



**Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Российская академия наук
Отделение энергетики, машиностроения, механики
и процессов управления РАН
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
При финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований**

Международная конференция
«МАШИНЫ, ТЕХНОЛОГИИ И
МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СОВРЕМЕННОГО
МАШИНОСТРОЕНИЯ»,
посвященная 80-летию
Института машиноведения
им. А.А. Благонравова РАН

21-22 ноября 2018 года

СБОРНИК ТЕЗИСОВ КОНФЕРЕНЦИИ

МОСКВА

2018

Программный комитет:

Почетный председатель:

Ганиев Ривнер Фазылович, академик РАН, научный руководитель ИМАШ РАН

Председатель:

Глазунов Виктор Аркадьевич, д.т.н., д.филос.н., профессор, директор ИМАШ РАН

Заместитель председателя:

Юдкин Владимир Федорович, к.т.н., ученый секретарь

Члены комитета:

Ceccarelli Marco, профессор университета Cassino, г. Кассино (Италия)

Arakelyan Vigen, профессор университета INSA, г. Ренн (Франция)

Азиков Николай Сергеевич, д.т.н., профессор, зам. директора по научной работе

Филиппов Глеб Сергеевич, к.ф.-м.н., зам. директора по научной работе

Организационный комитет:

Председатель:

Глазунов Виктор Аркадьевич, д.т.н., д.филос.н., профессор, директор ИМАШ РАН

Заместители председателя:

Юдкин Владимир Федорович, к.т.н., ученый секретарь

Филиппов Глеб Сергеевич, к.ф.-м.н., зам. директора по научной работе

Члены комитета:

Азиков Николай Сергеевич, д.т.н., профессор, зам. директора по научной работе

Киреев Иван Дмитриевич, заместитель директора по общим вопросам

Петюков Эдуард Николаевич, начальник отдела кадров - заместитель директора по управлению персоналом

Кузнецов Юрий Степанович, д.т.н., профессор, зам. директора НЦ НВМТ

Украинский Леонид Ефимович, д.т.н., профессор, зам. директора НЦ НВМТ

Албагачиев Али Юсупович, д.т.н., профессор, зав. отделом «Трение, износ, смазка. Трибология»

Бобровницкий Юрий Иванович, д.ф.-м.н., зав. отделом «Теоретическая и прикладная акустика»

Косарев Олег Иванович, д.т.н., зав. отделом «Виброакустика машин»

Матвиенко Юрий Григорьевич, д.т.н., профессор, зав. отделом «Прочность, живучесть и безопасность машин»

Романов Александр Никитович, д.т.н., профессор, зав. отделом «Конструкционное материаловедение»

Соловьев Виктор Олегович, к.т.н., зав. отделом «Вибрационная биомеханика»

Сайфуллин Инсаф Шарифуллович, д.х.н., профессор

Саберов Хайяр Фейзрахманович, зав. ОНТИПиВ

Организаторы конференции:

Министерство науки и высшего образования РФ; Российская академия наук; Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН; Российский фонд фундаментальных исследований; Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

Содержание

Авилов К.В., Глазов Ю.Е., Косарев О.И. Оценка координат слабых источников звука в морской среде методами пассивной гидроакустики.....	14
Авилов К.В., Глазов Ю.Е., Ксенофонтов В.И., Пузакина А.К. Современные алгоритмы и программы вычисления дальнего поля кораблей в морской среде и их применение к увеличению дальности действия гидроакустических средств.....	15
Азиков Н.С., Павлов Е.А. Анализ усталостного разрушения сетчатого композитного кессона.....	16
Албагачиев А.Ю., Кулаков О.И. Рамановская спектроскопия пленок алмазоподобного углерода.....	17
Албагачиев А.Ю., Преображенская Е.В., Краско А.С. Увеличение стойкости инструмента при высокоскоростном резании жаропрочных сплавов.....	18
Албагачиев А.Ю. Фундаментальные и прикладные исследования отдела «Трение, износ, смазка. Трибология».....	19
Алексеев А.А., Большев К.Н., Сыромятникова А.С. Скорости ветвления трещины в ПММА.....	20
Алимов А.И., Евсюков С.А., Сухоруков Р.Ю. Повышение стабильности механических свойств колец ракетных и газотурбинных двигателей из титанового сплава ВТ6 путем формирования глобулярной микроструктуры.....	21
Алисин В.В. Физические методы упрочнения поверхностей трения.....	23
Алифов А.А. О расчете методом прямой линеаризации смешанных вынужденных и автоколебаний при источнике энергии ограниченной мощности и запаздывании.....	24
Апальков А.А., Одинцев И.Н., Плугатарь Т.П. Применение метода электронной спекл-интерферометрии для исследования остаточных напряжений в материалах и элементах конструкций в лабораторных и полевых условиях.....	25
Артамонов В.Ю., Аверьянов А.П., Султанов Д.Р., Султанова И.И., Кузнецов Р.Ю. Буровой раствор, позволяющий обеспечить сохранение фильтрационно-емкостных свойств. Особенности волновой обработки тампонажного раствора для повышения качества разобцения пластов нефтяных и газовых скважин.....	26
Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С. Повышение механических свойств двухкомпонентных покрытий, нанесенных газодинамическим напылением.....	28
Асфандияров Ш.А. Теоретическая модель и численное моделирование характеристик акустических метаматериалов.....	29
Ахметханов Р.С. Выявление структурных характеристик композиционных материалов методом теплового контроля.....	30
Ахметханов Р.С. Развитие безопасных машин и процессов.....	31
Баженова Н.Э. Робототехника. Внедрение информационных систем и машинного оборудования в повседневную жизнь.....	32
Базров Б.М. Теория модульной технологии.....	33
Балакшин О.Б. Направленность флаттера лопаток турбокомпрессора.....	34
Барденхаген А., Раков Д.Л., Печейкина М.А. Прогрессивный морфологический подход при создании инновационных технологических процессов.....	35
Бахтин Б.Н., Бобровницкий Ю.И. Математическое моделирование и анализ перспективных акустических метаматериалов.....	36
Белов В.Г. Температурно-силовые условия работы контейнера при прямом и обратном прессовании медных сплавов.....	37

Бирюков В.П. Расчетно-экспериментальное определение интенсивности изнашивания упрочненных слоев и наплавленных покрытий при использовании лазерного излучения	38
Бозров В.М. Применение метода исследования пространства параметров для идентификации параметров пневмодвигателей.....	39
Большаков А.М., Прокопьев Л.А. Исследование влияния углового распределения T-напряжений на траекторию трещины	40
Бржозовский Б.М., Мартынов В.В., Азиков Н.С., Кутин А.А. Основные проблемы управления, идентификации динамических процессов и мониторинга состояния сложных мехатронных систем.....	41
Буяновский И.А. Влияние элементов, легирующих углеродное покрытие, и их взаимодействие с углеродом на антифрикционные свойства модельных смазочных сред	42
Бырдин В.М. О новом типе трансцендентных осевых спиралей, с петлями, пиками и крестами.....	43
Бырдин В.М., Косарев О.И., Мамонова М.Г., Пузакина А.К. Обратноволновая дифракция гауссова пучка; расхождение лучей и диаграмма направленности; разноименная антидифракция, фокусировка и биинверсия	44
Вальес Н.Г., Фесенко Т.Н., Самолысов А.В., Крыжевич Г.Б. Численные методы исследования динамики и прочности конструкций современного энергетического оборудования	45
Васильев И.Е., Матвиенко Ю.Г., Чернов Д.В. Акустико-эмиссионный мониторинг процесса разрушения композитных конструкций в условиях циклического нагружения	46
Васильев И.Е., Матвиенко Ю.Г., Чернов Д.В. Методика ранней диагностики развивающихся повреждений	47
Величенко В.В. Метафизический принцип наименьшего действия – инструмент конструктора современных оптимальных технических и биологических систем	48
Волоховская О.А. Зависимость виброактивности двухпролетного ротора с остаточными дисбалансами при выбеге от формы кривой его неустранимого прогиба.....	49
Воробьев Е.И., Михеев А.В., Моргуненко К.О. Полуавтоматическое управление протезов рук и двуруких роботов	50
Воронцов А.Л., Лебедева Д.А. Инновационная технология изготовления металлических стаканов с конической донной частью	51
Воронцов А.Л., Никифоров И.А. Новейшая технология изготовления металлических стаканов с фланцем в донной части	52
Гаденин М.М. Сопrotивление малоциклового усталости конструкционных материалов при двухчастотных режимах нагружения.....	53
Ганиев О.Р., Звягин А.В., Украинский Л.Е., Сапунов К., Родькин Н. Движение взаимодействующих взвешенных в жидкости частиц в волновом поле	54
Ганиев Р.Ф., Жебынев Д.А., Фельдман А.М. Исследование процесса возбуждения нелинейных колебаний в закрытом резонаторе, заполненном жидкостью, с помощью гидродинамического генератора колебаний	55
Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Сухарев Т.Ю., Украинский Л.Е. Численное моделирование волнового перемешивания в системе подвижных коаксиальных цилиндров	56
Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Сайфуллин И.Ш. К вопросу о механизме неустойчивости Саяно-Шушенской ГЭС.....	57
Ганиев С.Р., Касилов В.П., Кислогубова О.Н., Курменев Д.В., Маслов П.М., Коптелова Е.К. Эффективные методы применения волновой технологии в процессах диспергирования углеродного наполнителя в эпоксидной смоле и получения карбоксиметилированного крахмала (КМК).....	58

Ганиев С.Р., Шмырков О.В., Рудаков В.П. О нелинейном характере протекания гидродинамических, кавитационных и волновых процессов и их взаимодействии между собой в проточном гидродинамическом генераторе плоского типа при различной степени перекрытия потока телами обтекания цилиндрической формы.....	60
Глазов Ю.Е., Ракитина И.С., Ксенофонтов В.И., Пузакина А.К. Пути снижения когерентности узкополосных сигналов в спектрах подводного шума морских подвижных объектов.....	61
Глазунов В.А., Филиппов О.С., Рослякова А.С., Филиппов Г.С., Швец П.А. Робототехнические системы параллельной структуры в технологиях поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи	62
Горобцов А.С., Ковалева Н.Л. Проблемы синтеза устойчивого движения двуногого робота	63
Гребенников А.С., Бахтин Б.Н., Томилина Т.М. Методики испытания космических приборов на вибрацию и удар.....	64
Данилов В.Д., Усов П.П., Шитов Г.М. Численный анализ влияния шероховатости на характеристики смазочного слоя в контакте упругих шероховатых поверхностей.....	65
Демидов С.М. Разработка алгоритма управления роботом параллельной структуры	66
Дубинин Е.Ф., Куксова В.И. Оценка и повышение эффективности систем технической диагностики	67
Думанский А.М., Алимов М.А., Радченко А.А. Закономерности нелинейного деформирования композиционных материалов с учетом поворота волокон.....	68
Думанский А.М., Алимов М.А. Использование операторно-матричных методов в механике композиционных материалов на полимерной основе.....	69
Ерофеев В.И. Волновая динамика при высокоскоростном движении объектов по упругим направляющим	70
Жданов А.С. Электронное управление характеристиками направленности микрофонов в системах измерения акустических полей.....	71
Зайнетдинов Р.И., Гадолина И.В. Метод ускорения внедрения инновационных технологий, машин и материалов для современного машиностроения	72
Зуев В.В., Журавлев М.А. 3D-сканирование, как фактор развития промышленности	73
Иванов А.Р., Большев К.Н. Автоматизированная система мониторинга технического состояния резервуаров	75
Иванов В.П. Определение скорости звука в среде с включениями	76
Иванов К.С. Принципы конструирования двухподвижных механизмов.....	77
Иванов Н.З., Думанский А.М., Неповинных В.И. Прогнозирование работоспособности тонкостенных оболочек на основе анализа полей деформаций в опасных сечениях	78
Ивлев В.И. К повышению энергоэффективности пневмоаккумулирующих буферов	79
Каплунов С.М., Махутов Н.А., Панов В.А., Фурсов В.Ю. Физическое моделирование динамических процессов в гидроупругих системах АЭС.....	80
Карпов И.А., Гребенников А.С. Экспериментальное исследование акустических поглотителей на специализированных стендах ИМАШ.....	81
Касилов В.П., Курменев Д.В. Волновые технологические машины и аппараты с электромеханическими резонансными генераторами колебаний и волн	82
Касилов В.П., Курменев Д.В., Кислогубова О.Н. Исследование влияния волновой обработки в процессе тестоприготовления на качество хлебопекарных изделий.....	83
Кассин Д.В. Математическое моделирование аэродинамики и электродинамики сопла ЖРД.....	85

Кельнер М.С. Способ защиты стальных отражателей твердотопливных пульсирующих взрывных устройств от воздействия продуктов взрыва	86
Ким А.А. Распространение волн в периодических структурах	87
Ковш И.Б. Технологии лазерного упрочнения металла: потенциал и его использование	88
Козлов Д.А. Особенности легирования поверхности стали 30ХГСН2А медью методами электроискрового легирования и ионной имплантации	89
Кокорин В.Н., Подмарев Д.Р. Физическая модель лазерной контурной резки при механической активации металлопроката	90
Кондратьев И.М., Печейкина М.А., Раков Д.Л. Анализ и синтез технологических решений для финишной обработки лопаток газотурбинных двигателей	91
Кормилицын В.И., Ганиев С.Р., Чередов В.В. О способах формирования структуры потока в волновом генераторе с кавитационными зонами и их преимуществах при топливоподготовке в энергетических установках	92
Кормилицын В.И., Масленков А.А. Методика определения состава и характеристик компонентов альтернативного топлива при кавитационном воздействии	93
Корнеев А.С. Математическое моделирование гидродинамических генераторов колебаний	95
Косарев О.И., Остапишин Н.М., Пузакина А.К. Гашение звукового поля, переизлученного конечной цилиндрической оболочкой в дальней зоне	96
Косарев О.И., Остапишин Н.М., Пузакина А.К. Дифракция звука на конечной твердой цилиндрической оболочке	97
Косарев О.И., Остапишин Н.М., Пузакина А.К. Звуковое давление в дальнем поле, создаваемое колеблющейся конечной цилиндрической оболочкой	98
Котельников В.А., Кассин Д.В. Зондовые методы управления процессами в камере сгорания ракетных двигателей	99
Котельников М.В., Платонов М.А. Компьютерное моделирование эффузии газа применительно к приборам вакуумной техники	100
Крупенин В.Л. Распределенные ударные элементы и моделирование вибрационных полей	101
Кузнецов Р.Ю. Обзор развития буровых растворов за рубежом	102
Кузнецов Ю.С., Аверьянов А.П., Урманчев В.И., Артамонов В.Ю., Султанов Д.Р., Султанова И.И., Шульгина А.П. Изучение волновых процессов в технологиях строительства скважин. Основные факторы и волновое управление процессом кольматации. Методика исследования фильтрационных характеристик бурового раствора и глинистых корок. Методы сохранения коллекторских свойств продуктивных пластов при их вскрытии бурением	103
Кузнецов Ю.С., Ганиев С.Р., Шульгина А.П., Артамонов В.Ю., Аверьянов А.П., Кузнецов Р.Ю., Султанова И.И., Султанова Д.Р., Аржанов А.Ф., Мнацаканов В.А. Волновая технология вскрытия продуктивных пластов с сохранением фильтрационно-емкостных свойств. Совершенствование технологии строительства газовых скважин в сложных геолого-технических условиях	105
Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Фахуртдинов Р.С., Алексеева М.С., Громов В.И., Данилов В.Д. Исследование структуры и триботехнические свойства теплостойких сталей, подвергнутых обработке методом активации процесса диффузионного насыщения при ионно-плазменном азотировании	107
Ларюшкин П.А., Эрстова К.Г. Некоторые вопросы исследований особых положений в механизмах параллельной структуры	108
Лебединский С.Г., Москвитин Г.В., Пугачев М.С., Поляков А.Н. Усталостная живучесть стали литых деталей железнодорожных конструкций при моделировании эксплуатационного нагружения	109

Лысенко Г.П., Котельников В.А., Украинский Л.Е. Глубоководный генератор ударных волн высокой интенсивности.....	110
Лю Хао, Думанский А.М. Исследование влияния скорости деформирования на механическое поведение однонаправленного углепластика	111
Лян И.П., Пановко Г.Я. Численное моделирование движения сыпучей среды на вибрлотке.....	112
Макаров С.Б., Панкова Н.В. О применении многочастотных динамических гасителей колебаний (МДГК) к задачам сейсмозащиты	113
Маслов С.В., Лыкина Н.А. Методы и системы определения напряженного состояния ответственных конструкций по данным натурной тензометрии	114
Матусов Л.Б. Исследование свойств равномерности ЛП-последовательностей для оптимального проектирования механизмов и машин.....	115
Махутов Н.А. Приоритетные направления развития машиноведения и машиностроения	116
Метрикин В.С., Никифорова И.В. К теории многоимпульсных виброударных механизмов.....	118
Минаев А.Я., Коровкин Ю.В. Экспериментальные исследования магнитоэологических эластомеров для создания демпферных и робототехнических устройств.....	119
Михеев А.В. Крутильные и осевые автоколебания при сверлении.....	120
Морозов О.И., Кокорин В.Н., Сагитов Д.И. Физическая модель структурирования системы «подложка-покрытие» в процессе одноосного сжатия.....	121
Моторин В.А., Костылева Л.В., Гапич Д.С. Повышение износостойкости чугуна с шаровидным графитом в ледебуритно-мартенситной оболочке	122
Мышечкин А.А., Минин А.В. Исследование силовых и деформационных параметров процессов холодной объемной штамповки метизных изделий.....	123
Назолин А.Л. Виброакустическая диагностика и ресурсосберегающая эксплуатация турбогенераторов	124
Назолин А.Л. Диагностика машин по куртильным колебаниям.....	125
Насонов Д.А., Раевский В.А., Леонтьев М.Ю. Погрешности построения АЧХ механических конструкций методом ударного возбуждения	126
Нахатакян Ф.Г., Мамонова М.Г., Пузакина А.К., Нахатакян Д.Ф. Аналитическое определение распределения контактных напряжений двух цилиндров в пределах пятна контакта при перекосе.....	127
Нахатакян Ф.Г., Нахатакян Д.Ф. Расчетный метод определения жесткости роликовых подшипников при наличии радиального зазора	128
Нахатакян Ф.Г. К расчету параметров нагруженности косозубых передач в условиях перекоса.....	129
Несмиянов И.А., Воробьева Н.С., Бочарников В.С., Иванов А.Г. Мобильный робот для прецизионного земледелия.....	130
Несмиянов И.А., Жога В.В., Воробьева Н.С., Дяшкин-Титов В.В. Погрузочные манипуляторы и роботы на основе трипода	131
Овчинников П.В. Метод волновой обработки ствола скважины в процессе цементирования и технические средства для его реализации. Совершенствование технологической схемы затворения тампонажного раствора	132
Панин С.С., Брызгалов Е.А., Довбненко М.С. Метод управления резонансным режимом в установках с электродинамическим приводом.....	134
Панин С.С., Брызгалов Е.А., Яковенко Н.И. Исследование возможности получения сферопластиков с предельно малым количеством связующего методом волнового перемешивания.....	136

Пановко Г.Я., Шохин А.Е. О некоторых особенностях самосинхронизации вблизи резонанса двух дебалансных вибровозбудителей	138
Пановко М.Я. Численный анализ эллиптического упругогидродинамического контакта с учетом направления вектора скорости контактирующих поверхностей.....	139
Папич Л., Гадолина И.В., Побегайло П.А., Крицкий Д.Ю. Вариабельность оцененных характеристик износа рабочих органов горного оборудования	140
Пахомова С.А., Гресс М.А. Исследование контактной выносливости шестерен из стали 25Х13Н2	141
Пашенко В.Н., Мясоедов К.Р., Рашоян Г.В. Решение задач о положениях механизма совместного относительного манипулирования с пятью степенями свободы.....	142
Пашенко В.Н. Построение динамической модели механизма совместного относительного манипулирования	143
Петрова И.М. Вероятность отказа элементов механической системы в зависимости от зазоров.....	144
Петухов С.В., Петухова Е.С., Свирин В.И. Генетическая биомеханика, генетические симметрии и модели квантово-алгоритмической генетики	145
Петушков В.А. Разрушение деформируемой среды в потоке кавитирующей жидкости	146
Полилов А.Н. Безопасность и прочность композитных конструкций	148
Поляков С.А., Куксенова Л.И., Кулешова Е.А. Анализ влияния наномодифицированных смазочных материалов на контактное взаимодействие и кинетику формирования адаптивной несущей способности сопряжений скольжения	149
Попов А.М. Описание схемы деформации пластины функцией комплексных переменных	150
Попов Д.А. Разработка способа управления действием взрыва скважинного заряда с изменяющимся фронтом детонационной волны.....	151
Правоторова Е.А., Скворцов О.Б., Троицкий О.А. Моделирование перераспределения плотности тока в проводнике при пропускании токового импульса	152
Привезенцев В.И., Минаева Н.И., Кудрявцев И.В., Белоусов И.В. Влияние химического состава сплава на геометрию сварного шва при импульсной лазерной сварке	153
Приходько А.А. Разработка планетарной передачи с некруглыми зубчатыми колесами с внутренним зацеплением	155
Пучков В.Н., Дунаев В.В. Оценка усилий затяжки авиационных болтовых соединений.....	156
Раевский В.А., Насонов Н.А., Леонтьев М.Ю., Крылов К.Ю. Аппаратный комплекс обработки данных для устройств безопасной эксплуатации грузоподъемных машин	157
Разумовский И.А., Матвиенко Ю.Г., Чернятин А.С. Развитие экспериментально-расчетных методов механики разрушения	158
Ракчеева Т.А. Задача распознавания - фокусная модель	159
Ракчеева Т.А. Метрические инварианты иллюзии пересечения.....	160
Резников Д.О. Основные подходы к оценке и нормированию рисков, связанных с функционированием критически важных объектов	161
Рещиков Е.О. Прогрессивная технология изготовления полых деталей с внутренним выступом	162
Романов А.Н., Филимонова Н.И. Накопление повреждений при циклическом нагружении с учетом структурной и деформационной неоднородности	163
Романов А.Н. Единая кривая циклической трещиностойкости конструкционных материалов	164
Роцин М.Н. Углеродосодержащие материалы для работы в парах трения при высоких температурах...	165

Саламандра К.Б., Тывес Л.И. Модель анализа циклических переключений в автоматических коробках передач.....	166
Саламандра К.Б. Многопоточные вально-планетарные коробки передач.....	167
Самусенко В.Д. Оценка влияния температуры на антифрикционные свойства вакуумных смазок	168
Сахаров А.В., Родионова Н.А. Определение требований к конструкции изделия как объекта утилизации	169
Сахаров А.В. Модули поверхностей деталей металлорежущих станков.....	170
Сахвадзе Г.Ж., Сахвадзе Г.Г. Особенности упрочнения имплантатов тазобедренного сустава из титановых сплавов ВТ-6 с помощью технологии лазерно-ударно-волновой обработки.....	171
Сахвадзе Г.Ж., Сахвадзе Г.Г., Киквидзе О.Г. Использование метода собственных деформаций при конечноэлементном моделировании технологии лазерно-ударно-волновой обработки материалов.....	172
Саяпин С.Н. Новые принципы построения роботизированных массажеров параллельной структуры на базе треугольного и октаэдрального самоперемещающихся модулей.....	173
Северов П.Б. Акустико-эмиссионное отображение деструкции слоистых углепластиков при повторно статическом нагружении	174
Серков Н.А., Пась О.В. Числовое программное управление станками: возникновение, этапы становления, новое направление развития.....	175
Скворцов Д.Ф., Лебедев С.В. Разработка «интеллектуального датчика» вибрации подшипника качения	176
Скворцов О.Б. Системы мониторинга вибрации и технологии ПОТ.....	177
Скворцов С.А., Глазунов В.А., Алешин А.К., Рашоян Г.В., Чернецов Р.А., Шалюхин К.А. Особенности кинематики механизмов параллельной структуры с круговой направляющей.....	178
Скворцов С.А., Филиппов Г.С., Глазунов В.А., Чернецов Р.А. Перспективы применения механизмов параллельной структуры при производстве авиационных деталей.....	179
Скворчевский А.К., Соловьев А.А., Сергеев А.М., Ковалев Н.С. Разработка системы неинвазивного сенсорного смартпротеза.....	180
Сластушенский Ю.В., Ревизников Д.Л., Рогоза А.Н., Украинский Л.Е. Расчет времени пробега пульсовой волны по данным сфигмографии.....	181
Смелягин А.И. Структурный синтез механизмов машин.....	182
Смирнов Н.И., Прожега М.В., Смирнов Н.Н., Пятов И.С., Шапошникова К.В., Ладанов С.В. Исследование фрикционных свойств легированных гибридных материалов на порошковой основе.....	183
Смирнов Н.И. Трибологические проблемы высокооборотных центробежных насосов	184
Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я. Опыт использования «полных спектров» относительной вибрации вала в подшипниках скольжения в реализации процедуры вибромониторинга компрессорного оборудования .	185
Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я., Иванова М.А. Вибродиагностика подшипников скольжения по данным анализа характеристик двумерных законов распределения.....	186
Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я. Раннее обнаружение и локализация скрытых эксплуатационных повреждений узлов ГТД по данным измерения вибрации на корпусных конструкциях двигателя.....	187
Соловьев В.О. Численные исследования импульсного обтекания взрывореактивных установок.....	188
Соловьев И.Г., Романов А.Н., Петушков В.А. Новые технологические переделы в переработке углеродосодержащих веществ мини-заводов ПУОС.....	189
Статников И.Н., Фирсов Г.И. Планирование вычислительного эксперимента в задачах анализа и синтеза динамических систем машин и механизмов	190

Стащенко В.И., Троицкий О.А., Скворцов О.Б. Формирование высокочастотных виброакустических колебаний в металлах под действием импульсных токов	191
Степанян И.В. Классификация алгоритмов синтеза биоморфных кибернетических систем	192
Столяров В.В., Фролова А.В. Влияние импульсного тока на структуру и деформационное поведение сверхпроводника NbTi	193
Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В., Ибрагимов А.Р., Кощавцев Н.Ф., Раков Д.Л., Морозов С.В. Перспективы развития раскатных станков для создания производственных интеллектуальных систем при изготовлении деталей ГТД	194
Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В., Ибрагимов А.Р., Кощавцев Н.Ф., Раков Д.Л. Методы математического и физического моделирования процессов формирования ультрамелкозернистой структуры в заготовках и изотермической раскатки деталей ГТД	195
Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В., Ибрагимов А.Р., Морозов С.В. Разработка систем контроля режимов изотермической раскатки деталей ГТД из жаропрочных сплавов для автоматизированного оборудования	196
Терещук В.С. Математическая модель легкого в приложении к спирограмме	197
Томилина Т.М. Применение аддитивных технологий для изготовления образцов звукопоглотителей и виброизоляторов из метаматериалов	198
Троицкий А.А. Совершенствование коэффициентов технологичности разнообразия элементов изделия	199
Троицкий О.А., Стащенко В.И., Скворцов О.Б., Журиков Р.Н., Курьяков Р.А. Методика изучения вибраций проводника в собственном магнитном поле импульсного тока	200
Тулешов А.К., Джомартов А.А., Дракунов Ю.М., Джамалов Н.К. Проектирование главного рабочего механизма кривошипного пресса на базе рычажных механизмов высоких классов	201
Уалиев З.Г. Динамический анализ механизмов независимого движения	202
Урманчиев В.И., Кузнецов Р.Ю., Шакиров Р.А. Гидродинамика в продуктивных пластах при бурении скважин и эксплуатации месторождений с учетом геодинамических и фильтрационных процессов	203
Федоров С.В., Козочкин М.П., Маунг Тхеин Хту, Зыкова М.А. Виброакустическая диагностика процесса поверхностного легирования	204
Федоров С.В., Мин Хтет Со, Кузнецова А.П. Износ твердосплавных пластин при фрезеровании никелевого сплава с поверхностным электронно-лучевым легированием	205
Филимонов В.И., Джанаев Ш.Р. Об изменении жесткости полки при формообразовании гнутого профиля	206
Филиппов О.С., Рослякова А.С., Многоскважинное геомеханическое моделирование напряженно-деформированного состояния региона	207
Филиппов Г.С., Ласточкин А.Б., Гаврилина Л.В. Решение задачи о скоростях для механизма с пятью степенями свободы для проведения вертебральных операций	208
Хасьянов У., Хасьянова Д.У. Технологические особенности термообработки сплавов с эффектом памяти формы	209
Хасьянова Д.У. Трибологические особенности процесса формоизменения деталей из сплава с эффектом памяти формы	210
Хрущов М.М., Марченко Е.А., Атаманов М.В., Левин И.С., Антонова О.С., Рэйляну М.Д., Авдюхина В.М., Образцова Е.А. Хромуглеродные покрытия-наноккомпозиты, полученные магнетронным распылением	211

Хрущов М.М. Твердые углеродные покрытия, легированные переходными металлами и кремнием: влияние структурно-фазового состояния на функциональные свойства	213
Ченцов А.Г., Петунин А.А. Экстремальная маршрутизация при листовой резке на машинах с ЧПУ.....	214
Чернятин А.С. К оценке нагруженности деталей методом индентирования с использованием искусственной нейронной сети для математической обработки полей остаточных перемещений.....	215
Чунихин Н.Н. Некоторые особенности формирования слоев с особыми свойствами при импульсной лазерной наплавке в газопорошковом потоке присадочного металла.....	216
Чхетиани П.Д. Актуальный износосметр (wearmeter) со схемой трения колодка-ролик	217
Шалюхин К.А., Глазунов В.А., Алешин А.К., Рашоян Г.В., Скворцов С.А. Принципы структурного синтеза механизмов параллельной структуры с кинематической развязкой.....	218
Шалюхин К.А., Филиппов Г.С., Глазунов В.А., Ульянов Е.Е. Зондовая диагностика плазменных потоков с применением механизмов параллельной структуры.....	219
Шаталов Л.Н., Дронова Е.А., Ченцова Н.А., Шитова Л.И. Проблемы создания систем автоматической балансировки на основе импульсных источников энергии	220
Шведов И.М. Реализация взрывореактивного эффекта для бурения поверхности космических тел	221
Шитов А.М., Кондратьев И.М. Опыт создания систем диагностики для металлорежущих станков.....	222
Шульженко А.А., Модестов Б.М. Моделирование реакции человека при контактном обогреве.....	223
Щербаков Ю.И. Исследование применения магнитной смазки в зубчатой передаче	224
Эрлих Б.М. Методика активного гашения и возбуждения колебаний в машинах и механизмах.....	225
Явелов И.С., Жолобов А.В., Рочагов А.В., Федянин В.И., Мартынов С.Г. Успехи механопульсографии	226

ОЦЕНКА КООРДИНАТ СЛАБЫХ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА В МОРСКОЙ СРЕДЕ МЕТОДАМИ ПАССИВНОЙ ГИДРОАКУСТИКИ

Авилов К.В., Глазов Ю.Е., Косарев О.И.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Задача оценки координат подводных источников звука пассивными методами продолжает оставаться актуальной. Известные алгоритмы существенно опираются на оценки параметров, измерение которых для малозвучающих источников проблематично. Одновременно очевидно, что от координат источника зависят только импульсные характеристики морской среды, связывающие местоположение источника и приемников. Вследствие этого алгоритм обнаружения источников звука, использующий априорную информацию о морской среде, за счет использования элементов пространственного разрешения, однозначно характеризующих курсовым углом, дистанцией и глубиной, позволяет оценивать их одновременно с обнаружением слабых источников.[1,2].

