В ходе исследования построена математическая модель разомкнутой и замкнутой системы рекуперативной вентиляции помещения.

Результаты оценочного имитационного моделирования позволили показать наличие эффекта энергосбережения за счет рекуперации тепла при реверсивном вентилировании.

Для точной количественной оценки степени энергосбережения необходимо построить и идентифицировать более точную модель процесса теплообмена.

Библиографический список

1. И.А. Огородников, О.Н. Макарова, Е.С. Дубынина. Экодом в Сибири. Обзор литературы, оригинальные разработки, рекомендации специалистов. - Исар-Сибирь, Новосибирск, 2000. Электронное издание. *http://www.seu.ru/programs/ecodom/book/index.htm*[электронный ресурс](обращение 01.11.2015)

2. С. Варламов. Потери тепла зданиями. Электронное издание. http://internat.msu.ru/wp-content/uploads/ Потери-тепла-зданиями.pdf [электронный ресурс](обращение 01.11.2015)

3. Система приточно-вытяжной вентиляции с рекуперацией тепла. *http://td-termobar.ru/rekuperator*[электронный ресурс](обращение 01.11.2015)

4. Еремкин А.И., Королева Т.И. Тепловой режим зданий: учебное пособие. – М.: Издательство АСВ, 2000- 368 с.

5. Павлов П.П. Локальная энергосберегающая систем приточно – вытяжной рекуперативной вентиляции с реверсированием потока. // Юбилейная конференция студентов и молодых ученых, посвященная 85-летию ДГТУ. [Электронный ресурс]: сборник докладов научно-технической конференции (Ростов-на-Дону, 12-13 мая 2015 г.) / ДГТУ; под ред. А.Д. Лукьянова — Ростов н/Д: ДГТУ, 2015. Стр. 215-229.

6. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем. Учебник для вузов. Изд.: Мн.: Дизайн-ПРО, 2004. — 640 с.

7. Кухлинг Х. Справочник по физике. Пер. с нем. - М.: Мир, 1982.

8. Dalibor Z. Stevic. Mathematical modeling of the recuperative heat exchangers - the comparative analysis and geometric optimization. International journal of information and systems sciences. Institute for Scientific Computing and Information. V. 6, # 4, pp. 435–455

9. Rao Yu*, Wan Chaoyi, Zang Shusheng. Transitional Flow and Heat Transfer Characteristics in a Rectangular Duct with Stagger-arrayed Short Pin Fins. Chinese Journal of Aeronautics 22(2009) 237-242

10. Sun, Y., Jasper, W.J. Numerical modeling of heat and moisture transfer in a wearable convective cooling system for human comfort. Building and Environment. Vol 93, Iss. P2, 2015, Pages 50-62

11. Hoyt, T., Kwang, H.L., Zhang, H., Arens, E., Webster, T. Energy savings from extended air temperature setpoints and reductions in room air mixing. International Conference on Environmental Ergonomics August 2-7, 2009

12. Bühler, M., Popa, A.M., Scherer, L.J. Heat protection by different phase change materials Applied Thermal Engineering. Volume 54, Issue 2, 2013, Pages 359-364

13. Neves, S.F. ab, Couto, S.c, Campos, J.B.L. M.b, Mayor, T.S.bd. Advances in the optimization of apparel heating products: A numerical approach to study heat transport through a blanket with an embedded smart heating system Applied Thermal Engineering. Volume 87, 10 June 2015, Pages 491-498

Особенности моделирования динамики температурно - деформационных процессов при 3d-печати корпусных деталей из термопластичных пластиков

Дмитренко А.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, dmitrenkoaa@gmail.com

Лукьянов А.Д., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, lex1998@rambler.ru

Аннотация. Рассмотрен вопрос особенностей моделирования динамики процесса 3D печати тонкостенных (не заполняемых материалом) объектов, изготавливаемых из материалов с высокими коэффициентами температурного расширения. Получены оценки температурных деформаций с использованием метода конечных элементов. Показана необходимости использования аппроксимированных результатов повторяемых расчетов для учета динамически изменяющейся геометрии печатаемого объекта, влияющей на температурный и деформационный профили.

Ключевые слова: 3D печать, температурная деформация, моделирование, метод конечных элементов,

Abstract. The problem of modeling the characteristics of the dynamics of 3D printing of thin (do not filled) objects made of materials with high coefficients of thermal expansion was considered. Estimations of temperature deformations using the finite element method are obtained. The need to approximate the results of the repeated use of accounts to accommodate dynamically changing geometry of the printed object, affecting the temperature and deformation profiles is shown.

Keywords: 3D printing, thermal deformation, modeling, finite element method,

Введение

Использование бюджетных 3D принтеров и доступных материалов для 3D печати является одной из ведущих тенденций изготовления макетов и малых серий продукции. Технология 3Dпечати в настоящее время переходит из области хобби и увлечения отдельных энтузиастов в область бытового и промышленного применения. Все это приводит к расширению ассортимента изготавливаемых образцов и, как следствие – к выявлению ряда проблем, возникающих при печати заготовок определенной формы и/или влияющих на качество печатаемых изделий.

Как показала практика, одной из самых распространенных, и , в то же время самых сложных для устранения является проблема температурной деформации изделия в процессе печати, приводящая зачастую к неустранимому браку.

Проблема температурных деформаций при 3Dпечати

При печати тонкостенных корпусных (не заполняемых материалом) объектов или объектов, размер которых по одной из осей значительно меньше размеров по двум другим осям (отдельные плоские детали корпуса), возникают деформационные процессы, связанные температурной динамикой печатаемого объекта. Наибольшие деформации возникают при печати материалами с

достаточно большим значением коэффициента температурного расширения, к которым относятся наиболее часто используемые при бюджетной 3Dпечати термопластичные пластики, в частности АБС-пластик.

Коэфф. линейного термического расширения (23 - 55 °С), 1/ °С	(0.5 - 1.1) x 10^{-4}
Коэффициент теплопроводности (23 °С), Вт/(м·°С)	0.2

Рис. 1 Выдержка из таблицы температурных коэффициентов для ABS пластика

К примеру, для АБС-пластика, производители не рекомендуют печать объектов, линейными размерами превышающих 100 мм (модель куба).

В совокупности, высокое значение коэффициента температурного расширения и связанное с ним малое значение коэффициента теплопроводности приводят к возникновению значительных напряжений по мере прохождения процесса печати и перераспределения температур.

Рис.2 Пример деформации края заготовки

Сам процесс 3Dпечати обуславливает неравномерную динамику распределения температурного поля. Условно, динамику процесса распределения температур в печатаемом объекте можно представить, как последовательное добавление высокотемпературных слоев в плоскости печати вдоль одной из осей (как правило ось Y). При этом, поскольку скорость печати незначительна, каждый предыдущий слой успевает претерпеть температурное сжатие при остывании. Что приводит к возникновению направленных к центру заготовки напряжений, усиливающихся с каждым слоем.

Дополнительную сложность вносит прогрев подложки печатаемого объекта с целью увеличения адгезии со столом принтера и препятствию срыва объекта.

Таким образом имеется два источника нагрева, при сложной динамике изменения геометрии самого объекта нагрева.

Оценка температурных деформаций методом конечноэлементного моделирования

Оценка динамического распределения температурного поля является приоритетной задачей для компенсации возможных погрешностей при печати и предотвращению напряжений в объекте, приводящих к деформации в процессе печати.

Наилучшими показателями эффективности для моделирования подобного процесса обладает численный анализ методом конечных элементов твердотельного объекта.

Метод конечных элементов является численным методом решения дифференциальных уравнений.

Основная идея метода конечных элементов состоит в том, что любую непрерывную величину, такую, как температура, можно аппроксимировать дискретной моделью, которая строится на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. Кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемой области.

В общем случае непрерывная величина заранее неизвестна и нужно определить значения этой величины в некоторых внутренних точках области. Дискретную модель, однако, очень легко построить, если сначала предположить, что числовые значения этой величины в каждой внутренней точке области известны. После этого можно перейти к общему случаю.

При построении дискретной модели выполняются следующие шаги:

1. В рассматриваемой области фиксируется конечное число точек. Эти точки называются узловыми точками или просто узлами.

2. Значение непрерывной величины в каждой узловой точке считается переменной, которая должна быть определена.

3. Область определения непрерывной величины разбивается наконечное число подобластей, называемых элементами. Эти элементы имеют общие узловые точки и в совокупности аппроксимируют форму области.

4. Непрерывная величина аппроксимируется на каждом элементе полиномом, который определяется с помощью узловых значений этой величины. Для каждого элемента определяется свой полином, но полиномы подбираются таким образом, чтобы сохранялась непрерывность величины вдоль границ элемента.

5. Рассматривается непрерывная величина T(x), область определения – отрезок вдоль оси x. Значения T(x) в данном случае известны в каждой узловой точке. Эти фиксированные значения обозначены в соответствии с номерами узловых точек черезT_1, T_2…T_n.

В общем случае распределение температуры неизвестно и требуется определить значения этой величины в некоторых точках. Методика построения дискретной модели остается точно такой же, как описано выше, но с добавлением одного дополнительного шага. Снова определяются

множество узлов и значения температуры в этих узлах $T_1, T_2 \ldots T_n$, которые теперь являются переменными, так как они заранее неизвестны. Область разбивается на элементы, на каждом из которых определяется соответствующая функция элемента.

Узловые значения T(x) должны быть теперь «отрегулированы» таким образом, чтобы обеспечивалось «наилучшее» приближение к истинному распределению температуры. Это «регулирование» осуществляется путем минимизации некоторой величины, в частности, в задаче распространения тепла, минимизируется функционал, связанный с соответствующим дифференциальным уравнением. Процесс минимизации сводится к решению систем линейных алгебраических уравнений относительно узловых значений T(x).

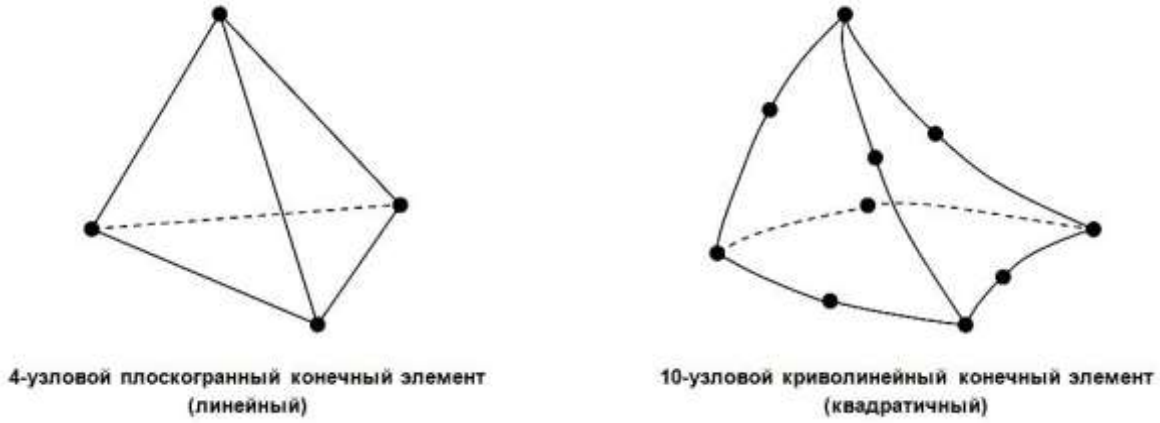


Рис. 3 Примеры наиболее часто используемых объемных конечных элементов.

Затем, значения вычисленного температурного поля, пользуясь тем же методом конечных элементов, при подстановке в соответствующие уравнения, используются для расчета непосредственно деформаций объекта.

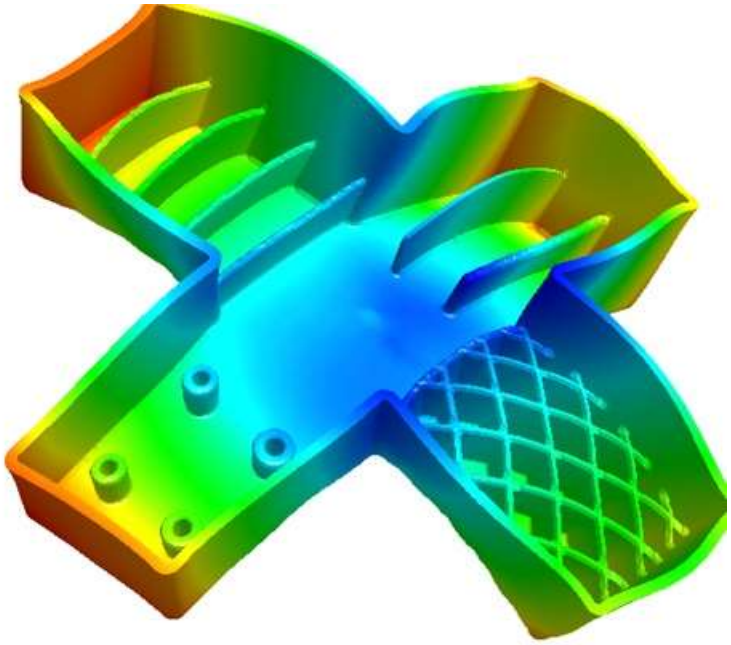


Рис. 4 Пример визуализации расчета деформации объекта печати.

Однако, так как геометрия объекта в процессе печати постоянно претерпевает изменения, единичного расчета, как в примере вышел, для моделирования процесса оказывается недостаточно. Требуется аппроксимированная серия расчетов, учитывающая динамику изменения объекта, считая, что температурные воздействия остаются неизменными, но температурное поле меняется. Также изменяющаяся во времени (и зачастую усложняющаяся) геометрия приводит к изменению профиля деформации объекта, даже если бы была возможность считать нагрузки, связанные с разницей температур, статическими.

Все вышеперечисленное приводит к заметному усложнению поставленной задачи и необходимости моделирования самой динамики печати объекта с повторением расчетов для каждой стадии изменения геометрии с учетом выбранной аппроксимации (выбор толщины слоя или отдельное добавление участков материала, значительно меняющих температурный и деформационный профиль объекта).