Приведем пример такой оценки по экспериментально зарегистрированным сигналам и практически доступной информации о среде. На рис.1 показаны картины выхода первичной обработки, зависящий от пространственных координат, при приеме с курсового угла 159° горизонтальной протяженной буксируемой антенной, имеющей 48 приемников на длине около 100 м (третье сверху окно, по горизонтальной оси – дистанция от антенны в км, по вертикальной оси – глубина в м). Рис. 1 показывает результаты обработки в частотном диапазоне, содержащем часть спектра обнаруживаемого источника с повышенным уровнем излучения. Профиль скорости звука на акватории измерялся за несколько дней до эксперимента. Сведения о рельефе дна и его геоакустических свойствах извлечены из общедоступных баз данных.

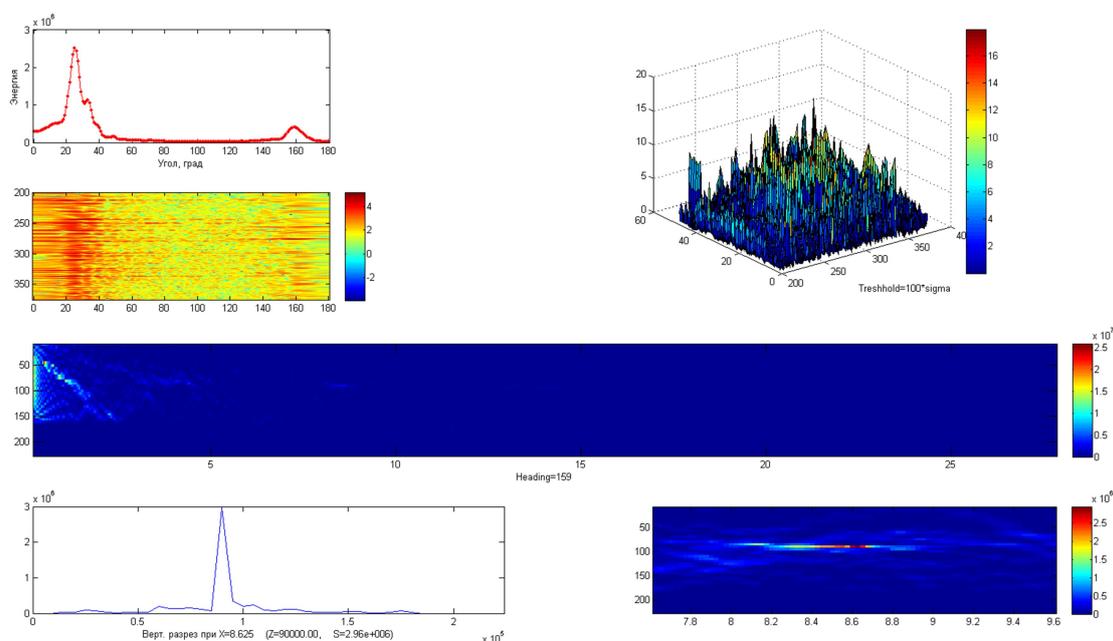


Рис. 1. Большое отношение сигнал/шум.

Максимумы на картинах примерно соответствуют положению источника по дистанции и позволяют оценить его глубину. Верхнее левое окно показывает кривую обзора в диапазоне углов $0..180$ градусов при традиционной обработке, большой максимум на ней – отметка надводного буксировщика. Во втором ряду слева – панорамное представление выхода традиционной обработки в координатах частота (вертикальная ось) – курсовой угол (горизонтальная ось). Справа от них – изображение выхода традиционной обработки в виде поверхности в трехмерном пространстве. Ниже картины выхода согласованной обработки слева – ее сечение при заданной дистанции по глубине (горизонтальная ось), справа – увеличенное изображение картины окрестности наиболее подходящего максимума. Используемый алгоритм обработки применим к гидроакустическим антеннам любой конфигурации.

Список литературы

1. Машошин А.И. Синтез оптимального алгоритма пассивного определения дистанции до цели // Труды XI конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», - СПб.: Наука, 2012. – 504 с.
2. Авиллов К.В., Волженский М.Н., Глазов Ю.Е. Численные модели гидроакустических сигналов и помех и естественная первичная обработка гидроакустических полей // Труды X Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», - СПб.: Наука, 2010. - 478 с.

СОВРЕМЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ И ПРОГРАММЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДАЛЬНОГО ПОЛЯ КОРАБЛЕЙ В МОРСКОЙ СРЕДЕ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ К УВЕЛИЧЕНИЮ ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Авилов К.В., Глазов Ю.Е., Ксенофонтов В.И., Пузакина А.К.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

В докладе приведены теоретические и экспериментальные доказательства возможности существенного увеличения дальности обнаружения подводных источников звука гидроакустическими средствами с одно-временной оценкой их координат за счет использования априорных сведений об условиях распространения звука в морской среде при первичной обработке гидроакустических сигналов. Описаны алгоритмы и программы, являющиеся основой для реализации такой обработки.

Основными средствами освещения подводной обстановки продолжают оставаться гидроакустические системы (ГАС) обнаруживающие и оценивающие параметры подводных источников звука по излучаемым ими звуковым колебаниям (первичным или вторичным гидроакустическим полям).

Спектральное описание сигналов и шумов в совокупности с принципом максимума энтропии приводят к гауссовой модели помехо-сигнальной обстановки, главный экспоненциальный член плотности вероятности для элемента пространственного разрешения, состоящего из полезного сигнала и шума.

Во многих смыслах естественным для гауссовых моделей помехо-сигнальной обстановки методом обнаружения является метод максимального правдоподобия с выбором порога по критерию Неймана-Пирсона.

Таким образом, естественная первичная обработка гидроакустических полей, представляющая собой оценку отношения правдоподобия в каждой точке области обзора (элементе пространственного разрешения) в морской среде, заключается в том, что:

- принятый (полосовой) сигнал нужно подвергнуть пространственно-частотному выбеливанию;
- взвесить предполагаемой амплитудой источника, получив вектор амплитуд;
- каждый приемник заменить на излучатель с вычисленным выше вектором амплитуд и найти поле этого массива излучателей во всех точках области обзора (элементах пространственного разрешения) в морской среде;
- квадрат модуля этого поля и есть логарифм отношения правдоподобия – статистика обнаружения – выход первичной обработки.

Отметим, что при естественной первичной обработке сразу решается триединая задача обнаружения, классификации и оценки координат. Такая обработка вполне реализуема современными средствами при современном уровне обеспечения гидрофизическими и геоакустическими данными.

Дальность обнаружения в элементе пространственного разрешения при любой линейной обработке зависит от глубины и курсового угла и определяется при заданном уровне ложных тревог заданным уровнем вероятности правильного обнаружения, являющегося однозначной функцией отношения сигнал/шум

$$SNR = \frac{\sum_{\omega} |p^+(\omega) \sqrt{S_f(\omega)} u(x^s, \omega)|^2}{\sqrt{\sum_{\omega} |p^+(\omega) N_f(\omega) p(\omega)|^2}},$$

здесь N_f и S_f суть фактические матрицы взаимных спектров шума и энергетический спектр источника, $p(x^s, \omega)$ - вектор обработки (с предполагаемыми характеристиками шума и источника), что позволяет сравнивать эффективность различных обработок.

Проведено сравнение традиционной и естественной обработки на примере расчета для модели линейной антенны из 128 ненаправленных приемников общей длиной 512 м, эквидистантно горизонтально расположенных на глубине 120 м при глубине моря около 300 м.

Итак, учет искажения гидроакустических сигналов при их распространении в неоднородной морской среде позволяет надежно предсказывать практическую дальность действия. Применение основанной на таком учете согласованной со свойствами морской среды первичной обработки гидроакустических полей позволит существенно увеличить эффективность функционирования ГАС как пассивного, так и активного наблюдения.

АНАЛИЗ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ СЕТЧАТОГО КОМПОЗИТНОГО КЕССОНА

Азиков Н.С.¹, Павлов Е.А.²

¹ИМАШ РАН, Москва, Россия; nik_azikov@mail.ru;

²МАИ, Москва, Россия.

В современной авиационной и аэрокосмической отрасли все более возрастает необходимость обеспечения прочности, ресурса и надежности при достаточно низкой массе конструкции. Усталость материалов является основным фактором потери несущей способности конструкции при циклических нагрузках. Одним из вариантов решения данной проблемы является использование анизотропных (сетчатых) конструкций из композиционных материалов. Такие конструкции представляют собой системы однонаправленных композитных ребер, и уже используются при проектировании оболочек в ракетно-космической отрасли. Несмотря на положительные характеристики сетчатых конструкций, такие как обеспечение устойчивости и прочности при достаточно низкой массе конструкции, остается проблема оценки характеристик сопротивления усталости. В совокупности этот класс проблем включает в себя анализ влияния анизотропии свойств обшивки и концентраторов напряжений в подкреплениях на характеристики усталости сетчатой конструкции.

В работе выполнен анализ усталостного разрушения анизотропного композитного кессона [4]. Кессон представляет собой замкнутую коробчатую конструкцию прямоугольного сечения, стенки которого образованы композитными пластинами, подкрепленными набором спиральных и продольных ребер. Материал элементарного слоя композита - ВКУ-25. Для анализа используются характеристики усталости элементарной ячейки, которая представляет собой прямоугольную область обшивки с подкреплением. Спиральные ребра расположены по диагоналям прямоугольника. Продольные ребра сетчатой структуры расположены на одинаковом расстоянии от средней линии. Метод расчета предполагает наличие кривых усталости для используемого материала в обшивке и ребрах. Кривые усталости выводятся на основе свойств материала по правилу смесей. Для нахождения напряжений используется метод конечных элементов. Для обшивки в качестве элемента выступает треугольник с шестью степенями свободы в каждом узле. Моделирование ребер производится с помощью балочных элементов. В случае превышения допускаемого напряжения в элементарном слое композита сетки он исключается из укладки, а матрица жесткости элемента редуцируется. Поскольку исследование предполагает построение множества моделей, что является крайне трудоемким этапом численного исследования, была реализована программа для расчета потери устойчивости сетчатого кессона с помощью метода конечных элементов в среде MathLab. В программу заложена возможность визуализации кривых усталости.

В ходе численного эксперимента были получены картины усталостного разрушения для следующих вариантов динамических нагрузок: продольное усилие, поперечное усилие, изгибающий и крутящий моменты. Углы наклона спиральных ребер в ячейках изменялись в диапазоне [5°.. 85°] с шагом в 5°. Углы 0° и 90° не рассматривались. Для каждой зоны концентрации напряжений определены эффективные коэффициенты концентрации напряжений, позволяющие оценить начало усталостного разрушения кессона.

Список литературы

1. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. Москва. «Наука» 1977. - 416 с.
2. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. Москва. «МИР» 1975. - 541 с.
3. Степнов М.Н., С.Л. Чернышев., И.Е. Ковалев., А.В. Зинин., Характеристики сопротивления усталости // Изд. «Технология машиностроения», Москва, 2010. - 256 с.
4. Азиков Н.С., Зинин А.В. Оценка прочности и усталости сетчатой композитной конструкции // В книге: Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Материалы XXIII международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. 2017. С. 4-5.

РАМАНОВСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ПЛЕНОК АЛМАЗОПОДОБНОГО УГЛЕРОДА

Албагачиев А.Ю.¹, Кулаков О.И.^{1,2}

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (albagachiev@yandex.ru);

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия.

Одной из важнейших задач машиностроения является продление срока службы изделий и деталей машин. Нанесение покрытий из алмазоподобного углерода (DLC) позволяет повысить долговечность трибологически нагруженных элементов двигателей, подшипников (в том числе при недостатке или отсутствии смазки), стойкость высоконагруженных трансмиссий, а также режущего инструмента. В данной статье предложена методика неразрушающего контроля нанесенных DLC-покрытий и анализа их состава с помощью рамановской спектроскопии.

Выходные данные сенсора спектрографа позволяют косвенно определить успешность нанесения покрытия путем оценки интенсивности спектров комбинационного рассеяния света и их сравнения со спектрами чистого материала подложки.

Дополнительно проводится оценка качества DLC-покрытия с расчетом коэффициента алмазоподобия, который определяется соотношением интенсивностей D- и G-линий, отражающих алмазоподобную и графитоподобную составляющие, соответственно (пример на рис. 1). Коэффициент алмазоподобия, в свою очередь, дает понимание о механических свойствах нанесенного покрытия.

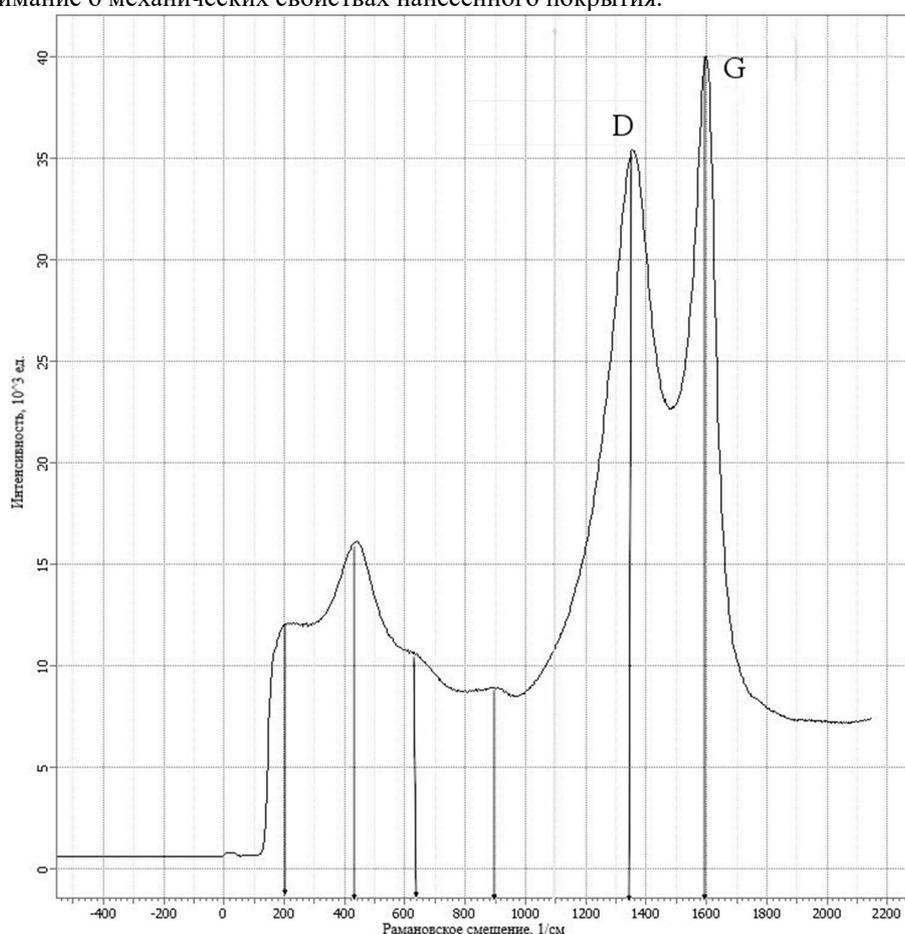


Рис. 1. Пример рамановского спектра алмазоподобного покрытия на стальной подложке с ярко выраженными D-и G-пиками

В результате проведенной работы предложена методика оценки свойств алмазоподобных покрытий и показана ее применимость к реальным объектам.

Список литературы

1. A. C. Ferrari, J. Robertson. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon // Phys. Rev. B, 2000, V. 61, I. 20, pp. 14095-14107.
2. J. Robertson. Diamond-like amorphous carbon // Materials science and engineering, 2002, V.37, pp. 129 – 281
3. V.M. Gun'ko et al. Films and Disperse Materials based on Diamond-like and Related Structures // Nanomaterials and Supramolecular Structures, 2009, pp. 383-406
4. Макеев М.О., Жукова Е.А., Михалев П.А., Осипков А.С. Исследование барьерных и физико-химических свойств защитных алмазоподобных покрытий // Научное обозрение – 2013. №7. -с. 49-55.

УВЕЛИЧЕНИЕ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ РЕЗАНИИ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

Албагачиев А.Ю.¹, Преображенская Е.В.², Краско А.С.³

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (albagachiev@yandex.ru)

²МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия;

³Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

В авиационном машиностроении все большую тенденцию приобретает использование жаропрочных и титановых сплавов для изготовления ответственных деталей двигателей современных летальных аппаратов. Вместе с тем, применение подобного рода материалов ведет к увеличению трудоемкости механической обработки деталей.

Применение современных технологий обработки резанием, в частности, высокоскоростной обработки, позволяет добиться увеличения производительности при резании труднообрабатываемых материалов, а также повышения качества поверхностного слоя деталей.

Высокоскоростная обработка характеризуется повышенным изнашиванием режущего инструмента, проявляющимся как в интенсивном линейном износе, так и в выкрашивании режущей кромки, что делает процесс высокоскоростного резания не достаточно надежным для применения.

Таким образом, встает задача оптимизации режимов резания при высокоскоростной обработке труднообрабатываемых материалов. Правильное определение критерия оптимизации позволит увеличить стойкость режущего инструмента и более успешно прогнозировать его ресурс. При высокоскоростной обработке целесообразно задаваться критерием стойкости инструмента.

Низкая стойкость инструмента при высокоскоростной обработке обусловлена высокой температурой в зоне резания и ее колебаниями в зависимости от параметров резания, в первую очередь – от площади срезаемого слоя.

Анализ особенностей процесса высокоскоростного резания позволяет сделать вывод о том, что высокоскоростное резание, возможно только при неизменности во времени таких параметров процесса резания как сила (P) и температура (Θ) резания. Известно также, что наименьший линейный износ наблюдается при оптимальной температуре резания, определяемой для каждой пары «инструмент – обрабатываемый материал» экспериментально.

С целью оптимизации процесса резания разработана модель оптимизации [3, 4] с использованием оптимальной температуры пары «инструмент – обрабатываемый материал» как исходным значением и критерием оптимизации. Такой подход позволит сократить количество расчетов и повысить его точность.

Оптимизация режимов высокоскоростного резания по критерию оптимальной температуры позволяет повысить стойкость режущего инструмента и производительность обработки таких деталей авиационных двигателей как лопатки, колеса и моноколеса [1, 2].

Список литературы

1. Албагачиев А.Ю., Краско А.С., Страмцова Е.С. Оптимизация режимов резания при высокоскоростном тчении жаропрочного сплава ХН77ТЮ // Вестник машиностроения – 2018. №7. – с. 75-78.
2. Преображенская Е.В., Краско А.С. Оптимизация процесса высокоскоростного резания труднообрабатываемых сплавов // Научные труды V-й Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». М. – Изд. дом «Спектр» – 2017, – с. 116-117.
3. Албагачиев А.Ю., Преображенская Е.В., Краско А.С. Модель высокоскоростного резания стали ХН77ТЮР // Материалы Международной научно-технической конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике»; Московский технологический университет, Физико-технологический институт / Под редакцией д.ф.-м.н., проф. Булатова М.Ф. – 2017. №23(XXIII) – с. 188-190.
4. Албагачиев А.Ю., Преображенская Е.В., Краско А.С. Моделирование высокоскоростного резания // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии – 2016. №5(319). – с. 49-52.
5. Краско А.С. Распределение тепловых потоков при высокоскоростном резании // Материалы Международной научно-технической конференции «информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике». Института высоких технологий МГУПИ / Под редакцией д.т.н., проф. Кондратенко В.С. – 2015. №1(XXI). – с. 124-126.
6. Краско А.С., Лутьянов А.В. Распределение тепловых потоков в зоне резания при высокоскоростной обработке стали ХН77ТЮ // Естественные и технические науки – 2015. №10(88). – с. 261-265.
7. Албагачиев А.Ю., Краско А.С. Теплофизика высокоскоростного резания // Актуальные проблемы приборостроения, информатики и социально-экономических наук: сборник трудов научно-практической конференции. Секция: Наукоемкие технологии в машиностроении» – 2014. – с. 12-21

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТДЕЛА «ТРЕНИЕ, ИЗНОС, СМАЗКА. ТРИБОЛОГИЯ»

Албагачиев А.Ю.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (albagachiev@yandex.ru).

Фундаментальные и прикладные исследования Отдела направлены на повышение ресурса, безопасности и коэффициента полезного действия объектов гражданского и военного назначения, космических, транспортных, энергетических атомных, авиационных, газонефтедобывающих систем. Проводятся исследования нестационарных трибологических процессов и разработка технологий получения антифрикционных, износостойких покрытий и материалов для экстремальных условий. Разработаны методы испытаний на фрикционную теплостойкость и моделирования фрикционно-износных характеристик, проектирования и расчета на трибологический ресурс и потери энергии. Созданы новые износостойкие материалы, в том числе на основе наносистем. С использованием нанотехнологий получены присадки и добавки к смазочным маслам и покрытиям. Дальнейшее развитие получило научное направление, связанное с обеспечением надежности погружных центробежных насосов для добычи нефти. С участием сотрудников отдела разработан национальный стандарт ГОСТ Р 56830-2015 (введен в действие с 01.07.2016 г.), который впервые в мировой практике ввел общие требования для установок электроприводных лопастных насосов, которыми оборудовано более 100 000 скважин РФ и добывается более 85% нефти. Создан материал (оксид алюминия + графен) триботехнического назначения, обладающий высокими эксплуатационными свойствами применительно к узлам трения, работающим в космосе и других экстремальных условиях, на основе композиционной керамики с наноструктурированной формой углерода (графен, фуллерен). Разработана теория резания и тепловых процессов механической обработки металлов.

Исследован механизм коррозионно-эрозионного износа порошковых материалов в коррозионно-активной абразивосодержащей среде применительно к рабочим органам центробежных насосов для добычи нефти. Разработаны методы оценки физико-механических и трибологических характеристик композитов и выбора оптимальных составов контактирующих тел и их микрогеометрии при различных режимах смазки.

Предложен расчетно-экспериментальный метод определения показателя степени деформационного упрочнения компонентов однослойного топокомпозита при упругопластическом деформировании. Проведена численная верификация разработанных математических моделей контактного взаимодействия сферического штампа с однослойным упругим и упругопластическим топокомпозитом. Проведены испытания высокотемпературных самосмазывающихся керамических композитов нового поколения применительно к условиям работы узлов трения авиационной и космической техники. Разработана методика и испытательное оборудование для испытаний материалов на трение и износ при температурах до -180°C , в атмосфере и вакууме. Проведены экспериментальные исследования смазочных свойств пластичных смазок для космических узлов, а также исследования трибологических свойств покрытий из порошковых материалов перспективных для синтеза деталей узлов трения лазерными аддитивными технологиями и установлены закономерности изнашивания перспективных материалов пар трения, работающих в условиях космического вакуума, повышенных и криогенных температур. Ведется работа по созданию высокопроизводительного насоса с частотой вращения 10000 об/мин. (совместно с предприятиями ВПК) для перекачки жидкости в Арктике, питательные насосы для подводных лодок, высокопроизводительные насосы пожаротушения для судов и т.д. Совместно с «Военмех» и АО ИСС им. М.Ф. Решетнева проведен цикл исследований трибологических показателей работы систем наведения космических аппаратов и прецизионных узлов военной техники, в результате чего достигнуто повышение их долговечности и надежности. Для узлов управления эксплуатируемых в условиях больших перегрузок разработаны высокотемпературные (до 800°C) пары трения на основе композиционных материалов (с керамической и полимерной матрицей) предназначенные для повышения надежности шарниров в узлах аэродинамического управления ракетной и авиационной техники, а также созданы уплотнения работоспособные при температуре более 1000°C . Для повышения ресурса работы узлов трения военной техники разработана методика упрочняющей технологии лазерной наплавки микро и наноразмерных карбидов вольфрама и тантала в порошках на никелевой и железной основе. Создана технология соединения труб из материала с эффектом памяти - нитинола (NiTi) и проводятся исследования его фазовых превращений и изменений пластических свойств под воздействиями давления, температуры и электрического тока. Ведется поиск новых конструктивных решений по проектированию артиллерийских стволов с высоким теплоотводом, а также отработка антифрикционных термостойких композиционных покрытий рабочих поверхностей этих стволов. Использование новых конструктивных решений и упрочняющих технологий, разрабатываемых в ИМАШ РАН, позволит увеличить живучесть артиллерийских стволов.

Результаты всех проведенных исследований опубликованы или находятся в печати в рецензируемых журналах и в Scopus, разработки защищены авторскими свидетельствами и патентами.

СКОРОСТИ ВЕТВЛЕНИЯ ТРЕЩИНЫ В ПММА

Алексеев А.А., Большев К.Н., Сыромятникова А.С.

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, г. Якутск, Россия; (spinor03@gmail.com)

Для экспериментального исследования ветвления трещины, условий перехода от прямолинейного распространения трещины к режиму ветвления, разработана методика измерения скорости трещины методом разрыва токопроводящих полос, создана измерительная установка на основе прецизионного преобразователя сигналов термометров сопротивления и термопар «Теркон» соединенного с компьютером через плату Ла-10м8-100 [1-2]. Проведены серии испытаний на растяжение плоских образцов из полиметилметакрилата (ПММА) с одним боковым надрезом на универсальной разрывной машине «Instron» при температурах $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ трещина распространялась прямолинейно в плоскости, перпендикулярной направлению максимальных растягивающих напряжений; разрушающие напряжения составляли $\sigma_p = 10\text{ МПа}$. Измерения скорости трещины показали следующее: зеркальная и матовая зоны поверхности разрушения соответствуют невысоким значениям скорости трещины (144–373 м/с), перьевая зона соответствует скоростям 418–454 м/с, ветвление трещины произошло при скорости около 500 м/с. При $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ разрушение происходит при более высоких разрушающих напряжениях $\sigma_p = 20\text{--}30\text{ МПа}$, трещина распространялась от надреза прямолинейно до точки ветвления при скорости около 750 м/с, после которой разрушение происходило путем множественного ветвления и параллельного движения фронта нескольких трещин при скоростях 750–920 м/с. Траектории движения и ветвления трещин показаны на рис. 1, где при движении фронта множественных трещин, движущихся под различными углами к горизонту, путь и скорость каждой трещины различны.

На основе работ [3–5] установлено, что параметром, контролирующим переход трещины от прямолинейного распространения к режиму ветвления, является критическое (предельное) значение скорости распространения трещины $V^* = 500\text{--}800\text{ м/с}$ в хрупких пластиках. Однако, предельное значение скорости трещины при множественном ветвлении с параллельным движением фронта нескольких трещин $V^* = 750\text{--}920\text{ м/с}$ [1–2], согласующееся с данными работ [3–5] при ветвлении одиночной трещины $V^* = 500\text{--}800\text{ м/с}$, показывает, что избыточная энергия, поступающая в вершину трещины, расходуется на создание новых трещин, а не на увеличение скорости. Предложена гипотеза, что критерием ветвления трещины является достижение критического (предельного) значения скорости распространения трещины ($V^* = 500\text{--}800\text{ м/с}$ в хрупких пластиках), как при ветвлении одиночной трещины, так и при множественном ветвлении с параллельным движением фронта нескольких трещин.