Выводы

В работе рассмотрен вопрос особенностей моделирования динамики процесса 3D печати тонкостенных (не заполняемых материалом) объектов, изготавливаемых из материалов с высокими коэффициентами температурного расширения.

Получены оценки температурных деформаций с использованием метода конечных элементов.

Показана необходимости использования аппроксимированных результатов повторяемых расчетов для учета динамически изменяющейся геометрии печатаемого объекта, влияющей на температурный и деформационный профили.

Библиографический список

1. «Справочник по литьевым термопластичным материалам.» И.А. Барвинский, И.Е. Барвинская 2001 г.

2. Присекин В.Л., Расторгуев Г.И. «Основы метода конечных элементов в механике деформируемых тел». Учебник / Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. - 238 с. (серия «Учебники НГТУ»)

3. «Low-cost 3D Printinag for Science Education and Sustainable Development» by Enrique Canessa (Editor), Carlo Fonda (Editor), Marco Zennaro (Editor). Published 2013 by The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics (ICTP)

УДК 621.924.093

Исследования основных технологических параметров процесса гидроабразивной обработки

Тихонов Ан.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,

Тихонов А.А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,
tikhonov.aleksandr.47@mail.ru

Семенченко И.Ю., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. В статье представлено теоретическое моделирование процесса единичного взаимодействия частиц абразива с поверхностью обрабатываемой детали при гидроабразивной обработке. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров на изменение среднего арифметического отклонения профиля шероховатости поверхности и удельного съема металла образцов.

Ключевые слова: гидроабразивная обработка, единичное взаимодействие, съем металла.

Annotation. The article presents a theoretical modeling of process of a single interaction abrasive particles to the surface of the workpiece during waterjet machining. It presents the results of experimental research of the influence of technological parameters to change the arithmetic average deviation contour of surface roughness and specific metal removal of samples.

Keywords: water jet machining, single interaction, removal of metal.

Процесс скругления острых кромок, шлифования сложных поверхностей, подготовки поверхности под покрытие, снижение шероховатости поверхности обеспечивается методом струйной гидроабразивной обработки.

При исследовании основных технологических параметров обработки свободными абразивами одним из важнейших является вопрос теоретического моделирования процесса единичного взаимодействия частиц абразива с поверхностью обрабатываемой детали.

Е. Ф. Непомнящий [1] получил зависимость для определения объема металла, удаленного за один удар абразивной частицы:

$$V = 15,5 \cdot R^3 \left(K_T \cdot \sin\alpha \sqrt{\frac{2P_{дин} \cdot \rho_ч}{3 \cdot c \cdot \sigma_s \cdot \rho_{см}}} \right)^{\frac{5}{2}} \left(ctg\alpha - f \right) \qquad (1)$$

И зависимость съема металла за один удар абразивной частицы

$$q = 15,5 k_c \cdot R^3 \left(K_T \cdot \sin\alpha \sqrt{\frac{2P_{дин} \cdot \rho_ч}{3 \cdot c \cdot \sigma_s \cdot \rho_{см}}} \right)^{\frac{5}{2}} \left(ctg\alpha - f \right) \rho_д , \qquad (2)$$

где $\rho_д$ - плотность материала детали.

Общее количество взаимодействий на площади квадрата упаковки (в случае упаковки абразивных частиц на поверхности детали по квадрату, со стороной равной диаметру описанной окружности), приводящих к микрорезанию, можно определить следующим образом:

$$n_p = P_1 P_2 t \qquad (3)$$

где P_1 - геометрическая вероятность события, заключающегося в том, что любая точка квадрата упаковки покрывается пятном контакта за единицу времени воздействия массы абразивных частиц;

P_2 - вероятность события, заключающегося в том, что взаимодействие абразивной частицы с поверхностью детали приведет к микрорезанию;

t - время обработки.

В обычном случае, когда площадь поверхности детали больше квадрата упаковки, общее число взаимодействий, приводящих к микрорезанию:

$$N_p = n_p \frac{S_{дет}}{S_{кв.уп.}}, \qquad (4)$$

где $S_{дет}$ - площадь поверхности детали;

$S_{кв.уп.}$ - площадь квадрата упаковки.

Приняв $S_{кв.уп.} = 4R^2$, получим:

$$N_p = P_1 P_2 t \frac{S_{дет}}{4R^2} \qquad (5)$$

Разрушение поверхностного слоя при обработке свободными абразивами происходит преимущественно путем микрорезания. Следовательно, при расчете съема металла достаточно учитывать только число взаимодействий N_p, приводящих к микрорезанию:

$$Q = N_p q$$

где Q - съем металла с поверхности детали.

Подставив значение N_p из (5) получим:

$$Q = P_1 P_2 t q \frac{S_{дет}}{4R^2} \qquad (6)$$

Поскольку на поверхность детали воздействует направленный поток частиц, логично предположить, что появление случайных следов взаимодействия на поверхности детали подчиняется закону Пуассона.

Появление пятен контакта на детали подчиняется закону Пуассона. При этом вероятность появления k событий за время t определяется по формуле:

$$P_{(k)} = \frac{(\lambda t)^k e^{-k}}{k!} \qquad (7)$$

где λ - интенсивность потока, т.е. среднее число взаимодействий в единицу времени на площади квадрата упаковки.

Соответственно, зависимость для определения объема металла примет вид:

$$Q = P_2 \lambda t q \frac{S_{дет}}{4R^2} \qquad (8)$$

Величина λ зависит от технологических параметров (давление воздуха, зернистость абразива) и может быть определена при экспериментальном моделировании.

В работе [2] предложена методика вывода зависимости для определения среднего арифметического отклонения профиля установившейся шероховатости при обработке свободными абразивами и пользуясь этой методикой для ГАО получена зависимость:

$$Ra = 0.09\sqrt{\frac{h_{\max} L_{ед}}{\lambda}} \qquad (9)$$

где $L_{ед}$ – единичная длина.

Экспериментальные исследования процесса гидроабразивной обработки проводились в условиях ОАО “Ростверстол” на гидроабразивной установке Rosler WA140. Материалы образцов для экспериментальных исследований выбирали с учетом необходимости проверить универсальность теоретических моделей и возможности широкого применения результатов исследований для обработки деталей из машиностроительных материалов (сталь ХВГ, сталь 45, медь Моб, латунь Лс59, алюминий Д16, сталь 12х18н10Т). Использовали кварцевый песок с зернистостью 30-60.

На рисунках 1 и 2 приведены теоретические зависимости (кривые) и результаты экспериментальных исследований (точки) влияния расстояния от сопла до поверхности детали на съем металла и шероховатость поверхности.

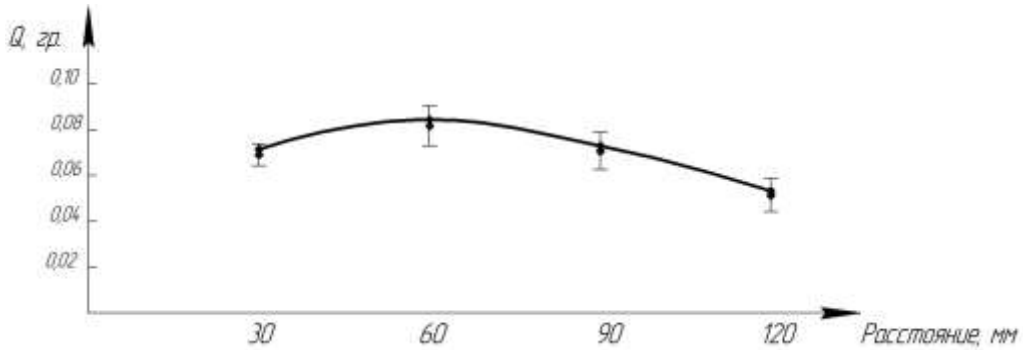


Рис. 1 Зависимость съема металла от расстояния между соплом и обрабатываемой поверхностью

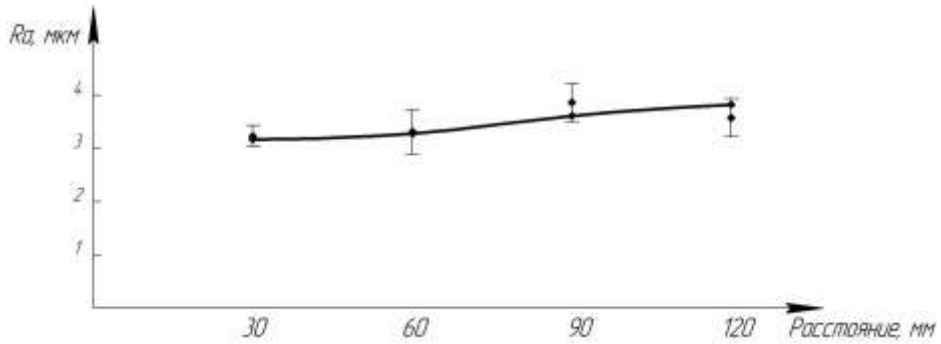


Рис. 2 Зависимость установившейся шероховатости поверхности от расстояния между соплом и обрабатываемой поверхностью

Полученные экспериментальные данные отличаются от теоретических не более чем на 20%.

В результате экспериментов были определены значения интенсивности потока при разных сочетаниях режимов обработки. При помощи программы matcad получены эмпирические зависимости для расчета интенсивности потока при различных значениях технологического режима. Полученные зависимости представлены на рисунках 3, 4, 5, где точки это экспериментальные данные, а кривая эмпирические зависимости.

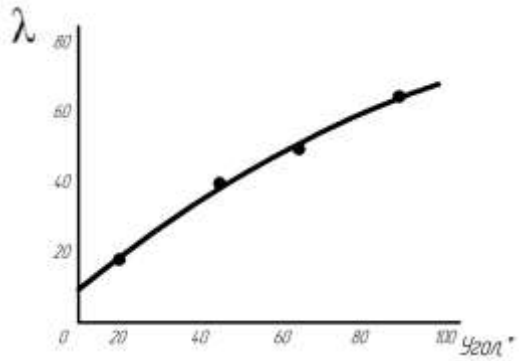


Рис. 3 Зависимость интенсивности потока от угла наклона потока к поверхности детали

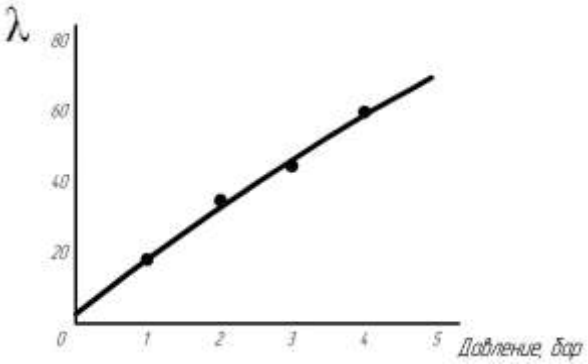


Рис. 4 Зависимость интенсивности потока от давления потока

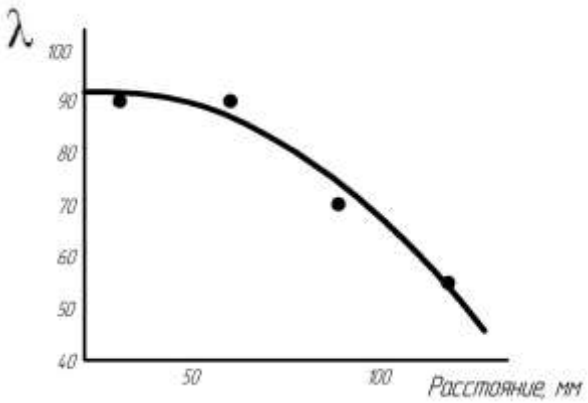


Рис. 5 Зависимость интенсивности потока от расстояния между соплом и обрабатываемой поверхностью

Полученные теоретические зависимости могут быть использованы для прогнозирования параметров шероховатости и съема металла с обработанной поверхности при проектировании технологических процессов ГАО.

Библиографический список

1. Непомнящий Е.Ф. Трение и износ под воздействием струи твердых сферических частиц.// Контактное взаимодействие твердых тел и расчет сил трения и износа. М.:Наука,1971.-С.190-200.

2. Тамаркин М. А. Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами г. Ростов-на-Дону - 1995 г.

УДК 631.354.2.076:681.5

Методика оптимального проектирования контроллеров систем адаптивного управления техпроцессом зернокомбайна

Радин В. В., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия,
Феденко М. А., Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия, mfedenko@donstu.ru

Аннотация. В статье рассматривается экстремальная система управления технологическим процессом зерноуборочного комбайна, являющаяся нелинейной дискретной системой с кратными синхронизированными частотами прерывания. Формулируется задача оптимального проектирования цифровых дискретных систем управления техпроцессом зернокомбайна. Приведена методика синтеза оптимальных в смысле максимального быстродействия систем управления технологическим процессом зерноуборочного комбайна. Также даны результаты такого синтеза для зерноуборочного комбайна Acros.

Ключевые слова: зерноуборочный комбайн, технологический процесс, адаптивное управление, поиск экстремума, оптимум, система управления.

Abstract. The article discusses the extreme combine process control system that is a nonlinear discrete system with multiple synchronized interrupting frequencies. The problem of combine process digital discrete control systems optimal design is formulated. The synthesis methods of optimal (in terms of maximum performance) combine process control systems are described. Also, the results of this synthesis for Acros harvester are given.

Keywords: grain combine, process, adaptive control, hill climbing, optimum, control system.

Максимальное быстродействие — это способность системы отрабатывать входные воздействия вида ступенчатой функции без перерегулирования за конечное и минимальное время [1–3].

Начальные условия в рассматриваемых системах принимаем нулевыми.

Искомый цифровой регулятор будем рассматривать как усилитель с переменным коэффициентом усиления K_n, принимающим различные значения на различных интервалах прерывания [4].