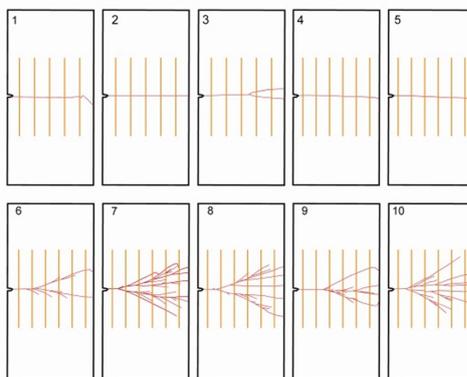


Рис. 1. Схемы распространения трещин в ПММА: верхний ряд – при $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, нижний ряд – при $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Список литературы

1. А.А. Алексеев, А.С. Сыромятникова, К.Н. Большев, А.М. Большаков, В.А. Иванов, А.С. Андреев / Критерии ветвления трещины: скорость трещины // Деформация и разрушение материалов. – 2017. – №12. – С.2-7.
2. К.Н. Большев, А.А. Алексеев, В.А. Иванов, А.С. Сыромятникова, А.М. Большаков, А.С. Андреев / Экспериментальное исследование скорости ветвления трещины в полимерах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Том 84. №4. – С. 60-65.
3. Ravi-Chandar K. Dynamic fracture of nominally brittle materials / K. Ravi-Chandar // International Journal of Fracture. – 1998. – №90. – P.83-102.
4. Sharon E. Microbranching instability and the dynamic fracture of brittle materials / E. Sharon, J. Fineberg // Physical Review B. – 1996. – V.54, №10. – P.7128-7139.
5. Динамическая стохастичность и скейлинг при распространении трещины / О.Б. Наймарк, В.А. Баранников, М.М. Давыдова и др. // Письма в ЖТФ. – 2000. – Т.26, Вып. 6. – С.67-77.
6. Лыглаев А.В., Левин А.И., Корнев И.А., Черемкин М.К., Большаков А.М. Эксплуатация магистральных газопроводов в условиях Севера // Газовая промышленность. – 2001. - № 8. – с. 37.
7. Махутов Н.А., Лебедев М.П., Большаков А.М., Захарова М.И. Особенности возникновения чрезвычайных ситуаций на газопроводах в условиях Севера // Вестник Российской академии наук. – 2017. – Т. 87. № 9. – С. 858-862.
8. Алексеев А.А. Экспериментальное исследование закономерностей разрушения при быстром распространении и ветвлении трещин: Автореф. дисс. канд. техн. наук / ИФТПС СО РАН. – Якутск, 2009. – 22 с.
9. А.С. Сыромятникова, А.А. Алексеев, А.И. Левин, А.В. Лыглаев / Ветвление трещины в углеродистой стали. Механизмы разрушения // Деформация и разрушение материалов. – 2009. - №2. – С.25-30.

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОЛЕЦ РАКЕТНЫХ И ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 ПУТЕМ ФОРМИРОВАНИЯ ГЛОБУЛЯРНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ

Алимов А.И.^{1,2}, Евсюков С.А.¹, Сухоруков Р.Ю.²

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, (ИМАШ РАН), г. Москва, Россия (labutps@yandex.ru)

Изготовление ответственных деталей ГТД, отвечающих требованиям прочности и жаропрочности является одной из важнейших задач, стоящих перед авиационной отраслью [1,2]. Кольца из титановых сплавов широко используются в авиационных и ракетных двигателях, при этом они являются в большинстве своем особо ответственными. Выбор правильных режимов деформации и термообработки для титановых сплавов особенно важен, так как их механические свойства существенно зависят от типа и параметров микроструктуры [3]. Ряд технологических параметров, которые в настоящее время не регламентируются или назначаются по справочной литературе, приводят к нестабильности получаемой микроструктуры поковок из сплава ВТ6, что, в свою очередь, приводит к нестабильности получаемых механических свойств.

Целью работы является обеспечение стабильности механических свойств раскатанных колец из титанового сплава ВТ6 за счет получения глобулярной структуры путем выбора рациональных режимов технологического процесса обработки давлением. Исследование технологического процесса раскатки колец проводилось на примере заготовки армирующего кольца сильфона ракетного двигателя РД-171, 3D-модель и эскиз которого представлены на рисунке 1.



Рис. 1. 3D-модель и эскиз армирующего кольца сильфона.

Для построения модели эволюции микроструктуры необходимо знать долю глобулярной структуры и средний размер зерен после деформации. Деформированные образцы разрезались на электроэрозионном станке по оси, исследования проводились в центре образцов. Кроме того, для правильного задания температуры деформирования, необходимо знать фактическую температуру полного полиморфного превращения. Построенные модели использовались при моделировании процесса изготовления колец методом конечных элементов в программных комплексах DEFORM и QForm. Для прогнозирования эволюции микроструктуры сплава ВТ6 была разработана методика, учитывающая динамическую глобуляризацию, прямое и обратное полиморфное превращение. Разработан алгоритм расчета. Расчет производится следующим образом. По диаграмме изотермического превращения рассчитывается равновесная доля β -фазы. Если в данный момент осуществляется деформация в двухфазной области, то при накопленной степени деформации больше критической происходит расчет доли глобулярной структуры по уравнению Джонсона-Мейла-Аврами-Колмогорова. В случае если температура превышает температуру полного полиморфного превращения или накопленная степень деформации меньше критической, доля глобулярной структуры принимается равной 0. Расчет повторяется для каждого шага расчета. Для идентификации параметров математической модели динамической глобуляризации сплава ВТ6 при обработке давлением в качестве факторов варьирования были выбраны температура испытания, средняя скорость деформации и истинная степень деформации. Исследуемый диапазон температур соответствует температурному интервалу штамповки сплава ВТ6, скорость деформации аналогична реализуемой при штамповке крупногабаритных поковок, а максимальная степень деформации была ограничена практически реализуемой при осадке.

Последовательность изготовления кольцевой заготовки состоит из осадки, прошивки, пробивки и раскатки. В качестве факторов варьирования при исследовании процессаковки были выбраны начальная температура, выдержка между ударами и общая степень деформации при осадке. Диапазон варьирования факторов был выбран в соответствии с практически используемым при ковке титановых сплавов. Было установлено, что наибольшее влияние на долю глобулярной структуры послековки оказывает начальная температура и время выдержки между ударами. Наибольшая доля глобулярной структуры была получена при начальной температуре $875\text{ }^{\circ}\text{C}$, выдержке между ударами 8 с и степени деформации при осадке 0,77. В результате проведенных экспериментальных исследований определены кривые течения, параметры трения и кинетики глобуляризации сплава ВТ6, позволяющие использовать разработанную математическую модель для исследования влияния параметров технологического процесса изготовления колец из сплава ВТ6 на формоизменение, энергосиловые параметры и микроструктуру.

Разработанная математическая модель технологического процесса изготовления колец из титановых сплавов позволяет установить напряженное и деформированное состояние заготовки на любой стадии процесса, определить распределение температуры по объему поковки, предсказать возникновения дефектов, рассчитать энергосиловые параметры и спрогнозировать изменение микроструктуры. Разработанная методика проектирования технологического процесса изготовления колец из сплава ВТ6 позволяет определять параметры режима технологического процесса изготовления колец с наибольшей долей глобулярной микроструктуры, что обеспечивает стабильность механических свойств.

Список литературы

1. R. Yu. Sukhorukov, A. A., Sidorov, A. I. Alimov, M. I. Nagimov, Sh. Kh. Mukhtarov, F. Z. Utyashev. Physical and Numerical Modeling of the Process of Rolling Off of a Tapered Shaft of Aviation Purpose. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2016, No. 6. pp. 538–545.
2. Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В. Анализ и оценка технологий и оборудования для изготовления заготовок длинномерных полых валов газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых и титановых сплавов на базе морфологического подхода. *Проблемы машиностроения и автоматизации*. - 2015. -№3.- с.136-143.
3. Алимов А.И., Евсюков С.А. Исследование технологического процесса получения титановых колец ковкой на молотах. *Инженерные системы: Труды международного форума*. Москва, 2012, с. 184-189.

ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

Алисин В.В.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (vva-imash@yandex.ru).

Цель работы – обеспечить работоспособность узлов трения при температурах до 1000°C. Проблема обеспечения надежности и ресурса узлов трения, работающих в условиях высоких температур, относится к числу наиболее важных, потому что повышение эффективности работы практически всех тепловых машин связано с повышением температуры рабочего тела. Переход от нормального износа к катастрофическому называется «порогом внешнего трения». Попытки определить предельные режимы трения предпринимались экспериментально и аналитически. Сложность задачи состоит в том, что на элементарном пятне касания молекулярная составляющая коэффициента трения не является постоянной величиной и является функцией контактного давления. С увеличением температуры, прочность молекулярных связей существенно не меняется, потому что силы межмолекулярного взаимодействия имеют дисперсионную природу, т.е. электрическую, не зависящую от температуры. Твердость материала, как правило, уменьшается, следовательно, без применения специальных мер по созданию прослойки с низким сопротивлением сдвигу нормальный режим трения керамических материалов невозможен.

В работе развит качественно новый подход, основанный на гипотезе Васильева-Сэвиджа [1] – при трении твердосмазочных материалов в точках фактического контакта создается смазочный слой из адсорбированных молекул. Эта технология открывает возможность создания регенерируемой смазочной прослойки за счет введения в контакт паров халькогена. Для температуры 1000°C интерес представляет селен, т.к. пары селена выделяются из материала пары трения. В состав керамического композита должен входить селенид железа или никеля. При нагреве пары трения до температуры термического разложения халькогенида (для различных халькогенов температура разложения разная) начинает выделяться газообразный халькоген. Образующийся пар попадает в зону фактического контакта, вступает в реакцию с элементами, входящими в состав контртела, например, вольфрама или молибдена, практически мгновенно образуя защитную пленку с низким сопротивлением сдвигу, которая постоянно восстанавливается. По существу сам материал пары трения является аккумулятором паров селена. Прямых аналогов этому методу в мире нет.

Процесс насыщения образцов халькогенидами, в частности селеном, осуществлялся на лабораторной установке с индукционным нагревом. Эксперименты по изучению трибологического поведения керамических композитов на основе стабилизированного диоксида циркония и композиционного материала системы углерод-углерод при трении по стали 40X13 в температурном диапазоне 300 – 700°C. Выбор температуры испытаний обусловлен перспективами создания приводов космических аппаратов для работы без смазки в условиях атмосферы Венеры. Химический состав металлокерамического образца по данным спектрального анализа (усредненный по площадям), ат.-%: С – 19,46; Si – 3,92; P – 1,41; Mn – 0,47; Fe – 74,19; Cu – 0,55, сформирован спеканием мелкодисперсных порошков.

Испытания на трение проводили на специальном стенде с возможностью нагрева узла трения до 1000° С по схеме «диск-пальчик». Точность измерения не менее 1% от наибольшего предела измерений. В докладе приводятся результаты испытаний. Переход к началу режима образования антифрикционной прослойки четко фиксируется снижением коэффициента трения. Установлено, что в исследуемом интервале температур задира поверхностей не происходит и мощность приводного механизма достаточна для выполнения заданной функции шарнира. Выполненные эксперименты подтверждают перспективность исследуемых пар трения для обеспечения работоспособности механизмов КА на поверхности Венеры по критерию антифрикционности. Надежность работы механизмов в этих условиях должна быть подтверждена дополнительными испытаниями по уточненным требованиям ресурса работы и нагрузочно-скоростных характеристик.

Другим направлением повышения порога внешнего трения является улучшение триботехнических свойств поверхностей трения за счет применения новых материалов и покрытий. Перспективны для применения в узлах трения, работающих без смазки или при граничной смазке, материалы на основе наноструктурированного частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСЦ) кристаллы и керамики. В России налажено серийное производство кристаллов и керамики ЧСЦ. Лучшие характеристики трибологических свойств показали кристаллы легированные редкоземельными элементами (табл. 1).

№ образца	H _v , ГПа	R _a , мкм	I ₁	f
4	17,2	0,07	1,8×10 ⁻⁹	0,23
5	13,7	0,13	2,0×10 ⁻⁹	0,25
Среднее	15,1	0,1	1,9×10 ⁻⁹	0,24

Таблица 1. Трибологические характеристики кристаллов ЧСЦ легированных церием

Список литературы

1. Васильев Ю.Н. Трение твердых смазочных материалов//Трение и смазка в машинах и механизмах. 2012. № 9. с. 28-33.

О РАСЧЕТЕ МЕТОДОМ ПРЯМОЙ ЛИНЕАРИЗАЦИИ СМЕШАННЫХ ВЫНУЖДЕННЫХ И АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ ИСТОЧНИКЕ ЭНЕРГИИ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ И ЗАПАЗДЫВАНИИ

Алифов А.А.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (a.alifov@yandex.ru)

Теория колебательных систем с ограниченным возбуждением или источниками энергии ограниченной мощности, систематически изученная В.О. Кононенко и изложенная в его основополагающей монографии [1], получила дальнейшее развитие в работах его последователей. Эта теория в настоящее время приобрела особую актуальность в связи с энергетическими и экологическими проблемами.

Как известно, существуют различные приближенные методы анализа нелинейных колебательных систем (усреднения, энергетического баланса, гармонической линеаризации и др.). Каждый из них имеет ту или иную степень точности, специфические особенности и применение какого-либо метода зависит от конкретной задачи и интереса исследователя. Всем этим методам присущ один и тот же недостаток: их использование требует большие затраты труда, времени и др. В отличие от них, методы прямой линеаризации нелинейностей значительно снижают эти недостатки и весьма существенно облегчают расчет параметров различных объектов [2-4 и др.]. Применение методов прямой линеаризации позволяет несравнимо меньшими затратами ресурсов решить нужную задачу, что особенно ценно при создании реальных технических устройств.

В радиотехнике, устройствах автоматического управления, электронике и др. широкое распространение получили системы с запаздыванием. Колебания, обусловленные запаздыванием, могут иметь двоякое значение: быть полезными (запаздывание вводится специально, например, на ультразвуковых станках) или вредными. Такие колебания возникают в различного рода технических объектах: следящих системах, прокатных станах, регуляторах, вибрационных машинах и др.

Целью работы является развитие на основе методов прямой линеаризации процедуры расчета смешанных колебаний в системах с ограниченным возбуждением. В основу работы положена модель фрикционной автоколебательной системы, взаимодействующей с источником энергии ограниченной мощности [5-6], которая дополнена запаздыванием в силе упругости. С использованием методов прямой линеаризации выведены уравнения нестационарных и стационарных движений, рассмотрены стационарные режимы и их устойчивость, зависимость амплитудно-скоростной кривой от величины запаздывания. Установлено что, запаздывание влияет на область существования автоколебаний: в зависимости от его величины эта область может как сужаться, так и расширяться. От запаздывания в силе упругости оказывается зависимой также частота автоколебаний: она может увеличиваться или уменьшаться, т.е. запаздывание играет такую же роль, что и нелинейная упругая сила с «жесткой» (в первом случае) и «мягкой» (во втором случае) характеристиками.

Проанализированы влияние запаздывания и мощности источника энергии на устойчивость движения, нестационарные переходы между стационарными состояниями и др. Установлено что, автоколебания при определенном значении запаздывания, неустойчивые (нереализуемые) в случае источника энергии неограниченной мощности, могут оказаться устойчивыми (реализуемыми) в случае источника ограниченной мощности. Это зависит от крутизны характеристики источника. Нестационарные переходы из одного состояния в другое могут появляться как при изменении скорости источника, так и изменении величины запаздывания. Полученные результаты позволяют отметить, что при проектировании реальных объектов различного назначения необходимо проводить детальный анализ и установить наличие или отсутствие запаздывания. При наличии запаздывания (нежелательного или специально вводимого) можно использовать описанную в работе процедуру применения методов прямой линеаризации для расчета динамических процессов в системе. Эта процедура достаточно простая, что особенно важно с практической точки зрения - для расчета параметров механизмов, машин, оборудования на стадии их проектирования.

Список литературы

1. Кононенко В.О. Колебательные системы с ограниченным возбуждением. М.: Наука, 1964. 236 с.
2. Алифов А.А. Методы прямой линеаризации для расчета нелинейных систем. М.- Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». 2015. 74 с.
3. Alifov A.A. About some methods of calculation nonlinear oscillations in machines // International Symposium of Mechanism and Machine Science, October 5-8, 2010, Izmir, Turkey: proceedings. 2010. p. 378-381.
4. Alifov A.A. Method of the Direct Linearization of Mixed Nonlinearities // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2017, Vol. 46, No. 2, pp. 128-131.
5. Алифов А.А., Фролов К.В. Взаимодействие нелинейных колебательных систем с источниками энергии. М.: Наука, 1985. 328 с.
6. Alifov A.A., Frolov K.V. Interaction of Nonlinear Oscillatory Systems with Energy Sources. Hemisphere Publishing Corporation, New York, Washington, Philadelphia, London. 1990. P.327.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАТЕРИАЛАХ И ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ И ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ

Апальков А.А., Одинцев И.Н., Плугатарь Т.П.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (E-mail: ino54@mail.ru)

Экспериментальное исследование остаточных напряжений в деталях и элементах конструкций представляет значительный практический интерес. При этом наиболее достоверные данные могут быть получены с помощью разрушающих или частично разрушающих методов, в частности, путем засверловки малоразмерных отверстий-индикаторов [1]. Прогрессивной тенденцией последнего времени является сочетание данного подхода с применением электронной цифровой спекл-интерферометрии для полноформатной регистрации возникающих деформационных откликов напряженного материала в зоне тестирующего воздействия [2, 3]. В основе метода лежит высокоточное бесконтактное измерение полей различных компонент вектора перемещений на поверхности тела, визуализируемых в виде картин интерференционных полос, рис.1.

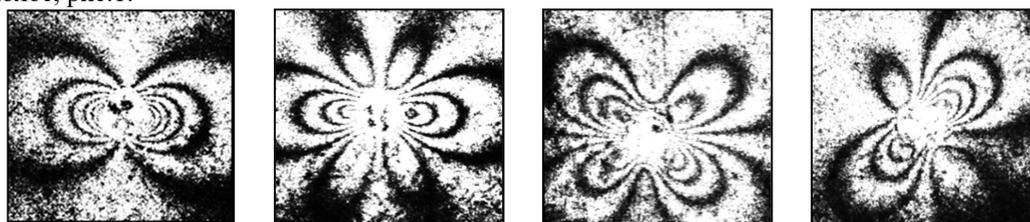


Рис. 1. Типичные спекл-интерферограммы полей тангенциальных перемещений в зоне отверстий-индикаторов.

Специалистами ИМАШ РАН выполнен комплекс методических, аппаратных и программных разработок в плане совершенствования и модернизации указанного подхода. На их основе проведены исследования распределений остаточных напряжений в материалах (в том числе, композитных) и в элементах реальных конструкций в лабораторных (на стационарном оптическом стенде) и полевых условиях, рис.2. Последнее было обеспечено созданием малогабаритного автономного спекл-интерферометра, а также специализированной оснастки к нему [4]. Совершенствование данного опытного образца с учетом отмеченных его технико-эксплуатационных особенностей позволит создать в ближайшем будущем полноценный измерительный прибор, рекомендуемый для широкого использования в очерченном круге задач.

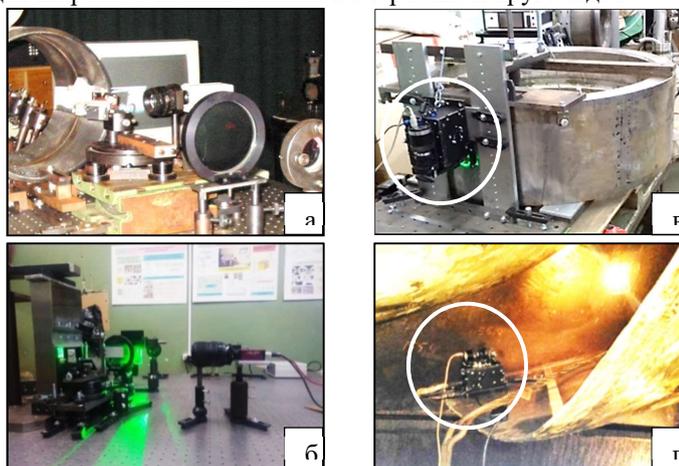


Рис. 2. Проведение экспериментов в лабораторных (а, б) и в полевых (в, г) условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 18-08-00572).

Список литературы

1. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. 233 с.
2. Разумовский И.А. Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. М.: Изд. МГТУ, 2007. 240 с.
3. Махутов Н.А., Гаденин М.М., Одинцев И.Н., Разумовский И.А. Развитие методов расчетного и экспериментального определения локальных остаточных напряжений при сложных спектрах нагружения. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 6. С.53-62.
4. Апальков А.А., Одинцев И.Н., Плугатарь Т.П., Усов С.М. Автономный спекл-интерферометр для определения остаточных напряжений и его апробация в натурных экспериментах. Труды конференции «Живучесть и конструкционное материаловедение (ЖивКоМ-2016)» – 2016. – С.136-140.

БУРОВОЙ РАСТВОР, ПОЗВОЛЯЮЩИЙ ОБЕСПЕЧИТЬ СОХРАНЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ. ОСОБЕННОСТИ ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ ТАМПОНАЖНОГО РАСТВОРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РАЗОБЩЕНИЯ ПЛАСТОВ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

Артамонов В.Ю.¹, Аверьянов А.П.¹, Султанов Д.Р.¹, Султанова И.И.¹, Кузнецов Р.Ю.²

¹Институт машиноведения РАН, г. Москва, Россия

²Gazprom International, г. Санкт-Петербург, Россия

Проведенный анализ показал, что создание буровых растворов, обладающих пониженной величиной водопроницаемости глинистой корки и гидрофобными свойствами, позволяющих эффективно сохранить коллекторские свойства пласта и обеспечить герметизацию заколонного пространства является актуальной задачей для многих месторождений.

Исходя из проведенного экспериментального анализа [3], можно сделать вывод, что увеличение производительности скважины должно быть связано в первую очередь с ослаблением действия капиллярных концевых эффектов или их полного исключения. С этой целью необходима обработка призабойной зоны скважины реагентами, изменяющими смачиваемость породы, благодаря чему снижается повышенная водонасыщенность и увеличивается расход нефти.

Значительно повысить качество вскрытия позволяют малоглинистые полимерные растворы. Создание таких растворов возможно путем исследования и выбора реагентов из класса высокомолекулярных соединений для их обработки и использования в качестве утяжелителя карбонатных материалов. С этой целью были исследованы высокомолекулярные соединения на основе целлюлозы - карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ) и натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы (Na-КМЦ), а в качестве утяжелителя применялся мел и доломит.

Так же были проведены исследования по снижению глинистой составляющей в составе бурового раствора и замены ее карбонатным утяжелителем. Применение таких растворов при вскрытии продуктивного пласта позволяет максимально сохранять его коллекторские свойства благодаря низкому содержанию глинистой составляющей и формированию на стенках скважины легко удаляемой фильтрационной корки, состоящей до 90% из кислоторастворимого компонента – мела или доломита.

Проведенные исследования показали, что сформированная фильтрационная корка из гидрофобных малоглинистых меловых растворов после создания на ней защитного мелового экрана более стойкая к полиминеральной агрессии ПДВ, и величина проницаемости их по воде после выдержки в ПДВ в 3-4 раза ниже, чем у защищенной фильтрационной корки из глинистого раствора. Также, ввод гидрофобизаторов в буровой раствор придает частично гидрофобные (водоотталкивающие) свойства глинистой фазе бурового раствора, в результате чего снижается проницаемость сформированных корок по воде.

При создании защитного мелового экрана частицы мела, проникая между агрегатами, уплотняют корку, препятствуя тем самым проникновению через нее воды.

Процесс цементирования скважин в значительной степени определяется физико-химическими свойствами тампонажных растворов. Знание и умение управлять такими свойствами тампонажных растворов, как сроки схватывания и загустевания, подвижность и седиментационная устойчивость являются залогом успешного проведения процесса цементирования и безаварийности работ.

Как показали наши исследования, на основные технологические характеристики тампонажной суспензии может оказать положительное влияние волновая обработка в процессе ее приготовления и прокачивания по трубам и затрубному пространству. Нами проведены эксперименты по влиянию волновой обработки на указанные технологические характеристики. Эксперименты показали, что сроки схватывания уменьшаются на 10-15%, и на 30-40% сокращается время от начала до конца схватывания у образцов, подвергнутых волновой обработке в сравнении с контрольными.

Проведенные исследования также показали, что прочность образцов из цементного раствора, подвергшегося волновой обработке, на 18-20% выше прочности контрольных образцов. Исследуя зависимость прочности камня, сформировавшегося из тампонажного раствора, волновая обработка которых проводилась в различное время от начала затворения, мы определили, что наибольшее увеличение прочности камня приходится на время приложения активации в пределах от 60 до 120 минут от начала затворения. Минимальная проницаемость для камня, твердевшего двое суток, приходится на тот же временной интервал порядка от 60 до 180 минут.

Снижение проницаемости цементного камня, приготовленного из раствора, подвергшегося волновой обработке, очевидно, объясняется более глубокой и полной гидратацией зерен исходного клинкера, что приводит к увеличению новообразований в единице объема и созданию мелкокристаллической структуры цементного камня.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Воздействие волнового поля на начальной стадии коагуляционного твердения в суспензии цемента приводит к формированию прочной и плотной структуры твердеющего цементного камня, при этом

прочность цементного камня в зависимости от частоты волновых воздействий возрастает на 18-20%, сроки начала схватывания уменьшаются на 15% и на 30-40% сокращается время от начала до конца схватывания.

2. Воздействие волнового поля на стадии формирования кристаллизационной структуры приводит к необратимому разрушению возникающих кристаллизационных контактов и связей и как следствие к потере прочности и увеличению проницаемости камня.

Результаты проведенных исследований явились предпосылкой для разработки технологии изоляции водо- и нефтепроницаемых пластов при их первичном вскрытии в процессе бурения.

Список литературы

1. Юсупов И.Г. и др. Исследование физико-химических процессов контактной зоне "цементный камень-глинистая корка-порода" применительно к решению проблемы водопроявления. –Труды ТатНИПИнефть, вып. XXII, Казань, 1973, 127с.
2. Городнов В.Д. Физико-химические методы предупреждения осложнений в бурении. - М.: Недра,1988,- 250 с.
3. Кузнецов Р.Ю. Строительство и эксплуатация нефтяных и газовых скважин открытым забоем с использованием волновых технологий // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Уфа – 2010.
4. Смирнов А.В., Баишев А.Б. Отчет о лабораторных исследованиях фильтрации взвеси образца НВДМ различной концентрации в пористых средах. – М.: ВНИИнефть. – 1996, - 9 с.
5. Баишев А.Б., Смирнов А.В. Отчет о лабораторных исследованиях фильтрации взвеси образца «Полисил» и его модификаций в пористых средах. – М.: ВНИИнефть. – 1997. – 15 с.
6. Модифицированные дисперсные кремнеземы в технологиях водоизоляции / Сагидуллин И.А., Султанов И.К., Блинов С.А. //Нефть. Газ. НОВАЦИИ, №6/2010, стр.67

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДВУХКОМПОНЕНТНЫХ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ НАПЫЛЕНИЕМ

Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (vearkhipov@mail.ru)

Как правило, при работе пар терния скольжения поверхность испытывает ударные нагрузки и нагрев, что при наличии процесса изменения структуры может сопровождаться снижением механических свойств и разрушением подшипника. Поэтому, целью настоящей работы является исследование механических свойств покрытия на основе частиц меди и цинка, нанесенного методом холодного газодинамического напыления, после его нагрева в печи с разным временем выдержки.

Исследование механических свойств покрытия на основе частиц меди и цинка осуществляется с использованием двух методик. По первой методике образцы с нанесенным покрытием испытываются при растяжении методом «кольцевого отрыва» [1].

Во второй методике используется метод инструментального индентирования шара (ГОСТ Р 56232 – 2014), при котором в нанесенный слой металла вдавливается шарик диаметром 18 мм при нагрузках 500 Н, 1000 Н и 1500 Н. На основе измеренных и расчетных данных строится зависимость модуля упругости, максимальной и остаточной деформации от параметров термической обработки. Анализ полученных результатов показывает, что когезионная прочность металла покрытия в исходном состоянии имеет величину 78 МПа, что несколько ниже, чем когезия покрытия меди (88) и цинка (95), нанесенного при аналогичной температуре напыления. Термическая обработка вызывает снижение когезии до уровня $\approx 42,6$ МПа и это связано с формированием различных электронных соединений фаз (рис.1).

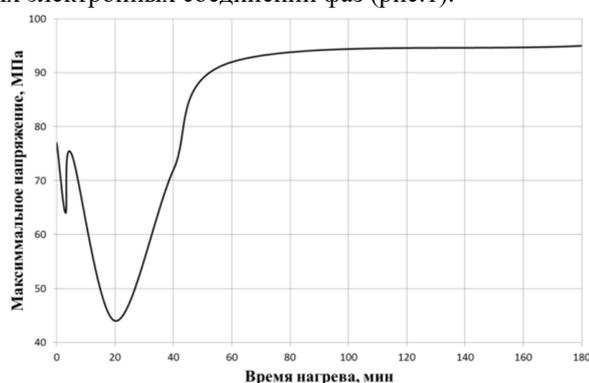


Рис. 1. Зависимость когезионной прочности покрытий на основе смеси частиц меди и цинка от времени термической обработки при температуре 405-415°C.

Сопротивление металла покрытия деформированию при индентировании резко снижается ($h_{\max}=0,105$ мм) после термической обработки в течение 3, 10, 20 или 60 мин, что также обусловлено выпадением электронных соединений и перестройкой структуры.

Анализируя полученные результаты можно отметить, что изменения в структуре покрытия на основе частиц меди и цинка оказывают влияние на сопротивление металла деформации («жесткость») и остаточную деформацию («пластичность»). Исходя из диаграммы состояния медь – цинк исследованное покрытие типа латуни нельзя получить с помощью металлургического процесса плавки латуни и поэтому необходимо проводить дальнейшее изучение свойств формируемого после термической обработки слоя металла, особенно в области трибологии [2].

Термическая обработка покрытия на основе частиц меди и цинка при температуре 405-415°C и времени выдержки 3 мин и 20 мин значительно снижает когезионную прочность металла покрытия с 78 МПа до 64,6 МПа и до 42,6 МПа, что может быть связано с выпадением γ и β' фаз. Модуль упругости металла покрытия уменьшается по отношению к исходной величине после термической обработки при времени выдержки 3, 20 и 60 мин. После выдержки в печи в течение 5, 40 и 180 мин его величина превышает исходную и составляет более 23000 Н/мм^2 . Рассматривая совокупность полученных результатов можно отметить, что термическая обработка в течение 5, 40 и 180 мин может обеспечить покрытие высокие когезионные свойства, а также способность сопротивляться деформированию, что очень важно при эксплуатации подшипников трения скольжения.

Список литературы

1. Газодинамическое напыление: структура и свойства покрытий/ В.Е. Архипов, А.Ф. Лондарский, Г.В. Москвитин, М.С. Пугачев. М.: КРАСАНД, 2017. 240 с.
2. Иванов В. Н. Словарь-справочник по литейному производству. М.: Машиностроение. 1990. 384 с.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Асфандияров Ш.А.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (asfandiyarov@imash.ac.ru)

В работе рассматривается способ построения теоретической модели, описывающей акустические метаматериалы (АММ или резонансные звукопоглотители) на основе резонаторов Гельмгольца. Составление теоретической модели необходимо для анализа экспериментальных результатов измерения коэффициента поглощения АММ в трубе Кундта. Исследуются поглотители эффективные в низком диапазоне частот (50-500 Гц). Поскольку длина волны много больше характерных размеров резонаторов, поглотитель можно описать интегральной характеристикой – эффективным импеданс Z_{eff} , который равен отношению акустического давления падающей волны p к средней колебательной скорости на поверхности поглотителя v_{eff} :

$$Z_{eff} = \frac{p}{v_{eff}}, \quad (1)$$

$$v_{eff} = \sum_n v_n \frac{S_n}{S}, \quad (2)$$

где v_n колебательная скорость воздуха в n -ом входном отверстии резонатора при заданной падающей волне с акустическим давлением p , S_n – площадь отверстия, S – площадь поглотителя.

С помощью этой величины можно рассчитать коэффициент поглощения акустического метаматериала α :

$$\alpha = 1 - R^2, \quad (3)$$

где R – коэффициент отражения плоской акустической волны, рассчитываемый с помощью эффективного импеданса поверхности Z_{eff} .

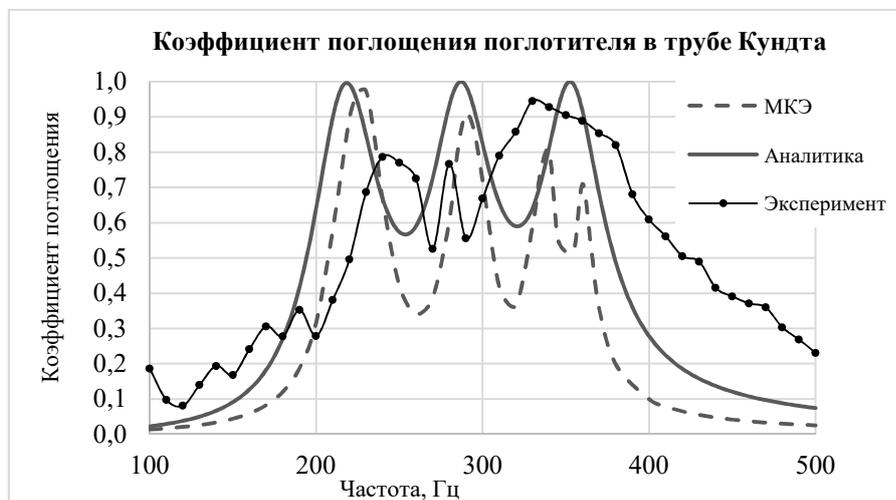


Рис.1 Частотная зависимость коэффициента передачи

Также в работе приводятся результаты численного моделирования акустических метаматериалов методом конечных элементов (МКЭ) в среде COMSOL Multiphysics. В основе численной модели лежат уравнения гидродинамики для вязких сред, а также учитываются эффекты потери энергии на стенках метаматериала за счет трения и теплопроводности. На рис. 1 приведены результаты расчета коэффициента поглощения АММ рассчитанные с помощью МКЭ и аналитически, а также экспериментальные данные.

Список литературы:

1. Y.I. Bobrovnikskii, Impedance approach to modeling and designing acoustic metamaterials IEEE Xplore Digital Library (2016 г.)
2. Бобровницкий Ю.И., Томилина Т.М. Поглощение звука и метаматериалы (обзор) Акустический журнал (2018 г.)

ВЫЯВЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

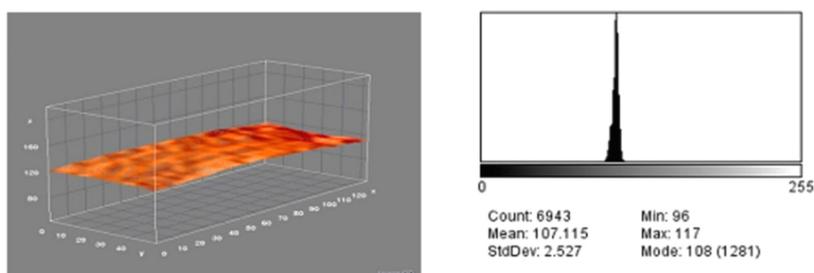
Ахметханов Р.С.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

Цель работы заключается в поиске новых подходов к анализу изображений тепловых полей – определение структурных свойств материалов.

Рассмотрим способ определения структурных свойств композиционных материалов с помощью метода теплового неразрушающего контроля (ТНК)[1]. В тепловых методах неразрушающего контроля в качестве пробной энергии используется тепловая энергия, распространяющаяся в объекте контроля. Температурное поле поверхности объекта является источником информации об особенностях процесса теплопередачи, которое, в свою очередь, зависит от структуры материала, наличия внутренних или наружных дефектов.

Для определения наиболее значимых параметров, отражающих структуру материала, при термодиагностике композиционных материалов активным методом был проведен эксперимент. Изображение температурного поля отражает неравномерность структуры материала (рис.1).



а

б

Рис. 1. Результаты исследований по второму образцу:
а - температурное поле после выдержки образца 30 минут;
б – гистограмма распределения температуры и в тепловом поле.

Получены статистические характеристики изображений: теплового поля при нагреве и охлаждении образца. Размерность геометрических данных является условной, так настроена программа. При охлаждении геометрические характеристики изображения увеличиваются, а асимметрия и эксцесс распределения плотности вероятности уровня окраса пикселей (0...255, рис. 1а) изображения теплового поля уменьшаются.

Для анализа структурных характеристик образца были применены следующие показатели: функционалы Минковского, решетки Браве [2] и мульти-фрактальные спектры [3]. На рис. 2 приведен вид решетки для образца из композиционного материала при охлаждении до температуры 22 °С .

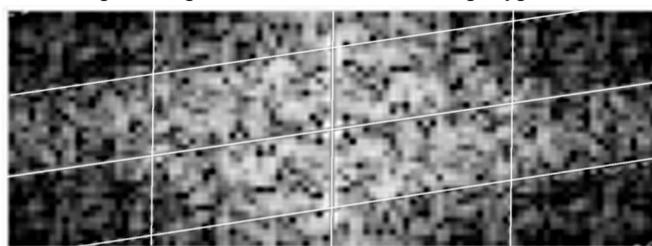


Рис. 2. Решетка Браве для образца из композиционного материала при температуре 22 °С.

Мульти-фрактальные спектры определяют масштабные свойства структуры материала и степень неоднородности. При нагреве образца тепловое поле является однородным, а после охлаждения становится неоднородным.

Таким образом, в докладе показывается, что активным методом тепловой диагностики можно выявить не только наличие дефекта, но определить неоднородность структуры материала.

РАЗВИТИЕ БЕЗОПАСНЫХ МАШИН И ПРОЦЕССОВ

Ахметханов Р.С.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

Работа направлена на создание научно-методических основ обеспечения безопасности и процессов. Данный вопрос решается на основе теории риска, которая является основой для экономических, научно-технических, правовых и социальных методов обеспечения безопасности техно-сферы, населения и окружающей среды.

Теория риска оперирует следующей зависимостью $R=P \cdot U$, определяющую величину риска R [1]. В этом выражении P – вероятность возникновения катастрофы или аварии, а U – возможный ущерб.

В рамках теории риска при обеспечении безопасности машин и процессов используемые подходы и методы зависят от стадий жизненного цикла. В стадии эксплуатации обеспечение безопасности этих объектов реализуется в зависимости от внешних угроз следующими видами защиты – жесткая, функциональная и охранная. А для обеспечения их безопасности предусматриваются средства диагностики и мониторинга.

При технической диагностике используются данные в виде временных рядов или изображений, получаемых с помощью различных приборов и оборудования предназначенных для технической диагностики и мониторинга. Они служат для обнаружения признаков, которые могут определить вероятность возникновения аварии. Для этого используются различные методы. Поэтому существует необходимость разрабатывать методы и подходы извлечения новых знаний из данных любой размерности. Основой единого подхода к решению этой задачи может быть теория фракталов [2].

В теории фракталов различают моно и мульти-фракталы. По отношению к динамическим процессам они делятся на моно-фрактальные и мульти-фрактальные процессы.

Очень многие сигналы, которые приходится анализировать на практике, могут быть рассмотрены в качестве представителей специального класса мульти-фрактальных процессов. В физике, химии, биологии и других науках встречается много явлений, которые требуют распространения понятия фрактала на сложные структуры с более чем одним показателем скейлинга. Такие структуры часто характеризуются целым спектром показателей, и размерность Хаусдорфа является лишь одним из них.

Если простые (или моно-фрактальные) сигналы являются однородными в том смысле, что их масштабные свойства остаются неизменными в любом частотном диапазоне, то мульти-фрактальные процессы допускают разложение на подмножества (участки) с различными локальными масштабными свойствами.

Моно-фрактальные сигналы являются однородными в том смысле, что их скейлинговые характеристики остаются неизменными в любом диапазоне масштабов. Спектр плотности мощности таких сигналов имеет вид $S(f) \sim f^{-\beta}$ и не меняется в широком частотном диапазоне, то есть показатель степени β представляет собой постоянную величину, такие закономерности носят название степенных законов [3].

Рассмотрим мульти-фрактальные спектры диагностических данных временных рядов $A_1(t)$, $A_2(t)$ и $A_3(t)$, члены которых представляют значения вибрационного ускорения (m/s^2) для подшипника качения указанные в последовательности с течением времени (рис.1). Позиция 3 соответствует подшипнику с дефектом. Мульти-фрактальные спектры показывают, что в период перед возникновением повреждения подшипника ширина спектра увеличивается, сигнал становится более сложным по масштабным характеристикам, неравномерности меры.

Данный метод анализа диагностических данных пригоден и для изображений. Мульти-фрактальный спектр содержит несколько фрактальных размерностей: информационная размерность, фрактальная размерность и экстремальные значения фрактальной размерности, отвечающие степени разреженности мульти-фрактального множества. Они определяют качественную и количественную характеристику масштабных свойств диагностических данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект №14-19-00776-П).

Список литературы

1. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Научные основы техногенной безопасности//Абросимов Н.В., Агеев А.И., Адушкин В.В., Акимов В.А., Алешин А.В., Алешин Н.П., Асмолов В.Г., Афиногенов Д.А., Ахметханов Р.С., Баландин Д.В., Пермяков В.Н., Баранов В.В., Бармин Н.В., Барышов С.Н., Белов П.Г., Белозеров А.С., Беляев И.И., Берман А.Ф., Болотник Н.Н., Большаков А.М. и др. – М: МГОФ «Знание», 2015. - 936 с.
2. Ахметханов Р.С. Применение теории фракталов в исследовании динамических свойств механических систем//Проблемы машиностроения и автоматизации. 2003, № 3. С. 47-53.
3. Ахметханов Р.С. Особенности распределений спектральной плотности мощности фрактальных и мультифрактальных процессов//Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018, № 3. С. 37-43

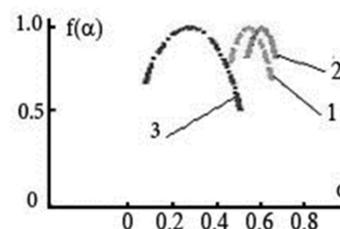


Рис. 1. Мульти-фрактальные спектры для временных рядов характеризующих подшипник качения в неповрежденном и поврежденном состоянии: 1- $A_1(t)$, 2 - $A_2(t)$, 3 - $A_3(t)$.

РОБОТОТЕХНИКА. ВНЕДРЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ И МАШИННОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ПОВСЕДНЕВНУЮ ЖИЗНЬ.

Баженова Н.Э.

Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)
(nad110508@gmail.com).

Информационные системы, современные гаджеты плотно вошли в повседневную жизнь каждого из нас. Они позволяют справиться с огромным потоком информации, упростить и ускорить выполнение сбора, анализа, сортировки большого объема данных. Это всевозможные банковские системы, переводчики, различные базы данных. Большим преимуществом информационных систем является возможность исключить, так называемый «человеческий фактор», уменьшить вероятность ошибки. Именно поэтому данная отрасль вызывает большой интерес у представителей разных сфер жизни.

Стремительное развитие науки в данной области открыло возможность для человека: использовать компьютер не только в качестве помощника, но и как эксперта в решении сложных вопросов. Крупные международные компании (IBM, Яндекс, DEC) и исследовательские университеты (Стэнфордский университет и др.) занимаются разработкой таких систем. Экспертные системы нашли применение 1) в диагностике: анализ неисправностей и выдача возможных нарушений; 2) в решении задач с большим числом переменных (задача Эйнштейна, производственные задачи); 3) в анализе информации (PROSPECTOR, HASP/SIAP); 4) в планировании различных процессов, результатов экспериментов; 5) в медицине (Dendral, Mycin).

На мой взгляд, развитие экспертных систем в области медицины является наиболее перспективным и прибыльным направлением. На данный момент, большое количество людей готово пользоваться платными медицинскими услугами с целями 1) получения консультации квалифицированного специалиста, 2) ускорения обследования, 3) постановки диагноза. По данным, полученным при анализе опроса пациентов, было выявлено, что наиболее долгой, неэффективной процедурой медицинского обслуживания является первичное обследование организма, сопровождающееся сбором общих анализов. Поэтому я решила попробовать себя в роли разработчика информационной системы, создав примитивную экспертную систему на языке логического программирования Prolog, имитирующую действия врача на первичном приеме. Программа анализирует состояние больного, ставит предварительный диагноз, либо при необходимости направляет на дополнительное обследование. В дальнейшем планируются развитие этой системы, добавление функции синтеза естественной речи, реализация оптического и акустического распознавания с целью уменьшения стресса и завоевания доверия пациента.

Существуют системы, имеющие подобную тематику. Когнитивная система Watson обладает функцией точного глубокого анализа естественного языка, но сложность ее механизма и внушительная стоимость не дают широкого распространения в обычной жизни. Система Mycin имеет принципы работы, подобные моей системе, однако сложный механизм работы и трудность обработки и хранения базы знаний не позволили ей приобрести популярность. Существенным недостатком является требование мощного оборудования, что также исключает идею массового распространения.

На сегодняшний день проблема создания доступных, понятных интеллектуальных систем остается открытой. Развитие инновационных технологий дает большие перспективы усовершенствования этих систем. Именно поэтому данная тема интересует молодых ученых и специалистов по всему миру.

ТЕОРИЯ МОДУЛЬНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Базров Б.М.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (modul_lab@mail.ru).

Модульная технология – новый метод организации механосборочного производства. Известно три типа технологии: единичная, типовая и групповая.

Единичная технология учитывает все особенности предмета производства, но при этом отличается высокой трудоемкостью технологической подготовки производства.

Типовая технология направлена на снижение трудоемкости технологической подготовки производства, однако типовые технологические процессы не учитывают все особенности предмета производства и требуют доработки.

Групповая технология направлена на повышение эффективности мелкосерийного производства, за счет специализации рабочих мест под изготовление одних и тех же наборов поверхностей у разных деталей. Недостатком групповой технологии являются высокая трудоемкость технологической подготовки производства, а в случае изменения номенклатуры изготавливаемых деталей требуется изменение специализации рабочих мест и связанная с этим дополнительная трудоемкость технологической подготовки производства.

Модульная технология аккумулирует все преимущества перечисленных технологий, то есть учитывает все особенности предмета производства, идеи типизации используются на уровне модулей поверхности деталей и обеспечивает специализацию рабочих мест в условиях мелкосерийного производства и в дополнение технологический процесс приобретает гибкость не за счет использования дорогостоящего широкоуниверсального технологического оборудования с избыточными технологическими возможностями, а за счет возможности изменения маршрута движения предмета производства по рабочим местам.

В основе модульной технологии лежит представление детали совокупностью модулей поверхностей (МП), где МП – сочетание поверхностей, предназначенных для выполнения служебной функции.

Классификация МП по служебному признаку делит МП на три класса – базирующие, рабочие и связующие. В свою очередь каждый из МП имеет свою классификацию по признакам: конструкция, размеры, соотношения размеров, уровень точности.

Описание конструкции изделия на модульном уровне производится с помощью графа иерархической структуры в следующей последовательности:

- построение графа узлов и деталей, не входящих в состав узлов;
- построение графа деталей изделия;
- построение графа МП деталей.

При описании изделия совокупностью модулей в качестве модулей выступают модули функциональные технологические и модули функциональные обслуживающие.

Технологические процессы изготовления деталей и сборки изделия разрабатываются методом компоновки из соответствующих модулей.

Деталь представляется совокупностью технологических МП, в основе которых лежат базирующие или рабочие МП с присоединением к ним связующих МП.

При разработке технологического процесса сборки вводится модуль соединения (МС), представляющий собой совмещение двух базирующих МП (прямого и ответного). Его множество ограничено семью наименованиями.

В основе реализации модульной технологии лежит элементная база средств технологического обеспечения (ЭБТО), согласно которой каждому МП соответствует модуль технологического процесса его изготовления, а последнему – модули средств технологического оснащения (модули станочного оборудования, модули инструмента, приспособления, контрольно-измерительного устройства, модули управляющей программы).

При организации производственного процесса рабочее место создается под реализацию соответственно МП и МС с их модулями технологического обеспечения.

Таким образом, создание механосборочного производства должно базироваться на производственной цепочке: МП, МС – модули средств технологического обеспечения – модули рабочих мест.

Внедрение модульной технологии в машиностроительное производство позволит:

1. Разработать систему взаимосвязанных классификаций предметов производства, технологических процессов, оборудования и оснастки на модульном уровне.
2. Создать единую элементную базу средств технологического обеспечения независимо от выпускаемых изделий и объема выпуска изделий.
3. За счет наличия элементной базы средств технологического обеспечения представить в емкой форме все существующие и вновь создаваемые технологии изготовления деталей и сборки изделий, технологического оборудования и оснастки и определять направление их дальнейшего развития.
4. Определять номенклатуру выпускаемых металлорежущих станков и создавать станки с минимально необходимыми технологическими возможностями.
5. Снизить трудоемкость технологической подготовки производства за счет разработки методом компоновки технологических процессов, оборудования и оснастки из соответствующих модулей.
6. Формировать производственную программу по выпуску изделий на уровне МП, МС и тем самым повысить точность расчета потребностей в технологическом оборудовании и оснастке для ее выполнения.

НАПРАВЛЕННОСТЬ ФЛАТТЕРА ЛОПАТОК ТУРБОКОМПРЕССОРА

Балакшин О.Б.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

Флаттер авиационного турбокомпрессора является многомерным переходным процессом с неограниченными амплитудами колебаний лопаток ротора. В связи с большой сложностью процесса флаттер изучается преимущественно экспериментально в частотной области [1]. При анализе флаттера важно установить, прежде всего, направленность его процесса: развитие или затухание. Флаттер возникает в результате процесса синхронизации частот лопаток. Он объединяет с высокой точностью колебания нескольких десятков лопаток до единой (коллективной) частоты, на которой возникает резонанс. Общее негармоническое колебание с частотой ω_1 складывается из гармонических колебаний с частотами ω_1 , $\omega_2 = 2\omega_1$, $\omega_3 = 3\omega_1$ и т.д. В относительном виде имеет место форма натурального ряда: 1, 2, 3, ... Задача анализа по опытным данным поведения сложных систем является междисциплинарной проблемой. Она связана с методами метафизики и самоорганизации гармонии [2-4]. Возникает вопрос о связи натурального ряда целочисленных величин с иррациональными числами, наблюдаемые на опыте? В данной работе фактический режим процесса устанавливается по величине масштабов рядов опытных данных [3, 4]. Масштаб ряда, как показал метрологический анализ, зависит от способа деления его единичного (масштабного) отрезка. В качестве его может служить, например, период основной гармоник [3]. Способ деления отрезка определяется характерной константой. В случае натурального ряда отрезок делится пополам. Масштабы самоорганизации гармонии зависят от ряда констант и часто делятся по золотому сечению. Впервые это деление периода пульса ЭКГ здорового сердца людей обнаружили в Научном биологическом центре РАН г. Пущино. В ИМАШ проблема нормы ЭКГ исследовалась совместно с Кардиологическим Научно-Производственным Центром (РКНПЦ) академика Е.И. Чазова. В основу нормы положена оптимальность соотношения этапов работы сердца: время работы относится к отдыху как $0,618/0,382 = 1,618$. Спектр частот сердца структурно имеет форму арифметической прогрессии: q (1, 2, 3, ...). Ее масштабы $q = 1,027$ (или q_0) равны разности $a_{n+1} - a_n = q$ или отношению $a_n / a_N = q$, где индекс N относится к натуральным числам. Он наблюдается в известных рядах самоорганизации Фибоначчи и Люка. Обратный масштаб $q_0 = 1/q = 0,972$ определяет антиразвитие (затухание). Спектр асимметричных колебаний сердца, установленный при помощи метода Прони, отображает гарантированное присутствие в процессе константы золотого сечения для разных пульсов человека в состоянии покоя (табл. 1). Гармоники сердца людей кратны частоте пульса, выражаются иррациональными числами и следуют прогрессии с масштабом близким $q = 1,027$ [3, 4].

Таблица 1. Масштаб гармоник сердца

Гармоники	1,3	2,678	4,017	5,356	6,695	8,034	9,37	10,712
Ряд саморазвития	1,03	2,06	3,09	4,12	5,15	6,18	7,21	8,24
Масштаб	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03

Негармоническое колебание давления потока с частотой ω_1 в системе координат, связанной со статором компрессора, также получается в результате сложения гармонических колебаний [4]. Структура этих свойств спектра имеет признаки гармонии проекта нормы ЭКГ сердца людей. В табл. 2 представлен спектр гармоник по методу Прони колебаний потока сжатого воздуха в турбокомпрессоре. Определим направленность флаттера по масштабам гармоник для начала этапа синхронизации частот колебаний лопаток.

Таблица 2. Масштаб гармоник турбокомпрессора

Гармоники	62,305	123,023	185,909	248,389	310,501
Разность гарм.	0	60,718	62,886	62,480	62,112
Ряд самоорг.	0,972	1,974	2,984	3,987	4,983
Масштаб	0,972	0,987	0,995	0,996	0,997

Представленное соотношение гармоник сжатого воздуха является признаком самоорганизации гармонии табл. 1. Это подтверждается величиной разности гармоник. Определим локальные масштабы гармоник, используя свойства арифметической прогрессии, которому следует анализируемый ряд. Локальные масштабы членов ряда равны последовательно данным строки 1, деленным на произведение первого члена на порядковый номер гармоник. Для первой гармоник имеем: $62,305 \cdot 0,972 / 62,305 = 0,972$; для второй $123,023 / 62,305 \cdot 2 = 0,987$ и т.д. Нецелочисленное соотношение гармоник сжатого воздуха является признаком золотого масштаба чисел. Анализ показал, что флаттер лопаток ротора находится в начале переходного процесса самоорганизации. На это указывают масштабы меньше единицы. Развитие флаттера завершается при $q = 1,029$.

Список литературы

1. Ганиев Р.Ф., Балакшин О.Б., Кухаренко Б.Г. Срывной флаттер при неполной синхронизации колебаний лопаток турбокомпрессора. Доклады Академии наук. 2010. Т. 431. № 1. С.36–38.
2. Владимиров Ю.С. Метафизика. М., «Бином», 2002. 534 с.
3. Балакшин О.Б. Гармония – новая роль в естествознании. Изд. М.: ЛЕНАНД, 2016. 328 с.
4. Балакшин О.Б. Метафизика самоорганизации гармонии. Метафизика. № 3 (29). Москва, 2018.

ПРОГРЕССИВНЫЙ МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД ПРИ СОЗДАНИИ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Барденхаген А.¹, Раков Д.Л.², Печейкина М.А.³

¹Институт авиации и космонавтики Берлинского технического университета, Берлин, Германия;

²Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (rdl@mail.ru);

³Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия.

В инженерной практике обычно отсутствуют методы, которые позволяют по условиям технического задания выбрать рациональное технологическое решение (ТР). Поэтому процесс разработки носит итеративный характер. Вначале разработчик определяет некоторое множество альтернатив, к которому принадлежит проектируемая технологическая система (ТС), а затем пытается его сузить, опробовать несколько ТР, и выбрать то, которое является наиболее рациональным.

Предметом поиска является достижение некоторых компромиссных уровней для ряда противоречивых критериев. Последовательность вычислительных операций для нахождения оптимума в алгоритме проектного расчета отображается целевой функцией. Вместе с тем эта функция не соответствует основным требованиям теоретических методов оптимизации, так как она разрывна; не всегда может быть определена; существует в операторной записи; не базируется на аналитических выражениях; не дифференцируема; не униомодальная; не сепарабельна и не аддитивна. Особенностью является также то, что невозможно аналитически моделировать гиперповерхность целевых функций и прогнозировать их изменение на шаге приращения переменных [1]. Все множество методов постановки и решения задач структурного синтеза можно разбить на два класса: трансформационные и морфологические. На стадии морфологического анализа надо получить морфологическое множество решений - описание потенциально возможных ТР данной задачи [2,3]. Морфологический подход широко применяется в Германии. Морфологические методы по частоте использования занимают первое место среди дискурсивных подходов.

Для уменьшения размерности морфологического множества решений предложен прогрессивный морфологический метод, который заключается в последовательности операций генерации, сравнения и отбора множества рациональных вариантов (кластеров) технических решений при помощи ряда последовательных процедур [4-6]. Подход продемонстрирован для анализа и синтеза технологических процессов для установок микродугового оксидирования [7]. Мощность морфологического множества возможных схем технологических процессов равна 20736 вариантам. Был выбран ряд обоснованных критериев, характеризующих конструктивные и экономические показатели ТР. Затем были сгенерированы 1648 вариантов методом случайного перебора и отобрано множество рациональных вариантов с максимальными оценками. В соответствии с выбранным техническим решением создана экспериментальная установка с возможностями регулирования процессов (по величине и геометрии тока, напряжения, частотным характеристикам и соотношению анодной и катодной составляющих) [8-10].

Предлагаемый подход дает уточнение и упорядочение структуризации решаемой задачи. При этом повышается степень обоснованности принимаемых решений и увеличивается множество вариантов, среди которых производится выбор, что дает возможность повысить качество (технический уровень) разрабатываемых ТС. На ранних этапах подход позволяет проводить поиск инновационных ТР, формировать кластеры вариантов, генерировать множество рациональных вариантов и осуществлять выбор и оценку ТР для последующего моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке немецкого национального исследовательского общества (DFG, German Research Foundation) – (код проекта 407995419).