Линейная часть системы описывается совокупностью линейных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами, которая в векторной форме имеет вид:

$$\frac{d\mathbf{V}(\lambda)}{d\lambda} = \mathbf{A}\mathbf{V}(\lambda) \qquad (1)$$

Вектор состояния **V** включает компоненты вектора входа **r** и вектора состояния управляемого техпроцесса **x**:

$$\mathbf{V} = [\mathbf{r}, \mathbf{x}]^T \qquad (2)$$

Векторы состояния (2) для систем I–IV (рис. 1–4) принимают вид:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_I = [r, x_1, x_2, x_3, m]^T; \\ \mathbf{V}_{II} = [r, x_1, x_2, m]^T; \\ \mathbf{V}_{III} = [r, x_1, x_2, x_3, m]^T; \\ \mathbf{V}_{IV} = [r, x_1, x_2, m]^T. \end{cases} \quad (3)$$

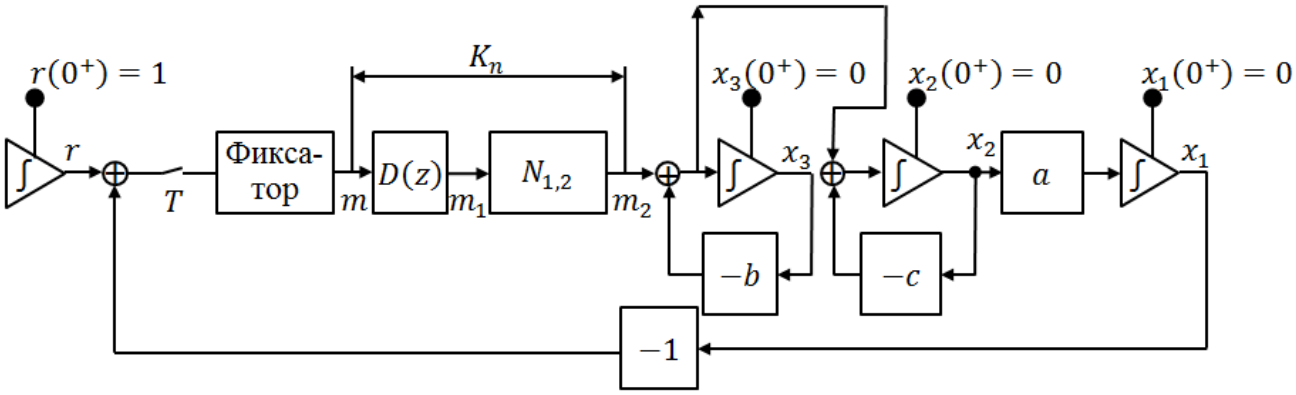


Рис. 1. Схема в переменных состояния цифровой дискретной системы оптимального управления двухъёмкостным техпроцессом зернокомбайна с нелинейными характеристиками N_1 или N_2 и астатическим регулирующим устройством

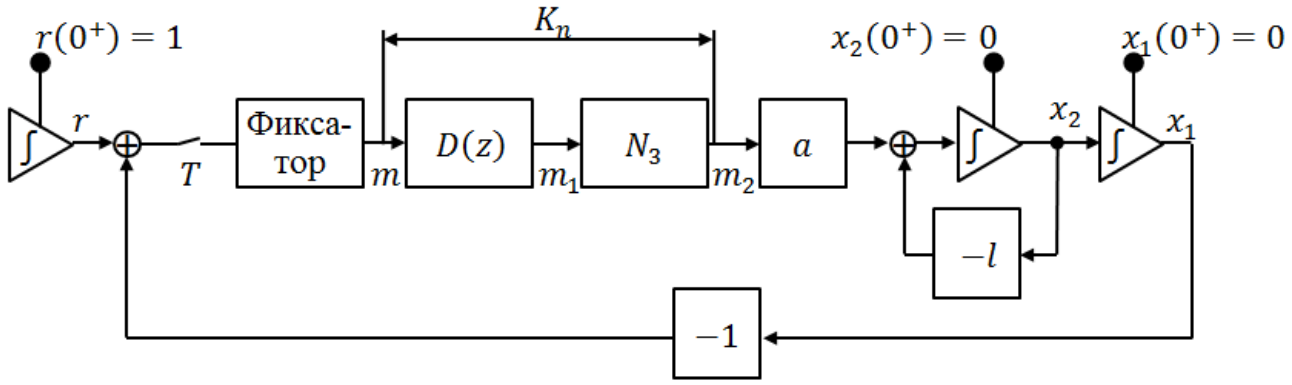


Рис. 2. Схема в переменных состояния цифровой дискретной системы оптимального управления одноёмкостным техпроцессом зернокомбайна с нелинейной характеристикой N_3 и астатическим регулирующим устройством

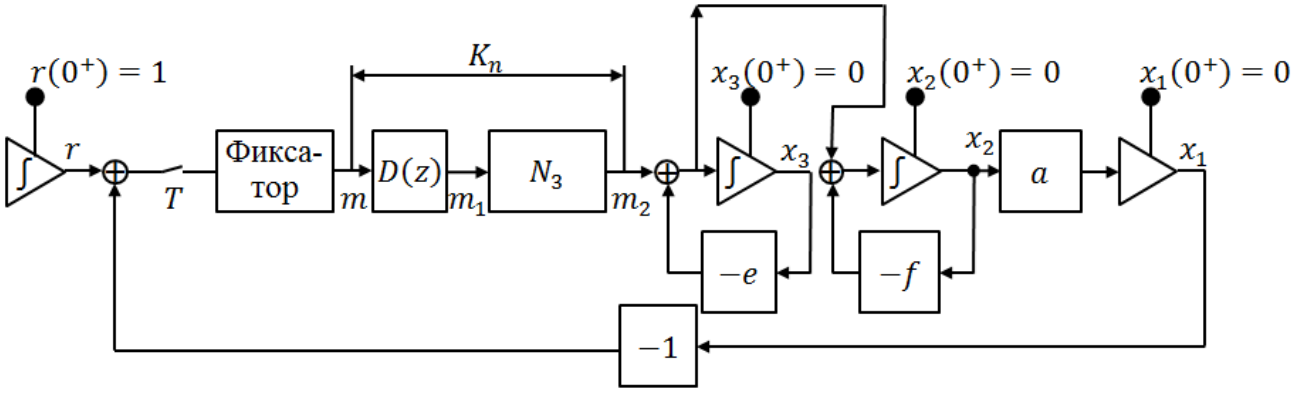


Рис. 3. Схема в переменных состояния цифровой дискретной системы оптимального управления двухъёмкостным техпроцессом зернокомбайна с нелинейной характеристикой N_3 и астатическим регулирующим устройством