Список литературы

1. Мишин В.П., Осин М.И. Введение в машинное проектирование летательных аппаратов. 1978. 128 с
2. Одрин, В.М. Метод морфологического анализа технических систем. - М.: ВНИИПИ, 1989. - 309 с.
3. Zwicky F. Morphology of aerial propulsion *Helvetica Physica Acta*. – 1948. – Vol. XXI. – Heft 5. – S. 299–340.
4. Раков Д. Л. Прямые и обратные задачи структурного синтеза при поиске новых технических решений. Информационные технологии в проектировании и производстве. 2007. -№ 2. -С. 42-49.
5. Раков Д.Л., Синев А.В. Параллельное проектирование на этапах структурного синтеза и параметрической оптимизации при формировании облика новых технических систем. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2011. № 4. С. 99-102.
6. Гаврилина Л.В., Печейкина М.А., Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю.. Структурный синтез и анализ при разработке инновационных технологических процессов на базе прогрессивного морфологического подхода Проблемы машиностроения и автоматизации. 2017. № 4. С. 137-145.
7. Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В., Людиг В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. М.: Техносфера, 2011. 464 с.
8. Klimentko B., Rakov D. Analysis and Synthesis of Innovative Engineering Solutions and Technologies Based on Advanced Morphological Approach. In: Hu Z., Petoukhov S., He M. (eds) *Advances in Artificial Systems for Medicine and Education. AIMEE 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 658. Springer, Pp. 274-283.
9. Bardenhagen, A.; Gavrilina, L. V.; Klimentko, B. M.; Pecheykina M.A., Rakov D. L., Statnikov I. N. A Comprehensive Approach to the Structural Synthesis and Evaluation of Engineering Solutions in the Design of Transportation and Technological Systems (2017). *Journal of machinery manufacture and reliability*, Nr. 46. Pp. 453-462
10. Клименко Б.М., Раков Д.Л., Торбек Ю. Патент РФ на изобретение № 2413040. Устройство для нанесения покрытия микродуговым оксидированием вентильных металлов и сплавов. Дата публикации 27.02.2011. МПК C25D 11/02.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Бахтин Б.Н., Бобровницкий Ю.И.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (bakhtin@imash.ac.ru)

Акустические метаматериалы (АММ), используемые для проектирования эффективных поглотителей звука нового типа, представляют собой периодические структуры, составленные из ячеек малых волновых размеров сложной конструкции. Математическая модель АММ основана на импедансном подходе, так как он удобен при расчёте сложных составных колебательных систем. В рамках импедансной теории условия максимального поглощения звуковой энергии выражаются через импеданс поверхности поглотителя Z_t и импеданс излучения среды из которой падает волна Z_r следующим образом:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(Z_t) &= \operatorname{Re}(Z_r) \\ \operatorname{Im}(Z_t) &= -\operatorname{Im}(Z_r) \end{aligned}$$

Импеданс поверхности поглотителя Z_t является усреднённой эффективной величиной, так как падающая на поверхность АММ волна «видит» эту поверхность как однородную. Задача математического моделирования заключается в том, чтобы связать этот эффективный импеданс поверхности АММ с физическими входными импедансами отдельных ячеек, образующих АММ с учётом их взаимосвязи, если таковые имеются. Для расчёта входного импеданса трубки в математической модели учитываются потери волны в трубке, обусловленные двумя процессами: вязкими силами трения и теплопроводностью. Силы вязкого трения пропорциональны сдвиговому градиенту скорости, поток тепла от нагретых участков волны пропорционален градиенту температуры. Остальные потери, считаются пренебрежимо малыми. Потери учитываются методом замены в уравнениях 1) плотности ρ (учёт вязких потерь) и 2) модуля упругости K (учёт тепловых потерь) на комплексные величины:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0(1 + ih_v(\omega)) \\ K &= K_0(1 - ih_\chi(\omega)) \end{aligned}$$

где h_v , h_χ – функции частоты, зависящие от вязкости, теплопроводности, теплоёмкости и геометрических параметров ячеек.

Для верификации математической модели были сконструированы АММ двух типов: 1) на основе ячеек - резонаторов Гельмгольца и 2) на основе ячеек - четвертьволновых резонаторов. Для экспериментальной проверки была выбрана Труба Кундта, поскольку для неё существуют отработанные методики измерения звукопоглощения и импеданс излучения среды сводится к хорошо известному импедансу ортогонально падающей плоской волны. АММ обоих типов были сконструированы так, что коэффициент поглощения достигал максимальных значений в зонах резонансных частот. Зависимость коэффициентов поглощения от частоты, вычисленная на основании описанной математической модели, была подтверждена расчётами методом конечных элементов, выполненными в среде COMSOL. Коэффициенты поглощения, полученные в результате экспериментальных измерений, так же, в целом, совпали с коэффициентами, вычисленными на основании настоящей математической модели. Дальнейшие работы по верификации математической модели подразумевают: 1) улучшение самой модели, 2) улучшение качества АММ, изготавливаемых с помощью аддитивных технологий, 3) улучшения экспериментальной установки – переход к широкополосным импедансным трубам с современными алгоритмами обработки данных.

Предложенный метод математического моделирования АММ позволяет проводить параметрические исследования, т.е. изучать влияние геометрических и физических параметров на поглощающие свойства АММ, с помощью современных высокоуровневых языков (например MATLAB). Такие исследования существенно упрощают процесс конструирования АММ под заданные импедансные характеристики.

Работы по математическому моделированию АММ выполнялись в рамках успешно завершённого трёх-летнего проекта РНФ № 15-19-00284 и продолжаются в настоящее время.

ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВЫЕ УСЛОВИЯ РАБОТЫ КОНТЕЙНЕРА ПРИ ПРЯМОМ И ОБРАТНОМ ПРЕССОВАНИИ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Белов В. Г.

Российский технологический университет, Москва, Россия (vg@mgupr.ru).

Стойкость прессового инструмента во многом определяет эффективность процесса горячего прессования медных сплавов [1].

Контейнер является одним из основных видов рабочего прессового инструмента. Исследование и анализ температурных условий работы контейнера проводили для случая прямого и обратного горячего прессования на гидравлическом прессе.

Распределение температур по сечению и длине контейнера установлено с использованием полученных ранее зависимостей с учетом циклического характера нагрева: «прессование - пауза» от слитка к слитку.

Анализировали напряженное состояние контейнера при прямом и обратном прессовании труб из меди и латуни Л63 с учетом разных видов взаимного перемещения слитка в контейнере. Учитывали распределение напряжений по сечению и длине контейнера в зависимости от рабочих нагрузок, напряжений натяга и температурных напряжений для прессов с разной скоростной характеристикой, с использованием смазки контейнера при прессовании и без нее.

Результаты исследований подтвердили, что температурно-силовые условия работы контейнера при обратном прессовании более благоприятны, чем при прямом.

Список литературы

1. Прессование. Справочное руководство/ Баузер М., Зауер Г., Зигерт К. Перевод с немецкого. М.: «АЛЮСИЛ МВиТ», Москва, 2009. – С. 918.

РАСЧЕТНО – ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ УПРОЧНЕННЫХ СЛОЕВ И НАПЛАВЛЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Бирюков В.П.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия. (laser-52@yandex.ru).

Цель работы

Разработка методики расчета интенсивности изнашивания пар трения вал-вкладыш подшипника скольжения после лазерного упрочнения или наплавки шеек валов.

В современном машиностроительном производстве находят все большее применение технологии лазерного упрочнения и наплавки поверхностей трения быстроизнашивающихся узлов и агрегатов. Применение концентрированных источников энергии позволяет формировать поверхностные слои, которые обладают существенными преимуществами по сравнению со слоями, полученными традиционными методами поверхностного упрочнения, напыления и наплавки [1]. Кроме механического изнашивания в процессе эксплуатации роторных систем возникает электроэрозионное изнашивание. Электроэрозия – повреждение, вызванное переносом материала с поверхностей деталей при протекании через них электрических токов [2].

Общий вид зависимости для определения средней интенсивности изнашивания деталей по Дроздову Ю.Н. представляется формулой:

$$I_h = k \Phi_1^a \Phi_2^g \Phi_3^c \Phi_4^d \Phi_5^e \quad (1)$$

В этой зависимости входящие безразмерные критерии характеризуют следующие свойства. Критерий Φ_1^a – определяет толщину смазочного слоя:

$$h_{см} / \sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}, \quad (2)$$

где $h_{см}$ – толщина смазочного слоя различной природы (0,1 мкм); R_{a1} и R_{a2} – среднеарифметическое отклонение профиля шероховатостей контактирующих поверхностей. Вместо параметров шероховатостей может быть использован характерный размер абразивной частицы. Размер смазочного слоя рассчитывается как сумма размеров граничного и контактно-гидродинамического смазочных слоев. Величина граничного смазочного слоя не поддается расчетному определению и зависит от поверхностных сил; условно принимается 0,1 мкм. Напряженное состояние в контакте оценивается комплексами $\Phi_2^g = P/HB$ или $\Phi_2^g = f P/HB$, где P – нормальное напряжение сжатия; $HВ$ – твердость поверхности; f – коэффициент трения скольжения. Микрогеометрия, маслосмочность, маслосодержащая способность контакта характеризуются комплексом $\Phi_3^c = R_{max}/rb^{1/\nu}$, где R_{max} – наибольшая высота микронеровностей профиля; b и ν – параметры опорной кривой; r – приведенный радиус неровностей.

Интенсивность изнашивания при механическом и электроэрозионном изнашивании тел для подшипника скольжения с учетом наших исследований составит:

$$I_h = k \left[\frac{h}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}} \right]^{-1,05} \left(\frac{P_z}{HB_{np}} \right)^{0,85} \left(\frac{R_{max}}{rb^{1/\nu}} \right)^{0,91} \left(\frac{p_z U V_s \tau_o}{HB_{np} d_\phi} \right)^{0,8}, \quad (3)$$

где h – толщина слоя смазки, P_z – нормальное напряжение сжатия; U – разность потенциалов; V_s – скорость скольжения; τ_o – характерное время, d_ϕ – средний диаметр пятна фактического контакта.

HB_{np} – приведенная твердость по Бринеллю, МПа, V_s – скорость скольжения, м/с.

$$HB_{np} = HB_0 \cdot \alpha + HB_1 (1 - \alpha) \quad (4)$$

где HB_0 – твердость по Бринеллю материала основы, наплавляемого порошка, МПа; α – доля материала основы в объеме порошка; HB_1 – твердость по Бринеллю упрочняющей фазы. Для упрочненных слоев это доля мартенсита, для наплавленных слоев доля карбидной, оксидной или другой упрочняющей фазы.

Список литературы

1. Тескер Е.И., Гурьев В.А., Тескер С.Е. Микроструктура и свойства наплавленных лазером поверхностных слоев // Физика и химия обработки материалов. - 2004. - №1. – С. 38-42.
2. Бохан А.Н., Марцинковский В.С., Боряк А.С. Влияние электромагнитного состояния турбоагрегата на работоспособность его узлов, диагностика, демагнетизация // Вісник Сумського національного аграрного університету Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». 2012. 16(24). С.9-15.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВА ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМОДВИГАТЕЛЕЙ

Бозров В.М.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия. (E-mail: vmbzrv@bk.ru)

Цель. Приведенных в технической документации данных пневмодвигателей (ПД), как правило, недостаточно для решения ряда прикладных задач, таких как моделирование динамических процессов в машинах и механизмах с ПД, синтез систем управления следящими пневмоприводами, создание систем диагностики устройств с ПД и т.д. Для решения указанных задач необходимо иметь данные о характере и величине сил трения в ПД, уровне утечек сжатого воздуха из рабочих полостей ПД и перетечек между ними через уплотнения и зазоры, эффективных сечениях подводящих и выхлопных каналов, параметрах теплообмена ПД с окружающей средой.

В настоящее время в ИМАШ РАН разрабатываются методы идентификации параметров ПД, основанные на использовании ограниченных по объему экспериментальных данных, детализированных математических моделей ПД и методе исследования пространства параметров (МИПП) и созданного на его основе программного комплекса MOVI (Multicriteria Optimization and Vector Identification) [1,2].

Постановка задачи и метод исследования. Суть идентификации на основе этого метода в приложении к поставленной задаче состоит в определении степени соответствия математической модели ПД реальному объекту путем сравнения экспериментальных и расчетных данных с учетом ограничений, назначаемых в процессе процедуры идентификации. Метод позволяет находить для заданной размерности и объема пространства параметров, а также принятых критериев качества, так называемые Парето-оптимальные решения (наборы параметров или векторы), т.е. такие, при которых нельзя улучшить один из критериев, не ухудшив другой. Конкретная задача по идентификации параметров ПД заключается в определении эффективных сечений подводящего канала $f_{1э}$, к рабочим камерам ПД и выхлопного канала $f_{2э}$, а также площадей утечек $f_{уэ}$ и внутренних перетечек $f_{нэ}$ по экспериментальным данным перемещения и скорости поршня, давлений в нагнетательной и атмосферной полостях пневмоцилиндра (ПЦ) и экспериментальным механическим характеристикам (усредненным значениям момента и потребляемого количества сжатого воздуха в установившихся режимах работы) для пневмомотора (ПМ). В качестве критериев приняты величины абсолютного (для ПЦ) и относительного (для ПМ) максимального их расхождения.

Объекты идентификации. Исследования проводились на ПЦ с диаметром поршня 63мм, диаметром штока 20 мм, ходом – 400 мм. Уплотнения поршня и штока выполнены на основе полиэтилена (Turcite-80) и фторопласта, что позволяет работать без смазки и обеспечивает плавное начало движения поршня. На входном и выхлопном каналах ПЦ установлены дроссели со сменными калиброванными шайбами. Подводящие и выхлопные трубопроводы имеют заведомо большие сечения, чем шайбы в дросселях, что и делает лимитирующим фактором только сечения шайб. Для иллюстрации идентификации эффективных сечений каналов и потерь сжатого воздуха в ПМ принят пластинчатый ПМ, являющийся наиболее распространенным типом ПМ. Он представляет собой многокамерный двигатель вращательного движения. Вращающий момент на его валу складывается из моментов, создаваемых давлением воздуха в камерах на разделяющие их подвижные пластины в пазах эксцентрично расположенного ротора относительно статора. Экспериментальные механические характеристики (моментная и расходная) пластинчатого ПМ (типоразмер РП 42-55 из ряда моторов нормали МН 46-96-83 «Машины ручные пневматические. Двигатели ротационные нереверсивные») приведены в [3].

Результаты исследований. Наилучшие результаты для ПЦ получены при значениях $f_{э1}=3,2 \text{ мм}^2$, $f_{э2}=5.87 \text{ мм}^2$ ($f_{уэ}=0$ и $f_{нэ}=0$) для давления воздуха в магистрали $p_m=0,5 \text{ МПа}$. При этом расхождения кривых не превысили значений 0,0275 МПа (давление в полости нагнетания), 0,009 МПа (давление в атмосферной полости) и 0,07 м/с (скорость поршня). Для ПМ результаты следующие: $f_{э1}=38,13 \text{ мм}^2$, $f_{э2}=186 \text{ мм}^2$, $f_{уэ}=0,07 \text{ мм}^2$ и $f_{нэ}=7,1 \text{ мм}^2$.

Приведенные результаты соответствуют расхождению экспериментальных и расчетных данных, не превышающих 6%.

Вывод: рекомендовать изложенную методологию для оценки пропускных способностей ПД и потерь сжатого воздуха в виде утечек и внутренних перетечек, а также для решения диагностических задач и обеспечения адекватности математических моделей объемных ПД, используемых при доводке опытных образцов ПД [4] и синтезе их оптимальных конструктивных параметров [5]. При этом экономятся значительные материальные и временные ресурсы.

Список литературы

1. Статников Р.Б., Матусов И.Б. О недопустимых, допустимых и оптимальных решениях в задачах проектирования. //Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012 №4, с. 10-19.
2. Бозров В.М., Ивлев В.И. Определение параметров линейных пневмодвигателей методом векторной идентификации. //Приводы и компоненты машин. 2016, №6, с.6-8.
3. Лебедев В.П. Расчет характеристик ротационного пневматического двигателя // В сб. «Механизированный инструмент и отделочные машины». Вып. 2. – М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1971, с. 11–17.
4. Бозров В.М. Оценка предельных энергетических характеристик объемных пневмомоторов с учетом динамики процессов в рабочих камерах. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 3. С. 12-20.
5. Ивлев В.И., Бозров В.М., Мисюрин С.Ю., Нелюбин А.П. Выбор параметров пневмомотора на основе методов многокритериальной оптимизации и поддержки принятия решений. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 5, с. 12-18.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ Т-НАПРЯЖЕНИЙ НА ТРАЕКТОРИЮ ТРЕЩИНЫ

Большаков А.М., Прокопьев Л.А.

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия.

Одной из важнейших задач современной механики разрушения является живучесть деталей и конструкций с имеющимися заводскими или эксплуатационными дефектами. Часто вопрос живучести конструкций сводится к задачам прогнозирования направления роста трещины в конструкциях при заданных эксплуатационных нагрузках [1–5].

В последние годы в механике разрушения значительный интерес проявляется Т-напряжениям ввиду их значительного влияния на напряженно-деформированное состояние, а также на траекторию распространения трещины для образцов различной геометрии и схем их нагружения. Несмотря на то, что по определению Т-напряжения являются постоянными величинами, в некоторых работах трактуются как напряжения, меняющие свое значение в зависимости от удаленности от вершины трещины. Такой подход обусловлен тем, что учесть все составляющие напряженно-деформированного состояния у вершины трещины невозможно, и, как правило, в расчет механики разрушения берут только те составляющие, которые имеют наибольшее значение в процессах распространения трещины.

Считается, что определяющую роль при нахождении направления распространения трещины наряду с коэффициентом интенсивности напряжений играют Т-напряжения (T_{xx}). Известно, что численный конечно-элементный анализ позволяет определить T_{xx} по напряжениям на берегах трещины по формуле [6].

$$T_{xx} = \frac{1}{2} [\sigma_{xx}|_{\theta=-\pi} + \sigma_{xx}|_{\theta=+\pi}] \quad (1)$$

При нахождении T_{xx} определяют распределение σ_{xx} для ряда точек, расположенных на берегах трещины, затем экстраполируется в вершину трещины $r=0$. Важно отметить, что, несмотря на некоторую разницу значений T_{xx} при $\theta = -\pi$ и при $\theta = +\pi$, Т-напряжения согласно математическому определению принимают постоянной величиной.

В настоящем докладе сформулирован критерий направления роста трещины с учетом углового распределения T_{xx} на основе предложенного в [6] критерия максимальных тангенциальных напряжений с использованием принципа осреднения напряжений в зоне процесса разрушения.

Угловое распределение T_{xx} принято в виде спирали Архимеда, отвечающей формуле:

$$T_{xx} = T_{xx}|_{\theta=-\pi} + \frac{(T_{xx}|_{\theta=+\pi} - T_{xx}|_{\theta=-\pi})(\theta+\pi)}{2\pi} \quad (2)$$

Согласно [19] при осреднении тангенциальных напряжений имеем:

$$\bar{\sigma}_{\theta\theta} = \sqrt{\frac{2}{\pi d}} \cos \frac{\theta}{2} \left(K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right) + T \sin^2 \theta \quad (3)$$

Формула (1) с учетом предложенного (2) углового распределения T_{xx} будет иметь вид:

$$\bar{\sigma}_{\theta\theta} = \sqrt{\frac{2}{\pi d}} \cos \frac{\theta}{2} \left(K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right) + \left(T_{xx}|_{\theta=-\pi} + \frac{(T_{xx}|_{\theta=+\pi} - T_{xx}|_{\theta=-\pi})(\theta+\pi)}{2\pi} \right) \sin^2 \theta \quad (4)$$

Критерий максимальных тангенциальных напряжений для определения направления роста трещины имеет вид:

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_{\theta\theta}}{\partial \theta} = 0 \quad \frac{\partial^2 \bar{\sigma}_{\theta\theta}}{\partial \theta^2} < 0 \quad (5)$$

Предложено учесть постоянные величины Т-напряжений а также вышеупомянутые члены более высокого порядка посредством их представления в виде одной функции углового распределения Т-напряжений. Предложен критерий максимальных тангенциальных напряжений с учетом углового распределения Т-напряжений у вершины трещины.

Список литературы

1. Большаков А.М. Хладостойкость трубопроводов и резервуаров Севера после длительной эксплуатации. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Москва: Институт машиноведения РАН, 2009г.
2. Большаков А.М. Характер дефектов и виды отказов резервуаров, работающих в условиях Севера / Большаков А.М., Андреев Я.М. // Газовая промышленность. – 2012. – № 3 (674). – С. 90-91.
3. Сыромятникова А.С. Механизмы разрушения полимерного материала при распространении и ветвлении трещин / Сыромятникова А.С., Алексеев А.А., Левин А.И., Лыглаев А.В., Большаков А.М. // Деформация и разрушение материалов. – 2008. – № 2. – С.33-39.
4. Абросимов Н.В. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Управление ресурсом эксплуатации высокорисковых объектов. Абросимов Н.В., Акимов В.А., Аладинский В.В. и др. / Тематический блок «Национальная безопасность» / Редактор Махутов Н.А.. Москва, 2015. – Том Управление ресурсом эксплуатации высокорисковых объектов
5. Алексеев А.А. Катастрофические разрушения трубопроводов и резервуаров с ветвлением трещины / Алексеев А.А., Сыромятникова А.С., Большаков А.М., Иванов А.Р. // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 1. – С.42-44.
6. Матвиенко Ю.Г. Несингулярные Т-напряжения в проблемах двухпараметрической механики разрушения / Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2012г. №2. С.51–58.

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ИДЕНТИФИКАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Бржозовский Б.М.¹, Мартынов В.В.¹, Азиков Н.С.², Кутин А.А.³

¹Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

³Московский Государственный технологический университет «СТАНКИН»

Повышение эффективности функционирования мехатронных систем в цифровом производстве является сложной научно-технической проблемой. Прежде всего, это связано с отсутствием возможности моделирования множества их состояний в процессе управления на всех этапах жизненного цикла при различных реализациях технологий и режимов. Представлены анализ динамических структур станочных мехатронных систем и функционирования реализованных цифровых ионно-плазменных технологий обработки геометрически сложных прецизионных изделий.

Представлены основные модели взаимодействия механических структур мехатронных систем.

Рассмотрены возможности формирования вектора управления в пространстве состояний динамических объектов на пример станочных мехатронных систем.

Исследованы основные подходы к идентификации состояния и систем в реальном времени. Разработаны и представлены интегративные оценки состояния систем во временной и частотной областях, в переходном и квазистационарном режимах.

На основе статистических критериев и процедур (таблица) созданы алгоритмы рекуррентных оценок состояния систем и выделения неслучайных составляющих многочастотных колебаний при реализации динамического мониторинга и диагностирования.

Критерий, процедура	Целевое назначение
Инверсий	Определение вида вибросигнала и уровня его информативности
«Ящик с усами»	Выделение значимых амплитуд в спектре вибросигнала для вычисления числителя критерия S_f
Линейный регрессионный анализ	Определение степени изменений состояния динамической системы резания: функциональные или параметрические
Крускала-Уоллиса	Идентификация причин изменений состояния

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ, ЛЕГИРУЮЩИХ УГЛЕРОДНОЕ ПОКРЫТИЕ, И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С УГЛЕРОДОМ НА АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА МОДЕЛЬНЫХ СМАЗОЧНЫХ СРЕД

Буяновский И.А.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (buyan37@mail.ru).

Целью работы является выявление связи между природой карбидообразующего элемента (молибдена и вольфрама), легирующего монокристаллического углеродного покрытия-ориентанта (МКУ) и характера его взаимодействия с материалом покрытия на смазочные свойства модельных смазочных сред для выбора оптимального сочетания технологии получения МКУ - покрытия стальных деталей с материалом легирующего элемента.

Ранее нами совместно с кафедрой коллоидной химии МГУ им. Ломоносова была разработана технология нанесения покрытий в виде монокристаллического углерода, обладающего свойствами ориентанта, на стальные детали тяжело нагруженных трибосопряжений, что обеспечивает образование на поверхностях трения прочных граничных слоев гомеотропно ориентированных молекул смазочного масла (даже химически инактивного). Это позволяет исключить (или, по крайней мере, ограничить применение химически активных присадок), зачастую дорогих и наносящих вред экологии. Тем не менее, в ряде случаев детали трибосопряжений, на рабочие поверхности которых нанесены МКУ-покрытия, смазываются маслами, содержащими химически активные присадки. В этих случаях эффект от образования на поверхностях трения химически модифицированных слоев, как это имеет место при трении стальных деталей без покрытия, исключается. К настоящему времени установлено, что алмазоподобные покрытия, легированные вольфрамом, в серосодержащих средах снижают трение, по мнению некоторых исследователей вследствие взаимодействия данного легирующего элемента с содержащейся в смазочной среде серой [1]. Мы показали, что этот эффект имеет место и при легировании вольфрамом и МКУ-покрытий [2].

Встал вопрос, чем вызван этот эффект – образованием карбидов вольфрама или же трибосинтеза дисульфида вольфрама как твердой смазки. Были параллельно исследованы два МКУ-покрытия: легированные соответственно двумя карбидообразующими элементами – молибденом и кремнием. МКУ покрытия наносились на стальные образцы методом импульсной конденсации углеродной плазмы в сочетании с дополнительным облучением ионами аргона. Легирование углеродного покрытия молибденом и кремнием осуществлялось бомбардировкой его ионами этих элементов, получаемыми путем распыления соответствующих мишеней. Исследование полученных покрытий проводили с помощью рентгеновского фотоэлектронного спектрометра PHI VersaProbe II 5500, исследовалось содержание соответственно молибдена и кремния в углеродном покрытии, а элементный состав покрытий и его изменение - по глубине. Элементный состав покрытия и величины и характер связей между легирующими редкими элементами и материалом покрытия определяли путем анализа полученных РФЭ спектров. Было установлено взаимодействие углерода с молибденом, но карбидов кремния в соответствующем покрытии не наблюдалось. По-видимому, кремний проявил себя в данном случае как интеркалят. Трибологические эксперименты [3] показали, что при трении стали по образцам легированного молибденом МКУ-покрытия в инактивной среде с добавкой химически активной серосодержащей присадки ДФ-11 коэффициент трения существенно снижается (в 2 и более раза), а для легированного кремнием МКУ-покрытия в тех же условиях коэффициент трения такой же, как при трении в среде масла без присадок или с присадкой ПАВ. Таким образом, снижение трения в серосодержащей среде может быть объяснено трибохимической реакцией образования дисульфидов молибдена (в наших экспериментах) и вольфрама.

Таким образом, применение МКУ-покрытий является резервом повышения смазочных свойств масел, причем для обеспечения реализации «зеленой трибологии» можно рекомендовать применение масел без присадок для пар трения сталь - МКУ-покрытие, а при необходимости работать в серосодержащей среде – легировать МКУ-покрытие молибденом или вольфрамом.

Список литературы

1. Буяновский И.А., Левченко В.А., Игнатъева З.В. и др. – В кн.: Современные технологии модифицирования поверхностей деталей машин/Отв. Ред. Г.В. Москвитин, 2013. – с. 37-66.
2. Буяновский И.А. и др.// Механизация строительства, 2017, № 6, с. 18-21.
3. Буяновский И.А., Большаков А.Н., Левченко В.А. //Трение и износ, 2018, т. 39, № 5, с. 471-476.

О НОВОМ ТИПЕ ТРАНСЦЕНДЕНТНЫХ ОСЕВЫХ СПИРАЛЕЙ, С ПЕТЛЯМИ, ПИКАМИ И КРЕСТАМИ

Бырдin В.М.

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва. (V_M_Byrdin@mail.ru)

Введение. Насколько может судить автор, современная теория спиралей, оставаясь в основном алгебраической, мало продвинулась по сравнению с классикой, идущей если не от Архимеда, то от Эйлера–Корню. Это касается и развитой в последние десятилетия теории круговой аппроксимации спиралей и эстетических кривых, востребованных в технической физике и ПК-дизайне [1, 2 и др.]. В математических руководствах ввиду отсутствия, очевидно, и собственно наработанного предмета, все еще нет термина «трансцендентная спираль», хотя вполне прозрачного понятия. В докладе предложен и анализируется новый тип плоских спиралей, *осевые спирали*. Это сингулярно богатые, трансцендентные синусогенные осевые спирали. Синусогенные – на базе синуса, в отл. от известных синусоидальных спиралей. Осевые, в отл. от, как правило, «точечных», т.е. завитых вокруг точки. И сингулярно богатые – включают несколько особенностей: точки двукратного ветвления, кресты, т.е. точки само–пересечения и –прикосновения, и пики или точки возврата 1-го рода. Такого рода спирали были открыты нами [3, 2012г] как простой анзац аппроксимации сложных (матем. суперпозиция), трансцендентных и численных законов дисперсии и дисперсионных кривых обратных и нормальных волн. Обратные волны наиболее сильно диспергируют, обладают «отрицательной» групповой скоростью и целым рядом уникальных, фундаментальных явлений и свойств. Это вновь возродившееся, креативное направление, флагман-тренд современной многопрофильной теории волн и волновых технологий (см. в [3] и мн. др.).

Трансцендентные периодические функции; извилистая, спиральная и циклическая кривые, порождаемые синусоидой. Основной анзац. Исходное: $y_u = a \sin bx_u$. Поворот координат на θ (а также возможный снос на y_0, x_0) дает для новой функции-кривой $y(x)$ и ее обратной производной $f \equiv 1/y'(x)$:

$$y(x) = (x_0 - x_u)s + (\sin bx_u - y_{U0})c, \quad x = A + x_u c + a s \sin bx_u; \quad f(x) = (1 + abt \cos bx_u) / (t - ab \cos bx_u); \quad s = \sin \theta,$$

$c = \cos \theta, t = tg \theta, A(\theta) = -c x_0 - s y_0$. Эта система сильно напоминает трохойду. Но, несмотря на тригонометрическую привлекательность, $f(x)$ и даже $y(x)$ не столь просты – в явном виде их не выписать, лишь параметрические или неявные и обратные функции. А для обратной функции $x_u(x)$ очевидна многозначность типа арксинуса: $\pm \kappa \pi, \kappa = 1, 2, 3, \dots$ Тем не менее, для всевозможных кривых $f(x)$ графо–аналитически находим три характерных типа спиралей и шлемовидную, циклическую кривую (в отл. от трохойды и циклоиды).

Извилистая функция и кривая. Извилистая – это исходная наклонная синусоида $y(x)$ при любых θ .

Разрывная ($\pm \infty$) периодическая $f(x)$, при малых докритических $\theta < \theta_{кр1} = \arctg(1/a b)$, не спираль.

Шлемоида. При $\theta = \theta_{кр1}$ шлемовидная кривая, *шлемоида*, $f(x)$ отчасти подобна обычной циклоиде. Это серия шлемовидных профилей, опертых на ось x , но с вершиной до бесконечности, рис. 1с. Здесь точки возврата, 1-го рода при $x_u = \kappa \pi, \kappa = 1, 2, 3, \dots$, или *пики* (наш термин) – это вырождение петли в острие.

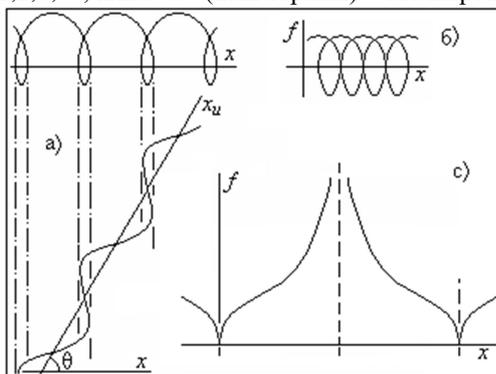


Рис. 1. Два вида спирали на базе повернутой синусоиды: а) с петлями (вкл. кресты), при поворотах $\theta_{кр1} < \theta < \theta_{кр2}$, и б) с точками самоприкосновения (2-ой крест), при $\theta = \theta_{кр2}$. в) Шлемовидная кривая, при $\theta = \theta_{кр1}$.

Петлистая спираль. Для $\theta \in (\theta_{кр1}; \theta_{кр2})$, $\theta_{кр2} = \arctg(3\pi/2a b)$, или $45^\circ < \theta < 78^\circ$ при единичных a и b , спиральная кривая $f(x)$ дана на рис. 1а. Она подобна удлиненной циклоиде–трохойде.

Бинарная. При еще большем и тоже критич. угле $\theta = \theta_{кр2} = 78,02^\circ$ (или, в общем случае a и $b \neq 1$, $\theta_{кр2} = \arctg(3\pi/2a b)$), получим *бинарную спираль* с точками само–прикосновения и –пересечения (рис. 1б).

Сгущенная. При дальнейшем повороте, $\theta_{кр2} < \theta < 90^\circ$, спираль *сгущается* по сравнению с бинарной.

Квазиэллипс. При 90° получим *вырождение* спирали в квазиэллипс $f(x)$ с полуосями a и $1/a b$.

Список литературы

1. Курносенко А. И. О приближении плоских кривых круговыми дугами с сохранением длины// Ж. вычисл. матем. и матем. физ., 57:4 (2017), 588–604.
2. Israel, Nico. Spirals: the whirled image in twentieth-century literature and art// New York Columbia University Press, 2015. Pp. 161–186.
3. Бырдin В. М. Извилины, петли и спирали трансцендентных функций и виртуальных кривых: сингулярный анализ, простые асимптотики, волновое приложение// Математика, ее прилож. и матем. образование. Улан-Удэ, 2017. С. 121–126.

ОБРАТНОВОЛНОВАЯ ДИФРАКЦИЯ ГАУССОВА ПУЧКА; РАСХОЖДЕНИЕ ЛУЧЕЙ И ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ; РАЗНОИМЕННАЯ АНТИДИФРАКЦИЯ, ФОКУСИРОВКА И БИИНВЕРСИЯ

Бырдин В. М., Косарев О. И., Мамонова М. Г., Пузакина А. К.

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия. (alla-puzakina@yandex.ru)

Введение. В докладе представлены две крайние задачи. Это 1) для «отрицательной, метасреды», содержащей обратную волну, и 2) для стыка *разноименных* сред, обычной с метаструктурой (см. [2] и ниже п. 2.1). Дано квазиоптическое, коротковолновое решение для параболического уравнения с оценкой точности по $\lambda \ll 1$. Параболическое уравнение приближенное, занимает среднее положение между еще более грубым, лучевым методом $\lambda \downarrow 0$ и точным уравнением Гельмгольца [3]. Кроме того, в других наших статьях решено несколько дифракционных и *обратноволновых* (ОВ-) задач точными методами [4, 5 и др.].

Основные результаты: *Определение 1* (Разно- и одноименные системы). *Одноименные (или однородные) преобразования* – это трансформации прямая–прямая волна или обратная–обратная. *Разноименные (или разнородные)* – это прямая–обратная и напротив, обратная–прямая. Понятия *разно-* и *одноименного* обобщаются и на др. объекты, связанные с такого рода преобразованиями и взаимодействиями. (Например, нелинейное излучение гармоник при мощной фокусировке, при дифракции света на ультразвуке и т.п.; разделение разноименных структур возникает не только при механической состыковке волноводов, но и иного рода, как, к примеру, в спинтронике магнитным полем; отметим аналогию с разно- и одноименными зарядами в электрофизике).

Утверждение 1 (Разноименная ОВ–антидифракция). *Аномальные и специфические, обратноволновые явления антидифракции проявляются в обратноволновых 3D-структурах или плоских и планарных волноводах только при разноименных преобразованиях.*

Определение 2 (ОВ–антидифракция). *Обратноволновая антидифракция – это явления дифракции обратных волн в разноименных структурах, аномальные или противоположные явлениям классической дифракции обычных, прямых волн. В основе антидифракционных эффектов лежат элементы обратноволнового антизеркального отражения и отрицательного преломления волновых фронтов на границах раздела разноименных структур.* [6].

Гауссов ОВ-пучок: квазиоптический анзац, классическое расхождение

Общее коротковолновое приближение

Теорема 1 (об ОВ-пучке). *Дифракционное расхождение обратноволнового гауссова пучка, в точности совпадает с классическим, обычным расширением прямоволнового пучка. Амплитудное распределение тоже, противоположен лишь тривиальный знак амплитудной фазы.*

Диаграмма направленности и поверхности равных амплитуд

Антидифракция пучка на границе разноименных согласованных сред

Постановка задачи о преломлении

Автофокусировка разноименно преломленного пучка как элемент антидифракции: задача с комплексным диаметром пучка

Теорема 2 (об ОВ-фокусировке и антидифракции). *Разноименно преломленный пучок фокусируется симметрично падающему гауссову пучку, как по распределению амплитуд (эквивалентностей), так и по фактору концентрации псевдо-сферического или -цилиндрического фронта.*

Антидифракция и биинверсия преломленного пучка

Теорема 3 (о биинверсии и инвариантности пучка). *Диаграмма и характеристика направленности гауссова коротковолнового пучка: 1) не зависят от типа излучения, цилиндрического или сферического, и 2) при преломлении на границе вполне ОВ-адекватных сред, испытывают двойной разворот по 180° относительно этой границы и фокальной плоскости.*

Заключение. Дифракция ОВ-пучка в «отрицательной среде» полностью адекватна расхождению классического гауссова пучка. В задаче о прохождении пучка через разнородный стык обычной, «положительной» и отрицательной сред описаны явления фокусировки прошедшего пучка и его биинверсии, двойного разворота по 180° , преломленного поля в целом и характеристики направленности пучка. Биинверсия влечет трехкратное обострение диаграммы направленности, хотя и местное, в зоне второго разворота. Обсуждается актуальность обратноволновых исследований, возродившихся с 1990/2000-ых гг. и значительно возросших до многоплановой теории и технологий, вплоть до нобелевских и национальных номинаций. В целом фундаментальная обратноволновая феноменология уже насчитывает несколько десятков эффектов.

Список литературы

1. Малюжинец Г. Д. Развитие представлений о явлениях дифракции. Успехи физич. наук. 1959. Т. 69. № 2. С. 321–334.
2. Горелик Г. С. Колебания и волны. Введение в акустику, радиофизику и оптику/ 3-е изд. под ред. С. М. Рытова. М.: ФМЛД, 2007. 656 с. Допол. Веселаго В. Г. *Об обратных волнах и метаматериалах...* С. 647–648. (Серия: Физтеховский учебник)
3. Бабич В. М. Дифракция математическая теория. Матем. энцикл. Т. 2. М.: СЭ, 1979. (– *Encyclopedia of Mathematics*. 2000-ые гг.)
4. Косарев О. И., Остапшин Н. М., Пузакина А. К. Звуковое давление в дальнем поле конечной цилиндрической оболочки. Проблемы машиностр. и автомат. 2017. № 4. С. 98–102.
5. Бырдин В. М. О дифракции нормальных волн в слоистых структурах: модель уронемера, метод факторизации, волноводные квазирезонансы. Известия РАН. МГТ. 2017. № 3. С. 83–99.
6. Бырдин В. М. Концепция обратноволновой антидифракции в общей теории волн: явления разноименной антидифракции и афракции в многомерных системах. XI Всерос. съезд по теор. и прикл. механики. 08.2015г./ Сб. д-дов. Казань: КФУ, 2015. С. 656–657.

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ И ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ СОВРЕМЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Вальес Н.Г.¹, Фесенко Т.Н.¹, Самолысов А.В.¹, Крыжевич Г.Б.²

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

²ФГУП Крыловский государственный научный центр

Согласно данным статистики, разрушение энергетического оборудования часто происходит из-за интенсивных вибраций теплообменных труб в трубных пучках, как наиболее нагруженных элементах. В связи с этим актуальной становится задача создания математических моделей, позволяющих производить оценку и анализ гидродинамически возбуждаемых вибраций трубных пучков. В практике проектирования теплообменного оборудования существуют многие проблемы, относящиеся к пониманию и моделированию взаимодействия потока и труб, сложности структуры их обтекания, что в общем не позволяет получить точных данных как о возбуждающих гидродинамических силах и их распределении, так и о гидродинамическом демпфировании. Математические модели описания нагрузок строятся с учетом накопленных за многие годы исследований экспериментальных и теоретических данных, представленных в работе [1].

Из анализа литературы можно выделить основные механизмы гидродинамического возбуждения вибраций труб в пучках – это возбуждение периодическим вихревым отрывом, который действует в узком диапазоне скоростей потока и может привести к интенсивным вибрациям и гидроупругое возбуждение, которое при достижении критической скорости потока приводит к недопустимо большим амплитудам вибраций труб и в дальнейшем к их разрушению.

Задачами настоящего исследования является создание математических моделей наиболее опасных механизмов возбуждения пучков труб и плохообтекаемых многокомпонентных конструкций.

Предложен способ определения нестационарных гидродинамических сил на трубках в пучках с регулярной компоновкой поперечного сечения, состоящих из большого числа трубок путем расчета сил для небольшого фрагмента пучка.

Реализована методика определения критических скоростей обтекания большого пучка труб с использованием метода вязких вихревых доменов при моделировании обтекания фрагмента пучка поперечным потоком. Результаты подтверждаются известными экспериментальными данными.

На основе применения указанной математической модели создан алгоритм для численного определения матриц линейной гидродинамической связи (матрицы влияния) конкретных пучков труб.

Получено необходимое и достаточное условие устойчивости фрагмента пучка, выраженное через безразмерные параметры системы и оценку собственных чисел матрицы влияния, построенной для рассматриваемого трубного пучка.

Разработанная математическая модель вибраций трубных систем в поперечном потоке жидкости позволяет прогнозировать их амплитудно-частотные характеристики с учетом реального дистанционирования и параметры контактного взаимодействия труб с дистанционирующими решетками (путь и скорость скольжения, контактные силы, траектории движения труб в опоре). Данные величины являются определяющими для расчета виброизноса труб в местах их контакта с промежуточными опорами.

На рис.1 приведены зависимости контактных нагрузок в промежуточных опорах от скорости потока и величин зазоров в них.

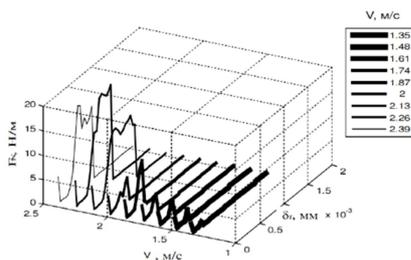


Рис. 1

Используя расчетные данные по величинам параметров виброизноса и величинам напряжений возможно провести оптимизацию конструкции данного класса систем по расположению опор и зазоров в них.

Список литературы

1. Махутов Н.А., Каплунов С.М., Прусс Л.В. Вибрация и долговечность судового энергетического оборудования. Л., Судостроение, 1985. 300 с.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Васильев И.Е., Матвиенко Ю.Г., Чернов Д.В.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (e-mail: vie01@rambler.ru).

В докладе представлена методика применения критериальных параметров оценки степени деградации композитных материалов [1], использованная при акустико-эмиссионном мониторинге опорных стоек авиационных конструкций нового поколения летательных аппаратов в ходе их стендовых испытаний на циклические нагрузки.

Усталостные испытания опорных стоек проводились на стендах Заказчика при симметричном цикле нагружения и амплитуде, составляющей 60 % от предельного уровня статической нагрузки, при которой происходило отслаивание сбегов стрингеров от опорных стоек. Контроль адгезии клеевого соединения в процессе испытаний осуществлялся с применением акустико-эмиссионного мониторинга и проволочных индикаторов, по разрыву которых регистрировался момент отслаивания сбегов стрингеров от полок опорных стоек. Комплексное использование весовых и частотных параметров регистрации локационных импульсов при АЭ мониторинге диагностируемых элементов конструкций позволило контролировать динамику процесса отслаивания и повысить точность определения момента отслаивания сбегов стрингеров от полок опорных стоек, который регистрировался примерно за 500 с до разрыва проволочных индикаторов.

Проведенный эксперимент наглядно показал эффективность предложенной концепции оценки остаточной прочности с применением новых критериальных параметров W_H , W_C , W_B и ω_H , ω_C , ω_B , разработанной методики их использования, а также программного продукта для определения степени деградации материала (накопления повреждений) и прогнозирования рабочего ресурса исследуемых элементов авиационных конструкций в условиях их стендовых испытаний на циклическое нагружение.

Весовые характеристики W_H , W_C , W_B регистрации импульсов АЭ в кластерах нижнего, среднего и верхнего энергетического уровня дают информацию о процессе накопления повреждений в структуре исследуемого материала на микро, мезо и макромасштабном уровне, а частотные параметры ω_H , ω_C , ω_B , отражают интенсивность и глубину воздействия прилагаемой нагрузки на процесс деградации и разрушения структуры диагностируемого изделия. Комплексное использование весовых и частотных критериальных параметров позволяет более достоверно прогнозировать остаточную прочность и ресурс диагностируемого изделия, давая возможность проводить такую оценку на любом этапе его эксплуатации без информации о предистории и условиях нагружения конструкции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 18-19-00351).

Список литературы

1. Васильев И.Е., Матвиенко Ю.Г., Елизаров С.В., Чернов Д.В. Способ мониторинга степени деградации структуры материала и определения остаточной прочности изделия / Патент № 2649081 РФ: МПК С 1 G01N 29/14 (2006.01). Заявитель и патентообладатель Институт машиноведения РАН. № 2017109571, заявл. 22.03.2017, опубл. 29.03.2018, Бюл. № 10.

МЕТОДИКА РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ РАЗВИВАЮЩИХСЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Васильев И.Е., Матвиенко Ю.Г., Чернов Д.В.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (e-mail: vie01@rambler.ru).

Целью доклада является демонстрация применения разработанной в ИМАШ РАН методики ранней диагностики развивающихся повреждений для выявления подповерхностного надреза в авиационной панели из композитного материала при стендовых испытаниях на растяжение.

Задача состояла в том, чтобы оценить возможности разработанной методики и программного продукта для выявления повреждения на ранней стадии нагружения панели в условиях упругого деформирования материала с применением хрупкого тензопокрывтия, регистрация трещин в котором синхронно осуществлялась с применением высокоскоростной видеокамеры «Видеоспринт» и акустико-эмиссионной системы «A-Line 32D».

В ходе проведенного эксперимента по выявлению подповерхностного дефекта (надреза среднего стрингера) в авиационной панели при ее стендовых испытаниях на растяжение была протестирована разработанная в ИМАШ концепция выявления повреждений на ранней стадии нагружения в условиях упругого деформирования материала конструкции [1]. При этом тестирование проходила не только сама методика, но и специально разработанное для кластерного анализа и классификации регистрируемых локационных импульсов программное обеспечение (ПО), а также оборудование и ПО для синхронной записи потоков видеоизображений и массивов акустико-эмиссионных (АЭ) данных. Синхронная регистрация потоков видеоизображений и импульсов АЭ позволила точно контролировать процесс трещинообразования в тензопокрывтии на этапах эксперимента, а структурно-феноменологический подход при классификации регистрируемых массивов данных АЭ дал возможность в режиме реального времени на ранней стадии деформирования материала отслеживать основные тренды накопления повреждений на разных структурных уровнях и идентифицировать источники их излучения [2].

Комплексное использование оксидного тензопокрывтия, высокоскоростной видеосъемки, синхронизированной с системой АЭ контроля, позволило в процессе мониторинга состояния авиационной панели при уровне нагрузки $P=90$ кН, составляющей примерно 12 % от предельной, точно диагностировать область подповерхностного дефекта, выявить распределение наибольших главных деформаций в области трещинообразования хрупкого покрывтия, провести количественную их оценку и идентифицировать основные источники АЭ сигналов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 18-19-00351).

Список литературы

1. Матвиенко Ю.Г., Васильев И.Е., Панков А.В., Трусевич М.А. Ранняя диагностика зон повреждения и вероятного разрушения композиционных материалов с использованием хрупких тензоиндикаторов и акустической эмиссии. // Заводская лаборатория. 2016. № 1. С. 45—57.
2. Васильев И.Е., Матвиенко Ю.Г., Иванов В.И., Елизаров С.В. Способ распознавания источников сигналов акустической эмиссии, возникающих при деградации материала, образовании трещин и разрушении конструкции / Патент № 2569078 РФ: МПК С 1. Заявитель и патентообладатель Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. № 2014125453/28, заявл. 24.06.14, опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32.

МЕТАФИЗИЧЕСКИЙ ПРИНЦИП НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ – ИНСТРУМЕНТ КОНСТРУКТОРА СОВРЕМЕННЫХ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ И БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Величенко В.В.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

Целью работы является возвращение в современную науку фундаментального труда гениального французского философа и ученого Пьера Моро де Мопертюи (1698-1759) [1], с целью его использования для решения трудных нестандартных проблем современной техники.

Мопертюи получил широкую известность как первый в мире ученый, измеривший размеры и форму Земли, был избран членом Французской, Английской, Петербургской и Берлинской академий наук. Но прославил его опубликованный в 1746 г. теоретический труд [1], в котором он доказал математическую теорему: *Вселенная создана Богом по Принципу наименьшего действия*. Этот труд Мопертюи, без какого-либо анализа его научного содержания, был встречен ожесточенным неприятием только что появившихся атеистов, Мопертюи был объявлен сумасшедшим, и вместе с Богом из атеистической науки выброшен.

Впоследствии Лагранж (1736-1813) изготовил из Принципа *наименьшего* действия свой Принцип *стационарного* действия Лагранжа. А позже немецкий математик Якоби (1804-1851) доказал, что Принцип Бога не является *минимальным*, и в науке остались Принцип Лагранжа, и его автор Лагранж.

Но впоследствии российские математики Дмитрий Бобылев (1842-1917), Надежда Гернет (1877-1943) и автор этого доклада [2] доказали, что анализ Якоби ошибочный, что Принцип *наименьшего* действия Бога *абсолютно* справедлив, а Принцип *стационарного* действия Лагранжа является всего лишь *необходимым условием* этого Принципа Бога. То есть, что Принцип *стационарного* действия Лагранжа позволяет только *составлять уравнения* для решения задач, а Принцип *наименьшего* действия позволяет *решать* задачи.

Однако математики и механики уже научились *составлять уравнения* Лагранжа для своих задач, но не знают, что *решения* этих задач можно получить непосредственно из Принципа Бога давно выброшенного из науки ретрограда Мопертюи. Поэтому следует привести примеры, в которых использование Принципа *наименьшего* действия Бога позволило получить принципиально новые результаты в науке и технике.

Первый пример привел сам Мопертюи в работе [1]. Он вставил в функцию *действия Бога* массы тел и их скорости до удара, вычислил минимум этой функции, и получил скорости тел после удара. Те самые, которые дают сложные *эксперименты и теории* удара – но без этих экспериментов и теорий!

Второй пример принадлежит гениальному русскому математику Л.С. Понтрягину (1908-1988). Теория регулирования машин разработала сотни разных схем регулирования. А Понтрягин построил аналог Принципа Бога, который назвал *Принципом максимума* [3], применил его к машинам – и получил для них семейство *лучших* регуляторов. Автор этого доклада помог Понтрягину выбрать из них *самый лучший* [4, 5].

Аналог Принципа Бога в форме *Принципа наименьшего максимума* [6] был использован для конструирования регулятора, спасающего жизнь космонавта при ударе космического корабля об атмосферу Земли.

А можно ли сделать так, чтобы машина *абсолютно* не реагировала на возмущения? Нужно построить аналог Принципа *наименьшего* действия Бога – *Принцип абсолютной независимости* от возмущений для машины [7], и найти из него конструкцию *инвариантного* регулятора [8].

А можно ли сделать организм человека устойчивым к СПИДу? Над этим работают тысячи биологов и медиков во всем мире, и к этой труднейшей проблеме подключились кибернетики. Нужно построить аналог Принципа Бога – *Принцип сохранения жизни* человека [9], вычислить с его помощью алгоритм *максимального продления* жизни, – и приговор зараженному ВИЧ-инфекцией откладывается на десятилетия.

В заключение о перспективных проблемах техники. Например, инженеры и ученые конструируют и изучают турбины самолетов, чтобы сделать их экономичнее и надежнее. Проводят расчеты и эксперименты, но это лишнее. Нужно взять Принцип Бога, подставить в него вместо *действия Бога* нужное *действие турбины*, вычислить его максимум, и получить в результате единственную *наилучшую* конструкцию турбины.

Как все это сделать? – Нужно изучать гениальный труд Мопертюи [1], а для этого нужно вернуть его в современную науку. Нужно ли вернуть в науку Бога, зависит от отношения к Богу самих ученых. Но знать Бога гениальных ученых Коперника, Кеплера, Декарта, Галилея, Ньютона и Мопертюи ученым полезно.

Список литературы

1. Мопертюи П. Законы движения и покоя, выведенные из метафизического принципа. – В сборнике Вариационные принципы механики. М., Физматгиз, 1959, с. 41-55. Сегодня доступно в Интернете.
2. Величенко В.В. Минимальная интерпретация принципа наименьшего действия. – Доклады АН СССР, т. 248, № 3, 1979.
3. Понтрягин Л.С. и его ученики. Математическая теория оптимальных процессов. М., Физматгиз, 1961.
4. Величенко В.В. К достаточным условиям оптимальности в принципе максимума. – Доклады АН СССР, т. 182, № 4, 1968.
5. Величенко В.В. О методе поля экстремалей в достаточных условиях оптимальности. – ЖВМ и МФ, т. 14, № 1, 1974.
6. Величенко В.В. К задаче о минимуме максимальной перегрузки. – Космические исследования, т. 10, вып. 5, 1972.
7. Величенко В.В. О вариационном методе в проблеме инвариантности управляемых систем. – Автом. и телемех., 1972, № 4.
8. Величенко В.В., Козьминых В.А. Управление спуском в возмущенной атмосфере на основе вариационного метода синтеза инвариантных систем. – Космические исследования, т. 20, вып. 3, 1982.
9. Величенко В.В. ВИЧ & СПИД – красные книги человечества? Предупреждение населению. М., Алгоритм, 2017, 272 с.

ЗАВИСИМОСТЬ ВИБРОАКТИВНОСТИ ДВУХПРОЛЕТНОГО РОТОРА С ОСТАТОЧНЫМИ ДИСБАЛАНСАМИ ПРИ ВЫБЕГЕ ОТ ФОРМЫ КРИВОЙ ЕГО НЕУСТРАНИМОГО ПРОГИБА

Волоховская О.А.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (OlgaAVol@yandex.ru)

Работа посвящена оценке влияния формы кривой неустрашимого исходного прогиба двухпролетного ротора с остаточным дисбалансом на величину амплитуд переходных колебаний на низших критических скоростях при выбеге. Выбранная модель соответствует системе «ротор высокого давления - совмещенный ротор средне-низкого давления» («РВД-РСНД») турбоагрегата (ТА). В модели системы предполагалось, что роторы соединены между собой жесткой муфтой и установлены на анизотропных упруго-демпферных опорах. Считалось, что результирующий прогиб (погнутость) системы «РВД-РСНД» образуется в результате приобретения РВД во время эксплуатации или в результате несоблюдения условий пуска первоначально прогиба, форма кривой которого для свободного от нагрузок РВД известна. Исследовано влияние взаимного расположения остаточных неуравновешенностей роторов и дисбалансов от результирующего прогиба валапровода системы на амплитуды ее переходных колебаний при выбеге ТА для двух видов кривой исходного прогиба РВД, имеющих наибольшее и наименьшее значения параметра формы. Величины стрелки исходного прогиба РВД и остаточных дисбалансов обоих роторов выбирались равными максимально допустимым нормами эксплуатации ТА значениям. Расчеты амплитуд проведены для системы «РВД - РСНД» турбины К-300-23.5 ЛМЗ. Анализ результатов показал, что:

- Для самого неблагоприятного при обоих рассмотренных в примере вариантах исходного прогиба РВД случая взаимного расположения термического прогиба и остаточных дисбалансов, для системы «РВД-РСНД» наибольшая амплитуда вибрации возникает на первой опоре при частоте $p_{1y} = 178.7$ рад/с и более чем в полтора раза превышает установленные нормы для уровней вибрации на опорах .

- Для обоих вариантов начального прогиба РВД наибольшие значения амплитуд наблюдаются, как правило, в середине пролета РВД. Для наиболее виброактивного варианта взаимного расположения термического прогиба и остаточных дисбалансов в обоих случаях амплитуды незначительно превышают нижнюю границу норм на уровни вибраций в уплотнениях.

- Вклад величины резонансных амплитуд, порождаемых неустрашимым прогибом валапровода, в величину суммарных амплитуд ротора с остаточными дисбалансами, зависит от формы исходного прогиба системы, при этом он тем больше, чем меньше параметр формы.

- Наибольшие амплитуды в системе с максимально допустимыми нормами вибраций значениями стрелки неустрашимого прогиба и остаточных дисбалансов роторов возникают в критических точках обоих видов (на шейке первого подшипника и середине пролета РВД) при варианте формы исходного прогиба наименьшим параметром формы на собственной частоте $p_{1y} = 178.7$ рад/с.

- Из расчетов следует, что при предельно допустимых нормах на величину вибраций в ТА значениях стрелки неустрашимого прогиба и эксцентриситов, основной вклад в величину амплитуд вибрации системы «РВД-РСНД» (~60%-70%) вносят колебания, возбуждаемые остаточными дисбалансами роторов.

ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОТЕЗОВ РУК И ДВУРУКИХ РОБОТОВ

Воробьев Е.И.¹, Михеев А.В.¹, Моргуненко К.О.²

¹Институт машиностроения РАН, Москва, Россия

²Московский технологический университет, Москва, Россия

В настоящее время основным методом управления протезов рук является метод, основанный на использовании сигналов от биопотенциалов оставшихся мышц руки, предложенный А.Е. Кобринским [1] в 1957г.

Однако, при полной потере руки такая возможность отсутствует и с помощью протеза в этом случае человек может выполнить лишь простейшие операции.

Функциональность протезов рук можно значительно повысить путем построения протеза, как робототехнической системы с полуавтоматическим управлением.

При полуавтоматическом управлении протезов рук часть движений выполняется в автоматическом режиме, а часть при непосредственном участии человека. В автоматическом режиме от отдельных команд могут осуществляться операции переносного движения кисти протеза и произвольный захват предмета, а ориентация кисти протеза осуществляется в следящем режиме с использованием визуальной обратной связи.

В ИМАШ РАН предложен метод полуавтоматического управления протезов рук и разработаны алгоритмы и системы управления для реализации этого метода.