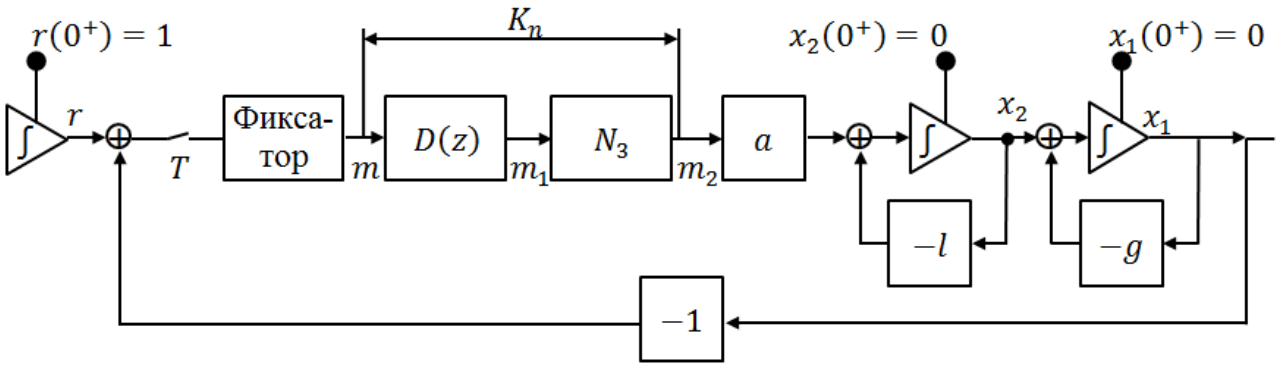


Рис. 4. Схема в переменных состояния цифровой дискретной системы оптимального управления одноёмкостным техпроцессом зернокомбайна со статическим регулятором

Применение прямого одностороннего преобразования Лапласа к уравнению (1) позволяет получить:

$$\mathbf{V}(s) = [s\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1}\mathbf{V}(0^+), \quad (4)$$

где $\mathbf{I}$ — единичная матрица размера $j \times j$ (j — число переменных состояния, используемых для описания процесса управления).

Квадратные матрицы $\mathbf{A}$ для систем I–IV имеют вид:

$$\mathbf{A}_I = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -c & -b & K_n \\ 0 & 0 & 0 & -b & K_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{A}_{II} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -l & aK_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{III} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -f & e & K_n \\ 0 & 0 & 0 & -f & K_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{A}_{IV} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -g & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -h & aK_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Применяя L^{-1}-преобразование к уравнению (4), получаем решение дифференциальных уравнений состояния в виде:

$$\mathbf{V}(t) = \mathbf{\Phi}(t - nT)\mathbf{V}(nT^+), \quad (5)$$

где $\mathbf{\Phi}(\lambda)$ — расширенная матрица перехода, определяемая выражением

$$\mathbf{\Phi}(\lambda) = L^{-1}[s\mathbf{I} - \mathbf{A}]^{-1}. \quad (6)$$

Начальные условия для дифференциального уравнения состояния (1) могут быть записаны в векторной норме как

$$\mathbf{V}(nT^+) = \mathbf{B}\mathbf{V}(nT), \quad (7)$$

где квадратная матрица переходных состояний $\mathbf{B}$ определяется из систем уравнений переходных состояний, получаемых на основании схем в переменных состояния. Для систем I–IV имеем

$$\mathbf{B}_I = \mathbf{B}_{III} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B}_{II} = \mathbf{B}_{IV} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad (8)$$

Используем далее процедуру синтеза оптимального входного сигнала m на основе метода переменного коэффициента усиления [5], согласно которому коэффициент K_n должен принимать различные значения K_n на различных интервалах прерывания $n = 0, 1, 2, \ldots$. Причём значения K_n выбираются так, чтобы переходные процессы в системе были конечными и имели минимальную длительность. Суть этого метода состоит в построении рекуррентного соотношения для вектора состояния $\mathbf{V}$ в момент $t = kT$:

$$\mathbf{V}(kT) = \mathbf{\Phi}_{k-1}(T)\mathbf{V}\left(\overline{k-1}T^+\right), \qquad (9)$$

где матрица перехода $\mathbf{\Phi}_{k-1}(T)$ в силу замены участка $D-N$ элементом K_n есть функция коэффициента усиления K_{k-1} усилительного элемента в -м периоде прерывания, а вектор состояния $\mathbf{V}\left(\overline{k-1}T^+\right)$ есть функция коэффициентов усиления $K_0, K_1, K_2, \ldots, K_{k-2}$.

Следовательно, задача оптимального проектирования сводится к определению констант K_k усилительного элемента. Расчёт считается законченным после того, как только становятся известными эти константы.

Условия максимального быстродействия при входных воздействиях вида ступенчатой функции и нулевых начальных условиях означают, что при $t < pT$ выход систем x_1 должен оставаться меньше входа и ошибка систем при $t > pT$ должна равняться нулю. Эти условия удовлетворяются, если имеем [4]:

$$x_1(pT) = r(pT); \qquad (10)$$

$$x_2(pT) = x_3(pT) = \ldots = x_p(pT) = 0, \qquad (11)$$

где p — порядок дифференциального уравнения управляемого процесса.

Искомая последовательность констант K_k и их число определяются из соотношений (10), (11) с учётом параметров нелинейных характеристик N_i.

Реализация этой последовательности осуществляется в цифровых системах оптимизации зернокомбайнов за счёт изменения длительности входных воздействий регулирующего органа (по скорости v) и за счёт назначения оптимальных параметров передаточной функции $D(z)$ цифрового регулятора.

Пусть m — входной и m_2 — выходной сигналы для участка D — N схем систем. В любой момент времени $t = nT^+$ имеем:

$$m_2(nT^+) = K_n m(nT^+), \qquad (12)$$

где K_n — коэффициент, усиления участка D — N, постоянный в пределах интервала прерывания и переменный для различных интервалов прерывания $n = 0, 1, 2, \ldots$.

Из уравнений (5), (7) для $n = 0$ получаем:

$$\mathbf{V}(0^+) = \mathbf{B}\mathbf{V}(0), \qquad (13)$$

$$\mathbf{V}(T) = \mathbf{\Phi}_0(T)\mathbf{V}(0^+). \qquad (14)$$

Так как матрица перехода $\mathbf{\Phi}(t - nT)$ является функцией переменного коэффициента усиления K_n, то для $n = 0$ имеем:

$$\mathbf{\Phi}_0(T) = \mathbf{\Phi}(K_0),$$

где K_0 — коэффициент усиления участка D — N на первом периоде прерывания, и формула (13) принимает вид

$$\mathbf{V}(T) = \mathbf{\Phi}(K_0)\mathbf{B}\mathbf{V}(0). \qquad (15)$$

Матрицы переходных состояний рассматриваемых систем известны (матрицы (22)). Известны также векторы $\mathbf{V_I}(0)$ — $\mathbf{V_{IV}}(0)$, а именно:

$$\mathbf{V}_I(0) = \mathbf{V}_{III}(0) = [1,0,0,0,0]^T;\ \mathbf{V}_{II}(0) = \mathbf{V}_{IV}(0) = [1,0,0,0]^T. \quad (16)$$

Следовательно, в соответствии с выражением (13) известны и вектора $\mathbf{V}_I(0^+)$ — $\mathbf{V}_{IV}(0^+)$

$$\mathbf{V}_I(0^+) = \mathbf{B}\mathbf{V}_I(0) = [1,0,0,0,1]^T;$$
$$\mathbf{V}_{II}(0^+) = \mathbf{B}\mathbf{V}_{II}(0) = [1,0,0,1]^T; \qquad (17)$$
$$\mathbf{V}_I(0^+) = \mathbf{V}_{III}(0^+),\ \mathbf{V}_{II}(0^+) = \mathbf{V}_{IV}(0^+).$$

Компонентами векторов (16) являются искомые сигналы $m(0^+)$. Пусть из этих векторов вообще имеем, что

$$m(0^+) = r_1(0^+). \qquad (18)$$

Если $m(0^+)$ больше максимального выходного сигнала m_2 нелинейного элемента N (рис. 5), то K_0 следует выбрать равным максимальному возможному значению переменного коэффициента усиления K_n в первом периоде прерывания, т. е.

$$K_0 = \frac{m_2(0^+)}{r_1(0^+)}, \quad (19)$$

где $m_2(0^+)$ — максимальный выходной сигнал нелинейных элементов N_1 — N_3 (рис. 5).

Аналогично строятся рекуррентные соотношения (13) и (14) для $n = 1$, $n = 2$ и т. д., пока $m(T^+)$, $m(2T^+)$ и т. д. больше максимального выхода используемых в системах управления техпроцессом зернокомбайна нелинейных элементов N и коэффициенты K_1, K_2 и т. д. выбираются равными максимально возможному значению переменного коэффициента усиления K_n во втором, третьем и т. д. периоде прерывания. Однако, если $m(kT^+)$ становится меньше максимального выхода нелинейного элемента N, то для определения K_k следует привлечь другие условия максимального быстродействия (10) и (11). Из них следует, что ошибка системы равна нулю при $t \geq kT$, если сигнал на выходе систем $x_1(kT)$ равен сигналу на входе, т. е.

$$x_1(kT) = r_1(kT), \qquad (20)$$

а сигналы на всех остальных интеграторах отсутствуют, т. к. к этому моменту переходные процессы в системе должны быть завершены, т. е.

$$\begin{matrix} x_2(kT) = x_3(kT) = 0, & \text{(для систем I, III)}, \\ x_2(kT) = 0, & \text{(для систем II, IV)}, \end{matrix} \qquad (21)$$

где $x_p(kT)$ — координаты систем, являющиеся функциями последовательных значений переменного коэффициента усиления K_n, которые могут быть получены из уравнения (9) как компоненты вектора состояния $\mathbf{V}(kT)$. Сами же последовательные значения K_n находятся из решения системы уравнений (20) — (21) с учётом вида системы.

Итак, входная и выходная последовательности сигналов для участка D — N рассматриваемых систем полностью определены. Z-преобразования этих сигналов имеют вид:

$$M(z) = m(0^+) + m(T^+)z^{-1} + \ldots + m(kT^+)z^{-k}; \qquad (22)$$

$$M_2(z) = K_0 m(0^+) + K_1 m(T^+)z^{-1} + \ldots + K_k m(kT^+)z^{-k}. \qquad (23)$$

Теперь не составляет труда определить оптимальную передаточную функцию цифрового регулятора, если под последней понимать такую передаточную функцию, параметры которой обеспечивают максимум быстродействия каждой из четырёх рассматриваемых систем.

Для чего известными методами [6, 7] входной сигнал нелинейного элемента N представляем в форме z-преобразования:

$$M_1(z) = a_0 + a_1 z^{-1} + \ldots + a_k z^{-k}, \qquad (24)$$

где коэффициенты a_i суть коэффициенты разложения конкретных нелинейностей N_1, N_2, N_3, используемых в современных приводах зернокомбайнов (рис. 5).

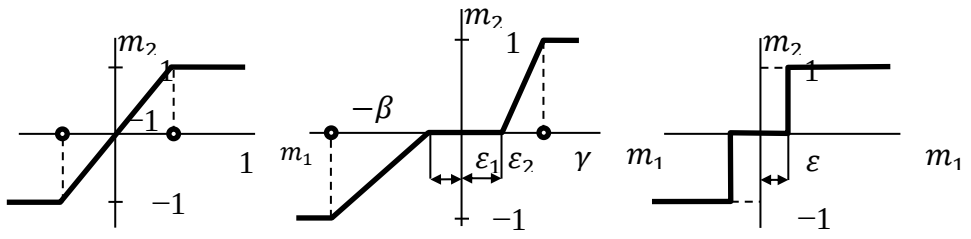


Рис. 5. Характеристики нелинейных звеньев в системах автоматизации зернокомбайнов: а — нелинейная характеристика N_1; б — нелинейная характеристика N_2; в — релейная характеристика N_3; m_1, m_2 — выходной и входной сигналы нелинейных звеньев; ε_1, ε_2 — зоны нечувствительности в относительных единицах

Искомая передаточная функция цифрового регулятора $D^j(z)$ есть, очевидно, отношение выходного сигнала m_1 к входному сигналу m в форме z-преобразования:

$$D^j(z) = \frac{\sum_{i=0}^{k} a_i^j z^{-i}}{\sum_{i=0}^{k} m^j(iT^+)z^{-i}}, \qquad (25)$$

где индекс j = I, II, III, IV — есть индекс, выбирающий один из рассматриваемых типов систем.

Заключение

В заключение укажем общую процедуру синтеза оптимальных в смысле максимального быстродействия систем управления техпроцессом зернокомбайна, а также результаты такого синтеза для комбайна Acros.

1. Идентифицируем управляемый процесс и регулятор типовыми линейными динамическими звеньями и существенно нелинейными звеньями.

2. Выделяем максимальное время чистого запаздывания и с учётом его определяем период прерывания системы управления.

3. Для контура с периодом прерывания T составляем схему в переменных состояния, представляя цифровой регулятор D и нелинейный элемент N в виде усилительного элемента K_n.

4. Из рассмотрения схемы определяем расширенную матрицу переходных состояний **B** (нулевых условий) (8) системы и матрицу перехода $\mathbf{\Phi}(\lambda)$ (6).

5. Находим входной сигнал *для* участка D — N схемы из уравнений

$$\mathbf{V}(nT^{+}) = \mathbf{B}\mathbf{V}(nT);$$

$$\mathbf{V}(\overline{n+1}T) = \mathbf{\Phi}(K_n)\mathbf{V}(nT^{+}),$$

используя найденные значения матриц **Φ** и **B** системы.

6. Вычисляем константы усилительного элемента и находим выходной сигнал для участка D — N схемы, используя результаты п. 5.

7. Аналитическим или графическим методом определяем входной сигнал нелинейного элемента N на основе использования технических данных о современных гидроприводах и других типах исполнительных устройств комбайнов.

8. Определяем искомую передаточную функцию цифрового регулятора по формуле (25).

В результате проведённого оптимального проектирования цифровых систем автоматического управления техпроцессом современного зерноуборочного комбайна Acros получена оптимальная передаточная функция $D(z)$ цифрового регулятора с нелинейностью N_3 и нелинейными коэффициентами $m(0^{+}) \leq 0{,}473$, $m(T^{+}) = 0{,}732$ (при этом минимальное число периодов прерывания $n_{min} = 2$):

$$D(z) = \frac{2{,}01(1 - 3{,}12z^{-1})}{1 + 0{,}732z^{-1}}.$$

Список литературы

1. Болтянский, В. Г. Теория оптимальных процессов / В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Л. С. Понтрягин // Изв. АН СССР, серия матем. — Т. 24, 1960, № 3. — С. 3–42.

2. Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин [и др.]. — М. :

Наука, 1969. — С. 4–98.

3. Ту, Ю. Современная теория управления / Ю. Ту. — М. : Машиностроение, 1971. — 472 с.

4. Tou, J. T. Study of Digital Control Systems / J. T. Tou, Y. T. Lin, T. A. Meksavan ; Northwestern University, Computer Science Laboratory TR 103. Evanston, III, 1963.

5. Sheehan, R. T. Automatic combine harvester adjustment system / Roland T. Sheehan, E. William Rowland Hill, Carl E. Bohman. — U.S.A. Patent Number 4,527,241. — Jul. 2, 1985, p. 48.

6. Математические основы теории автоматического регулирования : учебное пособие для втузов / под ред. Б. К. Чемоданова. — М. : Высш. шк., 1977. — Т. 1. — 366 с.

7. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Книга 1 / под ред. В. В. Солодовникова. — М. : Машиностроение, 1967. — 770 с.

Именной указатель

M

Mohammad Ebrahimi 351

S

Somayeh Sadeghi-Kohan 350

Z

Zainalabedin Navabi 350, 351, 352

А

Айзикович С.М. 252, 257, 261

Алепко А.В. 345

Алиев М.М. 15

Анкудимов Ю.П. 277

Артамонова Е.А. 266

Астахов А.В. 23

Ашканов А.В. 51

Б

Бабенко Т.С. 217

Бабичев А.П. 270, 286, 294, 339

Балашова С.А. 58

Баранов И.В. 372

Бегун В.Г. 159, 165

Бирюков Д.Д. 294

Бобрешов Р.И. 184, 229

Боков А.И. 11,39

Больших И.В. 21

Бочкарев П.Ю. 131

Братищев А.В. 125

Бржозовский Б.М. 131, 154

Бундур М.С. 303

Бурдина Е.И. 113

Бурлакова В.Э. 11, 61, 77, 81
Быкадор В.С. 165, 174, 184
Васильев Б.Н. 23, 43
Васильев М.А. 23, 43

В

Вейесса Г.К. 270, 286, 339
Верещетин П.П. 165
Веснин В.Н. 286, 339
Вобу А.Н. 270
Воронин И.В. 372

Г

Герасина Ю.С. 68, 73
Глазман Б.С. 286
Голованёв В.А. 174
Голубь Д.И. 332
Гомцян Г.С. 294
Горбенко М.А. 353, 358
Гребенкин Р.В. 321
Губанова А.А. 159

Д

Данилевский В.П. 39
Дмитренко А.А. 419
Дроган Е.Г. 61, 65, 117

Е

Евстифеев Е.Н. 96

З

Задошеко Е.Г. 77, 81
Заковоротный В.Л. 174, 193, 207, 229
Зеленцов В.Б. 252
Зинина Е.П. 154

Золотовский А.В. 390
Зотов В.В. 41

И
Иванов А.А. 131
Игумнов Л.А. 257
Илюхин Н.Д. 93
Илясов В.В. 27, 51
Исаев А.Г. 321

К
Калий Д.С. 138
Климов М.М. 47, 58
Комиссарова О.А. 101, 104, 108
Косоглотов А.А. 353, 358
Костенко Г.Ю. 165
Кохановский В.А. 21
Кочергин Е.С. 65, 117
Кочубей А.А. 291, 297
Кравец В.С. 401
Кравченко В.В. 86
Кренев Л.И. 261
Кужаров А.А. 68, 73
Кузьменко А.А. 143, 149
Куимов Д.Н. 396
Кулинич М.Н. 396
Курень С.Г. 363
Курская И.А. 217
Кэ Л.Л. 252

Л
Лавренова Т.В. 286
Лазаренко С.В. 353, 358
Лапшин В.П. 179, 401
Лебедев В.А. 291, 297

Литвин А.В. 363
Лобов А.А. 207
Ломаченко К.А. 68
Ломовцев А. 297
Лосев В.А. 353, 358
Лукьянов А.Д. 165, 193, 207, 413, 419
Лукьянов Б.С. 101, 104, 108
Лукьянова М.Б. 101, 104, 108
Любченко С.Н. 86
Лященко З.В. 353

М
Мартынов В.В. 154
Мигура А.В. 39
Милов А.А. 65, 117
Минкин М.С. 396
Митрин Б.И. 252
Митрофанов А.А. 58
Моисеев Д.В. 31
Моисеенко С.А. 47
Мохсен М.Н. 376, 383
Муханов Е.Л. 101, 104, 108

Н
Наумов И.И. 345
Нейдорф Р.А. 383
Николенко Г.В. 363
Новикова А.А. 90, 93
Носачев С.В. 247

О
Ожогин И.В. 108
Окунева Н.В. 390
Онойко Т.С. 165

П

Павлов П.П. 413

Панина А.П. 101, 104

Пастухов Ф.А. 339

Пелевин Н.А. 303

Петров А.М. 120

Петров А.Н. 257

Петросова Н.А. 90

Пожарский Д.А. 266

Попов А.М. 315

Попов А.Н. 367

Попов Е.Н. 96

Попов М.Е. 309, 315

Прокопенко В.А. 303

Пугачев А.Д. 108

Р

Радин В. В. 431

Радионов И.А. 138, 367

Раздорский С.А. 332

Рубанов В.В. 18

Руденко А.А. 332

Рыжкин А.А. 9, 11, 31, 47, 55

Рябых Г.Ю. 363

С

Садовая И.В. 277, 321

Садырин Е.В. 261

Семенченко И.Ю. 425

Семко И.А. 242, 247

Сигиденко К.Е. 55

Синицын А.С. 143

Синицына А.А. 143

Скибина Л.М. 113

Скринников Е.В. 23, 43

Соколенко А.И. 113
Солдатов А.В. 68
Соловьев А.Н. 372
Стельмах А.В. 281

Т

Тамаркин М.А. 321
Тищенко А.В. 68, 73, 321
Тихонов А.А. 425
Тихонов Ан.А. 425
Тороп Ю.А. 15, 39
Туркин И.Я. 242
Тюняев Р.А. 179

Ф

Фам Дин Тунг 174
Феденко М.А. 431
Филатьева Н.А. 169
Фоминов Е.В. 34, 55
Фридрих Р.А. 390

Х

Хайров Д.А. 326
Харахашев А.Х. 58
Хатламаджян Д.Ю. 51
Хохлов А.В. 86
Христофорова В.В. 179

Ч

Чаава М.М. 281
Чащин Е.А. 58
Чернега Ю.Г. 277
Чувейко М.В. 247
Чукарина И.М. 281

Ш

Шведова А.С. 332

Ширяева Т.И. 261

Штынь С.Ю. 291

Шульга Г.И. 23, 43

Шульга Т.Г. 23, 43

Шучев К.Г. 34

Щ

Щекина Ю.А. 101, 104

Щерба М.Ю. 281

Э

Эль Дакдуки А. 309

Эссола Д. 339

Я

Якименко О.И. 149

Яковенко Д.М. 345

Янкин И.Н. 154