Разработана система целеуказания предмета состоящая из лазерного дальномера и гироскопа, расположенного на голове человека. Система позволяет определить положение предмета относительно системы координат, связанной с человеком [2].

Разработана система реализации переносного движения, позволяющая реализовать в автоматическом режиме переносное движение кисти протеза в заданную точку и перенос предмета.

Переносное движение реализуется с использованием сигналов датчиков относительного положения звеньев исполнительного механизма и алгоритмов управления на основе решения обратных задач кинематики или динамики.

Разработана дистанционная система ориентации, позволяющая изменять ориентацию кисти протеза относительно предмета, с использованием приводов и визуальной обратной связи. Ориентация кисти осуществляется от движения стопы ноги [3] от тактильной стельки, вкладываемой в обувь.

Разработан макет кисти протеза руки с независимым движением пальцев. Управление осуществляется в дистанционном режиме от движения пальцев ноги с помощью специальной тактильной стельки, вкладываемой в обувь [4].

Метод полуавтоматического управления может быть применен также для управления двумя протезами рук и двуруких роботов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-08-00305)

Список литературы

1. Кобринский А.Е., Брейдо М.Г., Биологическая система управления. Доклады АН СССР, 1957, т.117, №1, с. 78-80
2. Воробьев Е. И., Михеев А. В., Моргуненко К.О. Метод управления протезом руки от движений пальцев ноги и стопы - Проблемы машиностроения и надежности машин, 2017, №1, с. 73-76
3. Воробьев Е.И., Дорофеев В.О. Построение ориентирующих движений робота с линейными и вращательными приводами - Проблемы машиностроения и автоматизации, 2017, №2, с. 51-54
4. Воробьев Е.И., Михеев А.В., Моргуненко К.О. Макет протеза кисти с управлением от движения стопы и пальцев ног - Медицинская техника, 2017, №2, с. 48-51

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТАКАНОВ С КОНИЧЕСКОЙ ДОННОЙ ЧАСТЬЮ

Воронцов А.Л., Лебедева Д.А.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия (mt13@bmstu.ru)

Анализ современной справочной и специализированной технической литературы показывает, что полые детали типа стаканов с фланцем в донной части, в т.ч. с конической в многомиллионных количествах используются в машиностроении, автомобилестроении, авиастроении и оборонной промышленности. В технологиях изготовления таких деталей важнейшими задачами являются не только повышение их прочностных характеристик, но и максимальное снижение энергетических затрат и расхода металла, а также повышение производительности и стойкости инструмента. Такие задачи могут быть решены путем применения комбинированного выдавливания, совмещающего формовку конического дна с выдавливанием полости стакана (рис. 1). Ранее такое выдавливание не исследовалось.

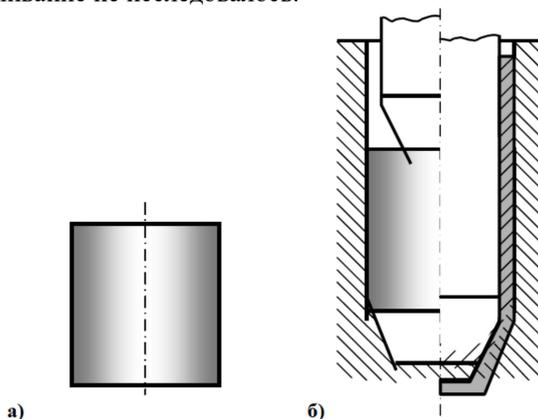


Рис. 1. Предлагаемая технология выдавливания стаканов с конической донной частью:

а – исходная заготовка;

б – выдавливание.

Несмотря на кажущуюся простоту процесса пластической деформации, показанного на рис. 1, на самом деле его механико-математическое описание представляет собой исключительно сложную вариационную задачу, поскольку в зависимости от высоты исходной заготовки, соотношения наибольших рабочих радиусов пуансона и матрицы, формы донной части матрицы и формы рабочего торца пуансона, а также коэффициентов трения реальное пластическое течение может происходить очень разнообразно. При этом итоговый вид получаемых изделий может отличаться мало, либо не отличаться совсем.

Авторами математически описаны все возможные случаи пластического течения металла в процессе такого выдавливания и получены необходимые формулы для надежного определения требуемой силы пресса, расчета матрицы на прочность по максимальному давлению, а также выбора материалов нужной прочности для изготовления инструмента. Проведенные эксперименты на заготовках разных типоразмеров, выполненных из алюминиевого сплава АВ, латуни Л63 и стали 12Х18Н9Т, подтвердили высокую точность и надежность всех выведенных формул, а также возможность значительного повышения физико-механических характеристик изделия с одновременным получением шероховатости отштампованных поверхностей, соответствующей тонкому шлифованию или полированию (рис. 2).



Рис. 2. Срез выдавленного образца из стали 12Х18Н9Т.

НОВЕЙШАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТАКАНОВ С ФЛАНЦЕМ В ДОННОЙ ЧАСТИ

Воронцов А.Л., Никифоров И.А.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия (mt13@bmstu.ru).

В технологиях изготовления полых деталей типа стаканов с фланцем в донной части, широко используемых в различных областях техники, важнейшими задачами являются не только повышение их прочностных характеристик, но и максимальное снижение энергетических затрат и расхода металла, а также повышение производительности. Такие задачи могут быть решены путем применения прямого выдавливания с использованием контрпуансона (рис. 1), которое ранее никем не изучалось.

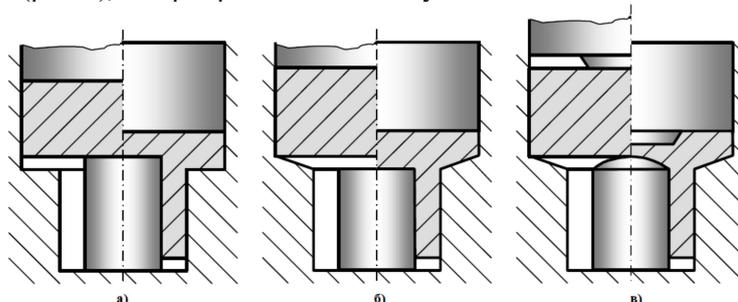


Рис. 1. Возможные схемы прямого выдавливания стакана с фланцем в донной части с использованием контрпуансона:

- а) принципиальная схема получения изделия наиболее простой формы;
- б) схема получения изделия с коническим переходом между стенкой и фланцем;
- в) схема получения изделия с профилированной формой дна.

Прямое выдавливание с контрпуансоном позволяет гарантированно получить фланец с высокоточными размерами и формой. При этом очевидно, что данный способ обладает большими технологическими возможностями. Верхний торец нижнего контрпуансона может располагаться не только выше переходного участка между верхней широкой и нижней узкой полостями матрицы, как показано на рис. 1-а для примера, но быть вровень с уровнем перехода (рис. 1-б) или ниже него. Переходный участок между верхней широкой и нижней узкой полостями матрицы может быть выполнен коническим (рис. 1-б) или любой другой требуемой формы. Как верхний пуансон, так и нижний контрпуансон могут иметь профилированные выступы, например, конический и сферический (рис. 1-в), которые автоматически позволят получить дно требуемой геометрии.

Авторами получены все необходимые формулы для надежного определения требуемой силы прессы, расчета матрицы на прочность по максимальному давлению, а также выбора материалов нужной прочности для изготовления инструмента. Проведенные эксперименты на заготовках разных типоразмеров, выполненных из алюминиевого сплава АД1, латуни Л63 и стали 12Х18Н9Т, подтвердили высокую точность и надежность всех выведенных формул, а также возможность повышения прочностных свойств и твердости материала изделий в 2–3 раза с одновременным получением шероховатости отштампованных поверхностей, соответствующей тонкому шлифованию или полированию (рис. 2).



Рис. 2. Срез выдавленного образца из стали 12Х18Н9Т.

СОПРОТИВЛЕНИЕ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДВУХЧАСТОТНЫХ РЕЖИМАХ НАГРУЖЕНИЯ

Гаденин М.М.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; (E-mail: safety@imash.ru).

Двухчастотные режимы нагружения характеризуются наложением на основной процесс циклического, часто малоциклового изменения напряжений их составляющей более высокой частоты (рис. 1, а).

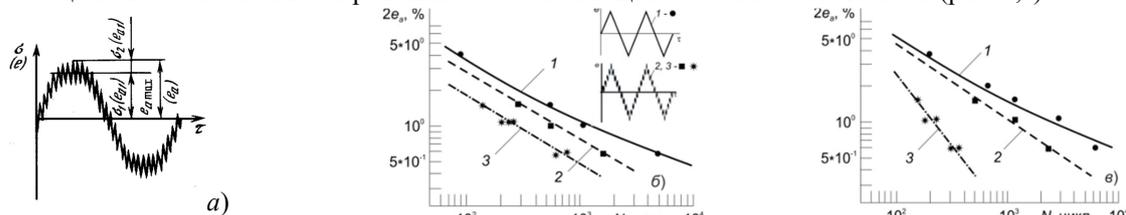


Рис. 1. Двухчастотный режим нагружения (а) и кривые малоциклового усталости для сталей 12Х2МФА (а) и Х18Н10Т (б) при одночастотном (1) и двухчастотном (2 и 3) режимах нагружения.

Указанный характер нагружения свойственен лопаткам и дискам турбокомпрессорных агрегатов авиационных и ракетных двигателей, а также элементам конструкций, в которых, как правило, высокочастотное нагружение вызвано колебаниями (пульсациями) рабочего потока или воздействием побочных вибраций, а низкочастотные режимы - пусками, остановами, испытаниями. Основными параметрами, характеризующими двухчастотные режимы нагружения, являются соотношения амплитуд и частот действующих напряжений, величины которых определяются эксплуатационными условиями нагружения конкретных агрегатов.

В общем случае сопротивление малоциклового разрушению при одночастотном нагружении описывается уравнением кривой малоциклового усталости в виде [1]

$$e_a = \frac{1}{2 \cdot (4N)^{m_s}} \ln \frac{100}{100 - \psi_k^{f_s}} + \frac{1}{(4N)^{m_s}} \cdot \frac{S_k^{f_s}}{E^t}, \quad (1)$$

где все входящие в него характеристики механических свойств материала и параметры определяются как величины, кинетически изменяющиеся по параметрам температуры и времени нагружения.

Из практики эксплуатации и выполненных расчетно-экспериментальных исследований известно [2, 3], что в условиях двухчастотного нагружения имеет место снижение долговечности (ресурса) в сравнении с эквивалентным по максимальным нагрузкам одночастотным нагружением, и тем в большей степени, чем выше отношения наложенных и суммарных деформаций и соответствующих им частот (рис. 1, б и 1, в).

С целью установления закономерностей влияния амплитудно-частотных характеристик двухчастотного нагружения на циклическую долговечность был выполнен цикл экспериментов по определению одночастотной и двухчастотной долговечности для трех различных по циклическим свойствам типов конструкционных материалов – сталей 22К, 12Х2МФА и Х18Н10Т при $t=300^{\circ}\text{C}$ и соотношении частот $f_2/f_1=1500$.

Эффект снижения двухчастотной долговечности N_2 по сравнению с одночастотной долговечностью N_1 может быть определен, как

$$N_1 = N_2 (f_2/f_1)^{k_s(e_{a2}/e_a)} \quad \text{или} \quad N_1 = N_2 (f_2/f_1)^{k_s(\sigma_{a2}^*/\sigma_a^*)}, \quad (2)$$

где e_{a2} и σ_{a2}^* , e_a и σ_a^* амплитудные значения высокочастотных деформаций и соответствующих им условных упругих напряжений, а также их суммарные (вместе с низкочастотными) величины соответственно.

Влияние соотношения амплитуд σ_{a2}^*/σ_a^* двухчастотного нагружения согласно выражению (2) на изменение долговечности N_2/N_1 с использованием полученных результатов эксперимента показано на рис. 2.

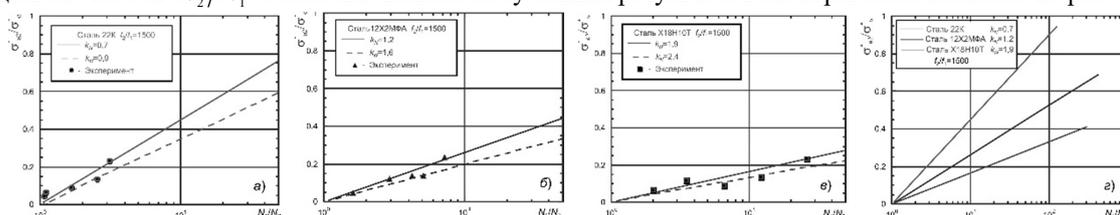


Рис. 2. Изменение долговечности при различных соотношениях амплитуд условных упругих напряжений двухчастотного режима нагружения для сталей 22К - (а), 12Х2МФА - (б) и Х18Н10Т - (в).

Из приведенных данных следует, что выражения (2) при определенных условиях могут быть использованы для оценки долговечности N_2 при двухчастотных режимах на основе базового выражения типа (1).

Список литературы

- Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования. – Новосибирск: Наука, 2008. – 528 с.
- Гаденин М.М. Исследование влияния соотношения амплитуд деформаций при двухчастотном циклическом нагружении / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018, т. 84, № 10.
- Gadenin M.M. Estimation of the Effect of Loading Modes on the Conditions of Attainment of Marginal States and Resource Assignment / Inorganic

ДВИЖЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ВЗВЕШЕННЫХ В ЖИДКОСТИ ЧАСТИЦ В ВОЛНОВОМ ПОЛЕ.

Ганиев О.Р.¹, Звягин А.В.², Украинский Л.Е.¹, Сапунов К.², Родькин Н.²

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия.

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; (zvsasha@rambler.ru).

Одной из важных прикладных задач механики смесей является исследование возможности внешнего управления движением частиц взвеси внутри жидкости. В работе в роли внешнего воздействия рассматривается волновое поле, вызывающее колебания жидкости. Взаимодействие волн с поверхностью частиц приводит к их направленному движению. В работе рассматривалась модельная задача колебаний двух частиц во внешнем волновом поле. Учет взаимного влияния частиц позволил получить выражения для средних по периоду колебаний сил, действующих на частицы. Задача рассматривалась в двух постановках. Для низкочастотных колебаний жидкость считалась несжимаемой. Для высокочастотных (звуковых) колебаний жидкость рассматривалась как акустическая среда. В рамках первой и второй постановки удалось определить силы, действующие на частицы в волновом поле. Оказалось, что направления сил, в рамках несжимаемой жидкости и в акустически сжимаемой среде, противоположны. В несжимаемой жидкости частицы в результате взаимодействия с внешним волновым полем и между собой будут двигаться в сторону источника внешних колебаний и одновременно сближаться. В акустическом поле направление сил, а значит, и направление движения - меняется на противоположное. Полученные результаты позволяют рассматривать возможность моделирования управляемого направленного движения взвешенных частиц действием волновых источников.

Две неподвижные частицы (шары) находятся в волновом поле. Волновое поле создается радиальными колебаниями цилиндрической поверхности. Необходимо определить силы, действующие на частицы со стороны жидкости.

Для несжимаемой жидкости решение задачи сводится к решению задачи Неймана уравнения Лапласа для потенциала скоростей, поскольку необходимо выполнить условия непротекания на подвижной колеблющейся цилиндрической поверхности (Рис.1) и аналогичные условия на поверхности шаров. Для акустически сжимаемой жидкости при гармонических колебаниях задача определения потенциала скоростей сводится к решению уравнения Гельмгольца с теми же граничными условиями. Давление в жидкости определяется интегралом Коши – Лагранжа. После интегрирования по поверхности сферы, определяется сила, действующая на нее со стороны жидкости.

В работе задача определения потенциала решается в форме бесконечного разложения в ряд. Каждый последующий член ряда соответствует потенциалу взаимодействия сферы с волновым возмущением, пришедшим со стороны цилиндра и соседней сферы. Показано, что ряды сходятся как геометрическая прогрессия в том случае, когда малыми параметрами являются отношение радиуса сферы r_0 к расстоянию до цилиндра L , а также отношение r_0 к расстоянию между двумя частицами. Задачу удалось решить в первом приближении, когда учитывались члены одного порядка малости. Получены аналитические выражения для действующих на частицы сил. Оказалось, что средняя по периоду колебаний сила не равна нулю. Она имеет радиальную и угловую составляющие. Она пропорциональна квадрату частоты колебаний и площади миделя. В случае несжимаемой жидкости радиальная составляющая направлена в сторону источника колебаний, а угловая составляющая в сторону соседней частицы. Для акустической среды – направления сил меняются.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что в несжимаемой жидкости частицы будут сближаться между собой и одновременно двигаться в сторону источника колебаний. В акустической жидкости все наоборот – они будут расходиться и одновременно двигаться от источника колебаний.

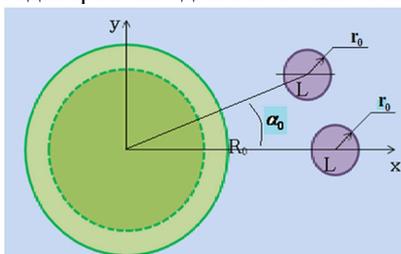


Рис.1. Частицы в волновом поле от колебаний цилиндрической поверхности.

Итоги.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что волновыми колебаниями можно создавать направленное движение частиц внутри жидкости, меняя их объемное содержание. Если считать, что вероятность слипания частиц увеличивается с ростом их объемной концентрации, то учитывая зависимость сил от размеров частицы, возможно ускорение процесса слипания.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗБУЖДЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ КОЛЕБАНИЙ В ЗАКРЫТОМ РЕЗОНАТОРЕ, ЗАПОЛНЕННОМ ЖИДКОСТЬЮ, С ПОМОЩЬЮ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА КОЛЕБАНИЙ

Ганиев Р.Ф., Жебынев Д.А., Фельдман А.М.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

В волновой технологии [1,2] существует необходимость возбуждения колебаний большой (конечной) амплитуды (порядка 100 атм. и выше) в закрытых объемах. Она вызвана потребностью производить обработку многофазных жидкодисперсных сред путем колебательного воздействия без соприкосновения с посторонними средами или предметами, обеспечивающими это воздействие. Мощное колебательное воздействие можно осуществлять с помощью гидродинамических генераторов проточного типа, в которых колебания возбуждаются проходящим через них потоком рабочей жидкости. Задача заключается в том, как передать колебания от такого генератора в замкнутый объем. Основная цель исследований – найти способы возбуждения нелинейных колебаний большой амплитуды и управления ими в закрытых резонаторах; разобраться в механизме возбуждения колебаний.

Поставленная задача была решена путем передачи колебаний давления в закрытый резонатор через согласующее устройство, которое одновременно служило границей раздела для рабочих жидкостей резонатора и генератора. Экспериментальным путем были найдены условия возбуждения колебаний конечной амплитуды, одним из которых явилось избыточное гидростатическое давление в резонаторе с помощью специального разработанного устройства. В исследованиях были изучены спектральные характеристики закрытых резонаторов, свидетельствующие о возбуждении в них резонансных колебаний.

Исследования проведены на гидродинамическом стенде, описанном в работах [3,4], дополненном согласующим устройством и блоком создания повышенного гидростатического давления в закрытом резонаторе. В качестве гидродинамического генератора использовали генератор на основе трубки Вентури [5], а в качестве рабочей жидкости резонатора – водопроводную воду. Резонаторами служили стальные цилиндрические трубы с внутренним диаметром 12 мм различной длины.

В качестве согласующего устройства использовали диски различной толщины из разных материалов. С помощью этих дисков трубы герметично крепились к рабочей камере генератора, осуществлялось разделение объемов резонатора и рабочей камеры генератора и передача колебаний в резонатор. Таким образом, резонатор с одной стороны был закрыт жесткой стенкой, а с другой – стенкой с определенным импедансом. Датчики для измерения переменного давления устанавливались в зоне рабочей камеры генератора, где крепился диск, а также в различных областях резонатора. Измерения колебаний давления и их спектров производили с помощью пьезоэлектрических датчиков фирмы “Kistler” типа 701A и цифрового осциллографа типа “Gould Classic 6000”.

Эксперименты показали, что наиболее пригодными материалами дисков для передачи колебаний в резонатор могут быть фторопласт – 4 и полиэтилен высокой плотности, имеющие акустическое сопротивление близкое к акустическому сопротивлению воды. Кроме того, эти материалы обладают достаточной прочностью и пластичностью, чтобы выдерживать воздействия колебательного и гидростатического давлений и обеспечивать герметизацию резонатора с генератором.

Найдено, что в резонаторе возбуждаются колебания давления, как на частотах близких к собственным частотам резонатора, так и на частотах, обусловленных нелинейностью. При этом можно возбуждать колебания разными гармониками генератора. Наибольшая амплитуда колебаний в резонаторе была получена при совпадении частот первых гармоник генератора и резонатора.

Управлять амплитудой возбуждаемых колебаний в резонаторе можно как путем изменения амплитуды и частоты импульсов генератора, так и путем изменения избыточного давления в резонаторе.

На основании анализа кривых колебаний и их спектров представлена схема возбуждения колебаний в резонаторе.

Таким образом, с помощью гидродинамического генератора проточного типа в закрытом резонаторе можно возбуждать колебания с амплитудой сравнимой с амплитудой генератора (в нашем случае порядка 100 атм.) как на собственных частотах, так и на частотах, обусловленных нелинейностью. Необходимым условием возбуждения колебаний большой амплитуды является повышение статического давления в резонаторе до величины, при которой в нем начинают возбуждаться резонансные колебания.

Список литературы

1. Ганиев Р.Ф. Волновые машины и технологии (введение в волновую технологию). М.: Науч.-издат. центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2008. 192 с.
2. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технология. М.: Науч.-издат. центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2008. 712 с.
3. Ганиев Р.Ф., Жебынев Д.А., Фельдман А. М. // Инженерно-физический журнал. 2014. Т 87, № 3. С. 644 – 649.
4. Ганиев Р.Ф., Жебынев Д.А., Фельдман А. М. // Справочник. Инженерный журнал. 2017. № 5. С. 47 – 53.
5. Пилипенко В.В. Кавитационные автоколебания. Киев: Наук. думка, 1989. 316 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ В СИСТЕМЕ ПОДВИЖНЫХ КОАКСИАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРОВ

Ганиев Р.Ф.¹, Ревизников Д.Л.^{1,2}, Сухарев Т.Ю.^{1,2}, Украинский Л.Е.¹

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (timur.suxarev@yandex.ru);

²Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

Доклад посвящен численному исследованию процессов перемешивания в системе подвижных коаксиальных цилиндров. В работах авторов [1-3] на основе вычислительных экспериментов созданы основы для анализа режимов работы перемешивающих устройствах колебательного типа и предложены подходы к оптимальному размещению рабочих элементов. Рассмотрение задачи с точки зрения теории хаоса в динамических системах и деформаций векторных полей позволяет проанализировать проблему с более общей точки зрения. Вычислительный эксперимент включает в себя два этапа: моделирование течения жидкости в условиях неравномерного движения цилиндров и моделирование эволюции объема примеси в несущей среде. На первом этапе решаются двумерные нестационарные уравнения Навье-Стокса для несжимаемой жидкости. На втором этапе для расчета динамики примеси применяется маркерный метод, где частица-маркер представляет постоянный объем примеси.

Расчеты показали, что система подвижных коаксиальных цилиндров обладает высоким перемешивающим потенциалом. Определены и подробно описаны основные структуры, которые способствуют хаотизации системы, а как следствие, эффективному перемешиванию. На основе анализа особых точек векторного поля скоростей жидкости идентифицированы структуры, отвечающие за формирование застойных зон. Отмечено, что наблюдаемые картины перемешивания топологически похожи на те, которые возникают в нелинейных системах с малым возмущением вблизи резонанса. На основе полученной информации предложен способ профилирования внутреннего цилиндра (ротора). На рис. 1 показаны картины перемешивания в различные моменты времени для разрывного протокола движения цилиндров. Видно, что за счет профилирования (рисунки снизу) удалось существенно сократить площадь застойных зон и повысить эффективность процесса перемешивания.

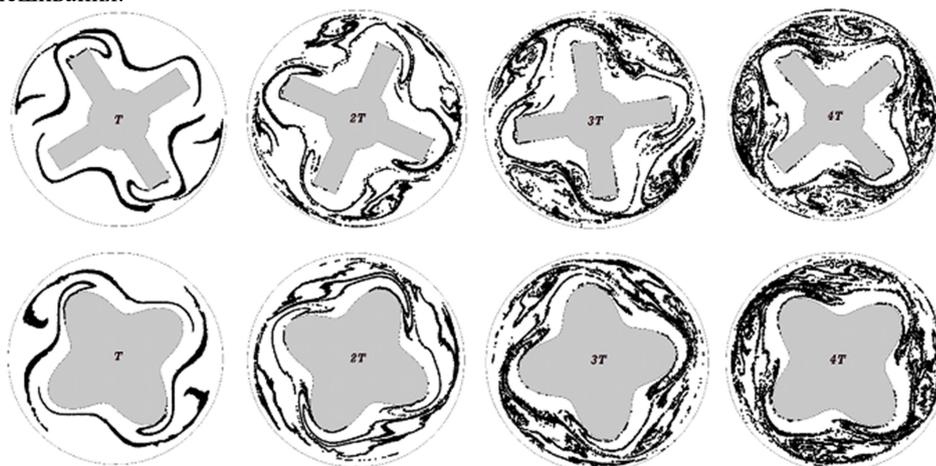


Рис. 1. Положение частиц в пространстве в моменты времени кратные периоду. Сверху: форма ротора до профилирования; Снизу: результат профилирования.

Рассмотрен вопрос масштабирования перемешивающих устройств данного типа. Введены два безразмерных параметра (аналоги чисел Рейнольдса и Струхала), использование которых позволяет осуществить переход от лабораторных стендовых установок к реальным производственным аппаратам.

Список литературы

1. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Сухарев Т.Ю., Украинский Л.Е. Волновое перемешивание в установках колебательного типа // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2017, №3, С. 5-10.
2. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Сухарев Т.Ю., Украинский Л.Е. Оптимизация пространственного расположения рабочих элементов в установках колебательного типа. // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2018, №1, С. 3-8.
3. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Украинский Л.Е. Волновое перемешивание // Нелинейная динамика, 2008, Т. 4, №4, С. 483-496.

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС

Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Сайфуллин И.Ш.

Институт машиноведения им А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия (ins17@yandex.ru).

Цель работы - исследование и объяснение причин динамической неустойчивости гидравлических электростанций (ГЭС) с позиции возможности реализации в них нелинейных волновых и автоколебательных резонансов. Известно, что ГЭС представляют собой сложные взаимно нелинейно связанные роторные и гидромеханические системы. Таким системам присущи вибрации и колебания, приводящие при определенных условиях, к разрушениям, как это случилось с Саяно-Шушенским ГЭС (СШ ГЭС). Причины разрушений еще далеки от полного понимания. Для СШ ГЭС остаются не выясненными конкретные механизмы динамической неустойчивости ее агрегатов, приведшие к крупнейшей в истории аварии. Экспертные оценки ограничиваются лишь предположениями об усталостном разрушении шпилек и, обусловленного этим, перехода обычного режима вращения рабочего колеса в насосный режим, к обрыву перьев лопаток направляющего аппарата [1-2].

Нами, основываясь на свои экспериментальные исследования и представленные в литературе данные [3-11] рассмотрена и подтверждена гипотеза о нелинейном волновом механизме разрушения СШ ГЭС. На первом этапе исследования были выделены основные определяющие парциальные системы (подсистемы) и определены их собственные частоты. Далее рассчитаны частоты внешних возмущающих сил и уточнены частоты колебаний, регистрируемые на СШ ГЭС и в ее окрестностях. Это позволило поэтапно определить возможные нелинейные резонансные соотношения для всего рассматриваемого объекта. Например, для динамической схемы с вращающейся роторной части гидроагрегата теоретически возможны нескольких десятков многократных резонансов.

По результатам проведенных исследований предложены научно обоснованные подходы для повышения надежности и безопасности ГЭС, которые в том числе включают: -исключение опасных нелинейных многократных режимов колебаний системы, - стабилизацию и гашение колебаний и волн на основе использования комбинированных упругодемпфирующих и проницаемых конструкций.

Список литературы

1. Акт технического расследования причин аварии, происшедшей 17 августа 2009 года в филиале Открытого Акционерного Общества «РусГидро» — «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного».
2. Курзин В. Б., Селезнев В.С. О механизме высокого уровня вибрации турбин Саяно-Шушенской ГЭС. Прикладная механика и техническая физика. Т.51, №4,2010.
3. Ганиев Р. Ф., Ганиев С. Р., Касилов В.П., Пустовгар А.П. А Волновые технологии в инновационном машиностроении. Изд. 2-е, перер. и доп. М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2012. 92 с.
4. Ганиев Р.Ф. Нелинейные резонансы и катастрофы. Надежность, безопасность и бесшумность.- М.: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2013.-592 с.
5. Брызгалов В. И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций. Производственное издание. Сибирский ИД «Суриков», 1999. 562 с.
6. Окулов В. Л., Пылев И. М. Неустойчивость напорных систем // Доклады Академии наук, Энергетика, 1995, том 341, № 4.
7. Лобановский Ю. И. Автоколебания напорных систем и разрушение гидроагрегатов. Гидротехническое строительство. Научно-техническая фирма «Энергопрогресс», №7, 2010.
8. Лобановский Ю.И. Технические причины катастрофы на Саяно-Шушенской ГЭС (итоги расследования) <http://www.synerjetics.ru/article/catastrophe.htm>, 2009г.
9. Курзин В. Б. Низкочастотные собственные акустические колебания в проточной части гидротурбин // ПМТФ. 1993. №2. с. 96-106.
10. Арм В. Х., Курзин В. Б. Низкочастотные гидроакустические колебания в проточной части гидротурбин // Тр. центр ин-та авиац. моторостроения. №1294: Тез. докладов 13-й Всесоюз. конф. «Аэроупругость турбомашин». стр. 8.
11. Арм В. Х., Окулов В. Л., Пылев И. М. Неустойчивость напорных систем гидроэнергоблоков. Известия Академии наук. Энергетика, 1996, №3. С. 122-132.

ЭФФЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛНОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОЦЕССАХ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ УГЛЕРОДНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ В ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЕ И ПОЛУЧЕНИЯ КАРБОКСИМЕТИЛИРОВАННОГО КРАХМАЛА (КМК)

Ганиев С.Р.¹, Касилов В.П.¹, Кислогубова О.Н.¹, Курмев Д.В.¹, Маслов П.М.¹, Коптелова Е.К.²

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

²ФГБНУ ВНИИ Крахмалопродуктов

Цель работы – исследование влияния волнового воздействия на динамику диспергирования технического углерода в высоковязкой полимерной матрице для получения ПМК, а также исследование степени дезагрегации частиц в композициях, полученных по волновой и традиционной технологиям.

Одним из активно развивающихся направлений промышленности является производство полимерных композиционных материалов (ПМК), изделия из которых благодаря своим уникальным свойствам успешно применяются для замены изделий из металлов и широко используются в производстве высокопрочных конструкционных материалов в авиации, судостроении, машиностроении, ракетной и космической технике, электротехнике, приборостроении.

При производстве ПМК большое значение имеет равномерное распределение частиц наполнителя или армирующего компонента в объеме матрицы (связующего). Поэтому основной задачей при производстве композитов является равномерное диспергирование и исключение образования агломератов микро и наночастиц в полимерной среде, что вызывает определенные сложности особенно при диспергировании в вязких и высоковязких средах. Разработанный в ИМАШ РАН (НЦ НВМТ) на основе методов нелинейной волновой механики новый класс технологий позволяет интенсифицировать процессы перемешивания на волновых машинах и аппаратах, что дает возможность на принципиально новом уровне решать актуальные задачи данного направления.

Были проведены эксперименты по диспергированию технического углерода, как одного из широко применяемых наполнителей в полимерной матрице. В качестве матрицы была выбрана эпоксидная смола, которая является одним из лучших видов связующих для большого числа композитов, благодаря своим свойствам, позволяющим получить после отверждения материалы с широким сочетанием свойств.

Осуществление процесса диспергирования технического углерода в эпоксидной смоле проводили на установке волнового смешивания ВСМ-3, в которой обеспечиваются интенсивные сдвиговые напряжения как неперiodического, так и волнового воздействия. Для сравнения эксперименты проводили как с волновым воздействием, так и без него, при работе только циркулярного привода. Через определенные промежутки времени исследовалась степень дезагрегации полученных композиций с помощью микроскопа.

Структура композиций представлена на рис.1, где приведены микрофотографии, отражающие изменение распределения в эпоксидной матрице частиц технического углерода в процессе перемешивания при волновом воздействии и без него.

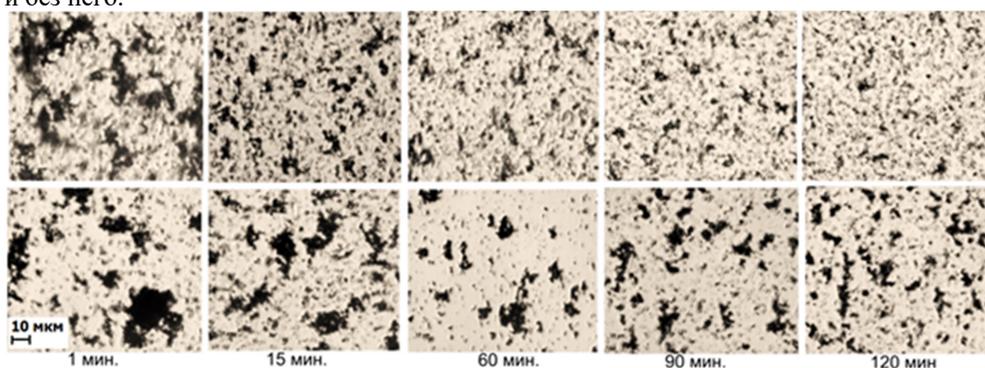


Рис. 1. Микрофотографии проб эпоксидного состава с техническим углеродом (увеличение $\times 1000$): волновое смешение (вверху), перемешивание без волнового воздействия (внизу)

Результаты показывают, что при волновом воздействии удается достичь более высокой степени дезагрегации частиц и более равномерного их распределения в матрице эпоксидного связующего по сравнению с процессом перемешивания аналогичного состава без применения волновой обработки. Это свидетельствует о высоких возможностях волновых методов диспергирования и перспективности дальнейших разработок в решении задач данного направления.

Одним из широко развивающихся современных направлений является получение модифицированного крахмала с заданными потребительскими свойствами путем физического, химического, биологического или комбинированного воздействия на нативный крахмал. В результате получают модифицированные крахмалы с повышенной влагоудерживающей, загущающей, эмульгирующей, пленкообразующей способностью, которые широко используются в целом ряде отраслей промышленности, таких как, пищевая, целлюлозно-

бумажная, текстильная, в нефтебурении для стабилизации и обработки буровых растворов, строительстве, в медицине, при изготовлении сосудов разового пользования и биоразлагаемых композитов, как компонент моющих средств и ряде других. Одним из широко применяемых модифицированных крахмалов является карбоксиметилкрахмал КМК, для получения которого используют «сухой» и «мокрый» методы.

"Сухой" способ является более перспективным с точки зрения производительности и экологии, но проведение процесса данным методом осложняется затруднениями в достижении тонкого перемешивания сухих компонентов с целью увеличения межфазной реакционной поверхности для интенсивного протекания реакции. Поэтому в настоящее время наибольшее применение получили более энергозатратные технологии, основанные на "мокроем" способе. В настоящий момент развитие технологий данного направления требует разработки новых видов высокоэффективного современного оборудования, основанного на базе последних достижений в области фундаментальных наук.

В ИМАШ РАН (ИЦ НВМТ) разработан новый класс технологий – волновых технологий на основе методов нелинейной волновой механики, применений которых позволяет интенсифицировать процессы перемешивания на волновых машинах и аппаратах. В соответствии с этим, совместно с сотрудниками Института Крахмалопродуктов проведены эксперименты, целью которых было исследование возможности применения волновых технологий для получения КМК и изучение свойств продукта, полученного волновым способом.

В данных экспериментах получение КМК осуществляли «сухим» способом, более сложным и более перспективным и для проведения процесса карбоксиметилирования.

Карбоксиметилирование крахмала осуществляли на экспериментальной установке волнового смешивания. После получения образцов в течение 1 месяца проводились исследования динамики изменения вязкости 4% водного раствора полученных образцов КМК, а также набухаемость, зольность и степень замещения.

В результате проведенных экспериментов по волновой технологии "сухим" методом был получен ряд образцов КМК разной степени замещения (в зависимости от концентрации исходных компонентов). Образцы обеспечивали быстрое набухание в холодной воде, необходимое водопоглощение и создание вязких составов. На базе проведенных экспериментов можно утверждать, что волновые технологии позволяют создать новый класс высокоэффективных технологий модифицирования крахмала.

О НЕЛИНЕЙНОМ ХАРАКТЕРЕ ПРОТЕКАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ, КАВИТАЦИОННЫХ И ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ МЕЖДУ СОБОЙ В ПРОТОЧНОМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ГЕНЕРАТОРЕ ПЛОСКОГО ТИПА ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ПЕРЕКРЫТИЯ ПОТОКА ТЕЛАМИ ОБТЕКАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Ганиев С.Р., Шмырков О.В., Рудаков В.П.
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

В работе представлены результаты исследований влияния кавитации и степени перекрытия потока цилиндрическими телами обтекания на картину течения, газодинамические и спектральные характеристики проточного гидродинамического генератора плоского типа, базовые основы которого заложены в работах академика РАН Р.Ф. Ганиева [1]. Результаты получены на гидродинамическом стенде СТ – 3 экспериментальной базы НЦ НВМТ РАН при степени перекрытия потока телами обтекания $S_l/S_0 = 10 - 82 \%$, числах $Re = (0,5 - 5) \cdot 10^5$, давлении на входе $P_{вх} = 0,1 - 0,8$ МПа.

В результате проведенных исследований было получено, что в проточной части гидродинамического генератора плоского типа за цилиндрическими телами обтекания при одном и том же перепаде давления могут реализоваться два различных вида течения: с развитой кавитационной зоной и без нее. В последнем случае наблюдаются попеременно образующиеся вихри, возникающие в результате отрыва пограничного слоя с поверхности тел обтекания. Внутри кавитационной зоны образуется обширная закрытая область пониженного давления, в которой возникают крупные газовые пузыри, характерные для режима кипения жидкости. Величина давления в ней не зависит от величины выходного давления и при увеличении степени перекрытия потока до 82% снижается до $P_d = 1$ КПа. Внутри вихревых образований возникают крупные очаги кавитационных пузырьков, которые при смещении вихревых дорожек вниз по потоку схлопываются, при этом при определенных значениях перепада давления за телами обтекания возникают мощные пики давления резонансного типа, амплитуда которых в 2 – 2,5 раза превышает максимальное значение входного давления. Отношение $P_{вых}/P_{вх}$, при котором возникают пики давления, для каждого значения S_l/S_0 являются постоянной величиной. Амплитуда резонансных пиков давления A_{PE3} с увеличением ΔP линейно возрастает; зависимость $A_{PE3} = F(S_l/S_0)$ является существенно нелинейной с наличием характерного максимума при $S_l/S_0 = 0,5$. Показано, что наибольшая интенсивность волновых процессов реализуется при установке тел обтекания, диаметры которых лежат в диапазоне $d = 8 - 13$ мм. Частота возникновения пиков давления с увеличением ΔP линейно возрастает, а с увеличением S_l/S_0 в диапазоне 0,1 – 0,82 снижается на порядок. Зависимость числа Струхала от степени перекрытия потока $St = F(S_l/S_0)$ в исследуемом диапазоне чисел $Re = (0,5 - 5) \cdot 10^5$ носит линейный характер. С ростом S_l/S_0 величина St увеличивается и при $S_l/S_0 = 0,82$ достигает значения $St = 1,2$.

Полученные в широком диапазоне определяющих параметров экспериментальные данные свидетельствуют о сложном нелинейном характере протекания гидродинамических, кавитационных и волновых процессов в генераторе плоского типа с цилиндрическими телами обтекания и могут быть использованы для совершенствования физико-математической модели при расчете подобного вида течений.

Список литературы

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. – М.: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. 712 с.

ПУТИ СНИЖЕНИЯ КОГЕРЕНТНОСТИ УЗКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ В СПЕКТРАХ ПОДВОДНОГО ШУМА МОРСКИХ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Глазов Ю.Е., Ракитина И.С., Ксенофонтов В.И., Пузакина А.К.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

Одной из наиболее значимых составляющих, формирующих структуру спектров подводного шума морских подвижных объектов (МПО) являются узкополосные дискретные составляющие (ДС), обусловленные работой корабельных механизмов и движителем. Особенностью ДС, обладающих высокой степенью когерентности, является возможность их выделения из общего шума, создаваемого МПО, на значительно больших дистанциях, чем обнаружение цели по широкому спектру. ДС помимо информации о наличии цели, несут классификационную информацию и позволяют осуществлять сопровождение цели на дистанциях в 3÷5 раз и более превышающих дистанции обнаружения по сплошной части спектра. В связи с этим задача разрушения когерентной структуры ДС подводного шума является весьма актуальной в проблеме управления физическими полями МПО. Метод модуляции частоты вращения заключается в следующем..

К блоку управления оборотами таких агрегатов, как главный турбо зубчатый агрегат (ГТЗА) и автономный турбо генератор (АТГ), подключается вариатор частоты вращения» (ВРЧ), позволяющий изменять число оборотов по специальным случайным законам в пределах 5% от стационарного режима. Когда угловая скорость агрегата непостоянна и характеризуется изменением во времени в виде: $\omega(t) = \omega_0 + f(t)$, то при $|f(t)/\omega_0| \ll 1$, колебания конструкции имеют вид

$$x(t) = H \omega_0^2 \cos \left[\omega_0 t + \int_0^t f(t) dt + \varphi_0 \right]. \quad (1)$$

Выражение (1) описывает колебания, модулируемые по частоте, а функция $f(t)$ называется модулирующим сигналом. В работе [1] показано, что спектр девиации частоты $F(t)$ и спектр частотно-модулированных сигналов связаны нелинейным интегральным уравнением, которое в общем случае не имеет решения. В частном случае, который реализуется в механических системах при использовании метода модуляции частоты, можно получить решение, описывающее степень уменьшения когерентности узкополосного сигнала

$$X(\omega) = \frac{(H_0 \omega_0^2)^2}{2\sqrt{2\pi\Omega^2}} e^{-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\Omega^2}} \quad (2)$$

Таким образом, в исследуемом спектре получается Гауссова форма спектральных линий с шириной (по уровню 1/e от максимального значения), равной $2\sqrt{2\Omega^2}$. Как видно из выражения (2), снижение когерентности сигнала определяется величиной среднего значения спектральной плотности $\overline{\Omega^2}$ и равно

$$N = \left(\frac{\overline{\Omega_2^2}}{\overline{\Omega_1^2}} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где N - величина снижения степени когерентности, $\overline{\Omega_1^2}$ и $\overline{\Omega_2^2}$ - квадраты среднего значения спектральной плотности девиации частоты при стационарном режиме работы механизма и в режиме модуляции частоты вращения соответственно.

Таким образом, можно достаточно эффективно расширять полосу сигнала. Ограничения накладываются при этом условиями функционирования механизмов и АЧХ системы. Вместе с тем, чтобы затруднить выделение модуляционной составляющей сигнала, целесообразно задавать функцию $f(t)$ случайным образом по специальным законам. В случае ГТЗА это приводит к разрушению когерентности ДС, обусловленных работой движителя, оборотами турбины и редуктора.

Исследования при натуральных испытаниях ряда МПО, а также по заключению завода изготовителя ГТЗА показали, что этот режим возможно применять до 30% от номинальной мощности ГТЗА, т.е. на скоростях значительно превышающих скорости малошумного хода. В случае АТГ изменяется схема электропитания. Потребители, требующие высокую точность поддержания частоты питания (штурманское оборудование, вооружение и т.д.) переключаются на источники питания с малой мощностью. На АТГ подключаются все насосы, как основные источники шума. Данный режим работы корабельного оборудования был испытан на стенде НИЛ «Борт-70», при этом замечаний по работе вспомогательного оборудования не было. В то же время этот режим приводит к разрушению когерентности ДС с частотами 50 Гц и 100 Гц, а также с оборотными и лопаточными частотами насосов.

Список литературы

1. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн-г. Москва, Сов. радио, 1975г., с.392.

РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ В ТЕХНОЛОГИЯХ ПОИСКА, РАЗВЕДКИ, РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ И ИХ ДОБЫЧИ

Глазунов В.А.¹, Филиппов О.С.², Рослякова А.С.², Филиппов Г.С.¹, Швец П.А.¹

¹ИМАШ РАН

²МГУ им. М.В. Ломоносова

В настоящее время весьма остро стоит вопрос специализированного оборудования, применяемого при добыче полезных ископаемых. Развитие отечественных технологий отстает от мирового уровня и существенно зависит от зарубежных разработок. Руководство России уделяет значительное внимание снижению зависимости от импортных поставок научного, испытательного оборудования, приборов и электронных компонентов.

В геологоразведке и добыче углеводородов важную роль играет геомеханическое моделирование процесса бурения и разработки месторождений. Часто возникают ситуации, в которых путь ствола скважины от земной поверхности до месторождения является сложным, что порождает дополнительные сложности в методах бурения и добычи. Они могут заключаться в труднодоступности возникающих участков дополнительной обработки и сложностью методов манипулирования для их устранения.

Применение робототехнических систем параллельной структуры может существенно облегчить технологии поиска, разведки, разработки месторождений полезных ископаемых и их добычи, поскольку могут иметь компактные размеры, высокую маневренность и грузоподъемность, обеспечивать неподвижную точку ввода манипулятора.

Авторы принимают активное участие в решении данной проблемы. Был синтезирован ряд механизмов параллельной структуры, которые позволяют перемещать манипулятор в сложных условиях через небольшие каналы входа (рис. 1) [1]. Важной проблемой является разработка системы управления механизмом, сочетающая в себе решение ряда сопутствующих задач. Они включают в себя решение задачи положений, скоростей и динамики, учет возможных ошибок, обратную связь.

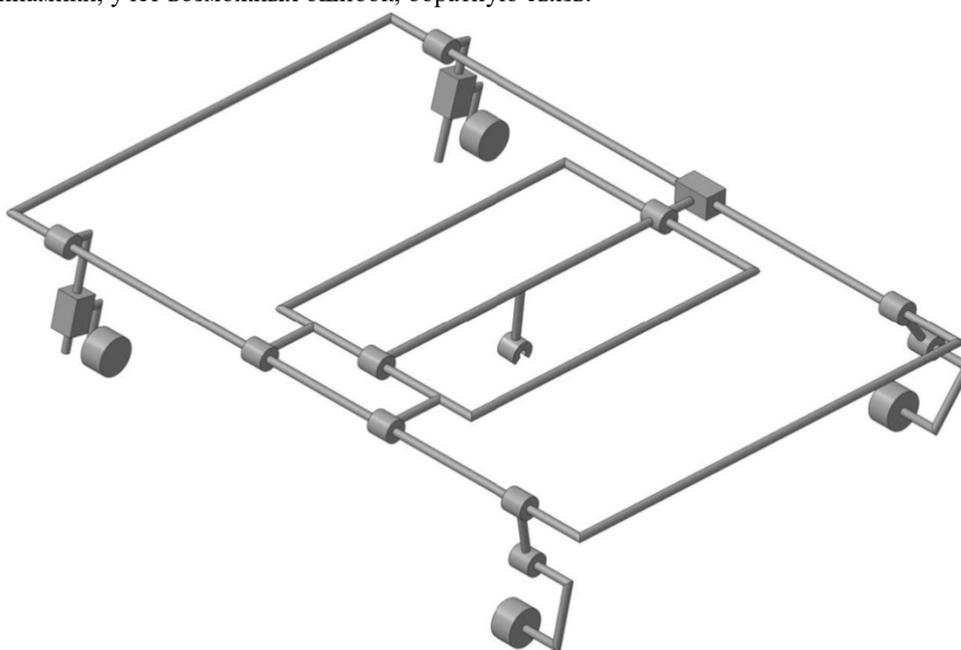


Рис. 1. Механизм параллельной структуры с пятью степенями свободы.

Применение механизмов параллельной структуры при бурении и разработке месторождений углеводородов может позволить снизить зависимость отечественной промышленности от импортных поставок и значительно увеличить возможности добычи полезных ископаемых.

Список литературы

1. Новые механизмы в современной робототехнике / под ред.: Глазунова В.А. –М.: Техносфера, 2018. -316С.

ПРОБЛЕМЫ СИНТЕЗА УСТОЙЧИВОГО ДВИЖЕНИЯ ДВУНОГОГО РОБОТА

Горбцов А.С., Ковалева Н.Л.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

Рассмотрены особенности решения уравнений метода обратной задачи для синтеза программного движения двуногого робота с использованием методов динамики связанных систем тел. Предложены методы формирования и решения уравнений движения, учитывающие вторые производные в уравнениях связей, выражающих условия устойчивости робота. Анализируются экспериментальные результаты управления роботом – андроидом с помощью предложенного подхода.

Синтез управляемого движения двуногих роботов методом обратной задачи сводится к решению уравнений динамики систем твердых тел с неголономными связями. Неголономные связи вызваны наличием вторых производных координат звеньев робота в уравнениях, выражающих условия устойчивости робота в смысле сохранения вертикального положения. Такие уравнения представляют собой новый класс задач динамики, методы решения которых на настоящий момент разработаны недостаточно полно. В работе рассмотрены особенности численного решения таких задач для многомерных механических систем произвольной структуры. Предложенные методы реализованы в системе управления роботом андроидом AP600 – рисунок 1.

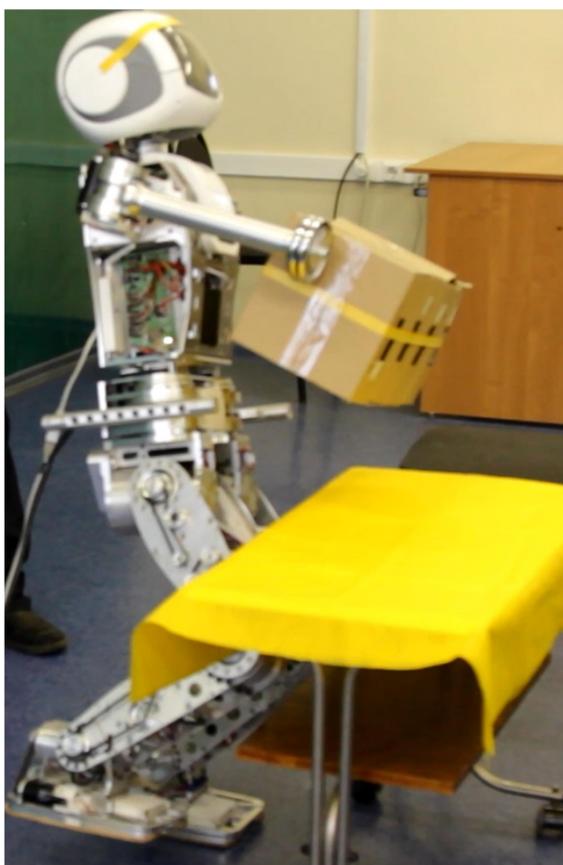


Рис. 1. Пример управляемого движения антроида – перенос груза в боковом направлении.

МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ НА ВИБРАЦИЮ И УДАР

Гребенников А.С., Бахтин Б.Н., Томилина Т.М.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (grebennikov@imash.ac.ru)

Отдел на протяжении многих лет активно сотрудничает с Институтом космических исследований РАН (ИКИ РАН) в разработке механических конструкций космических приборов и проведении испытаний на их прочность к механическим воздействиям в процессе полёта. В результате совместного сотрудничества были осуществлены успешные проекты по исследованию дальнего космоса (прибор HEND проекта «2001 Mars Odyssey» (NASA) запущен к Марсу в 2001г; прибор LEND проекта «LRO» (NASA), запущен к Луне в 2009г; прибор DAN проекта «MSL» (NASA), запущен к Марсу в 2011г; прибор FRENDO проекта «ExoMars» (ЕКА-Роскосмос), запущен к Марсу в 2016г, прибор MGNS проекта «VeriColombo» (ЕКА), запущен к Меркурию в 2018г). В настоящее время отдел активно участвует в испытаниях космических приборов проектов Роскосмоса («Луна-25», запуск запланирован на 2020-21г.г.; «Луна-26», запуск запланирован на 2022г.)

Поскольку запуски осуществлялись в рамках проектов осуществлявшихся различными агентствами (NASA, ЕКА, Роскосмос) были изучены отечественные и зарубежные требования к прочности механических конструкций при воздействии вибрационных и ударных нагрузок, действующих на космический аппарат и научную аппаратуру на различных этапах полёта. По результатам этих исследований были разработаны методики по проведению испытаний космических приборов на вибрацию и удар.

Методики по проведению испытаний на прочность к вибрационным нагрузкам создавались исходя из имеющихся вибростендов в ИКИ РАН и НПОЛ им. Лавочкина (создатель космических аппаратов по лунным программам Роскосмоса). При создании методик были спроектированы различные оснастки, удовлетворяющие требованиям максимальной жёсткости, адаптированные как к имеющимся стендам, так и к конкретным приборам. В методике испытаний были учтены различия в параметрах вибрационных нагрузок в зависимости от этапов полёта и расположении конкретных приборов на космическом аппарате. Методики также включают в себя процедуры по определению сохранения механической целостности космического прибора в результате испытаний.

Если для проведения вибрационных испытаний производятся промышленные стенды, оснащённые ПО с алгоритмами для проведения испытаний, то для проведения ударных испытаний по заданному ударному спектру в настоящее время стандартизированных промышленных стендов не существует. Впервые эта проблема возникла при испытании космических приборов в рамках проектов зарубежных космических агентств (NASA, ЕКА). В результате в ИМАШ РАН силами отдела были разработаны и созданы ударные экспериментальные установки и разработаны методики проведения испытаний на них. В настоящее время они адаптированы и аттестованы для проведения испытаний космических аппаратов по лунным программам Роскосмоса.

При создании ударных экспериментальных установок были проанализированы подходы, применяющиеся в мировой практике. Были определены оптимальные типы ударных установок для проведения испытаний по ударному спектру и рассчитаны их базовые параметры. Ударные установки допускают подстройку под различные ударные спектры, за счёт изменения ряда параметров (масса бойка, высота сброса бойка, расположение наковален, дополнительные массы и т.п.).

Для вычисления и визуализации ударного спектра и для сравнения его с заданным был разработан и создан измерительно-вычислительный комплекс, преобразующий временной сигнал отклика в ударный спектр в режиме on-line.

Для проведения испытаний космических приборов на прочность при ударных воздействиях была разработана методика, включающая в себя предварительную настройку стендов на макетах приборов. Кроме того on-line обработка ударных воздействий позволяет корректировать некоторые параметры воздействия в процессе самих испытаний. Методика предусматривает также процедуры по определению сохранения механической целостности космического прибора в результате испытаний.

В итоге многолетней работы в Отделе созданы ударные экспериментальные установки с измерительно-вычислительным комплексом и методиками проведения испытаний на них. В настоящее время они являются базовыми установками для ударных испытаний космических приборов по лунным программам Роскосмоса, а также используются для испытаний отдельных приборов по программам ЕКА.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ В КОНТАКТЕ УПРУГИХ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Данилов В.Д.¹, Усов П.П.², Шитов Г.М.³

¹ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; (danilovvd@mail.ru)

²НИИ МИЭТ, Москва, Зеленоград, Россия;

³НИТУ МИСиС, Москва, Россия.

Представлена математическая модель и система уравнений смазанных упругих шероховатых поверхностей для упругогидродинамического, гидродинамического и смешанного режимов трения. Определены оптимальные параметры шероховатости перехода одного режима в другой.

Рассматриваются стационарное качение со скольжением двух упругих цилиндров, разделенных слоем СМ, который считаем сжимаемой ньютоновской жидкостью. Для учета изменения вязкости жидкости с изменением давления используем модель Роланда [1]. Влияние давления на плотность смазочного материала оценивалось по [2].

Распределение давления в смазочном слое в гидродинамическом режиме определяем из нестационарного уравнения Рейнольдса [3].

Толщина смазочного слоя исследуется и находится с учетом упругих деформаций контактирующих тел в гидродинамическом режиме. В режиме гидродинамического трения исследуемые параметры устанавливаются с учетом характеристик шероховатостей (высота микронеровностей и шаг микронеровностей).

В режиме смешанного трения распределение давления в смазочном слое определяется из усредненного по потоку смазочного материала при заданном распределении шероховатости.

Выполненный численный анализ влияния шероховатостей на свойства смазочной пленки позволил получить следующие выводы.

Деформации тел существенно уменьшают высоту неровностей в области высокого давления. При этом давление имеет максимум в области, в которой выступ шероховатости уменьшает толщину смазочного слоя, и минимум, где шероховатость способствует увеличению толщины смазочного слоя. В результате этого изменение толщины смазочного слоя в области высокого давления, обусловленное шероховатостью мало по сравнению со средним значением толщины в этой области.

Хотя пульсации толщины смазочного слоя в области высокого давления гасятся деформациями тел, пульсации распределения давления в этой области велики и они растут с ростом высоты микронеровностей. Когда высота микронеровностей достигает определенного значения, происходит разрыв смазочного слоя и контакт переходит в режим смешанного трения.

Значение высоты микронеровностей R_q , при котором происходит переход из гидродинамического режима в режим смешанного трения, существенно зависит от шага микронеровностей.

Рост нагрузки приводит к уменьшению толщины смазочного слоя, но слабо влияет на высоту микронеровностей, при которой происходит переход в режим смешанного трения.

Уменьшение модуля упругости контактирующих тел приводит к увеличению размера области высокого давления и к повышению высоты микронеровностей, при которой происходит переход в режим смешанного трения.

В результате приведенных исследований переход упругогидродинамического режима контакта двух смазываемых цилиндрических металлических тел в режим смешанного трения зависит от параметров шероховатости микронеровностей (высоты и шага).

С увеличением скорости качения значение высоты микронеровностей R_q , при которой происходит переход из гидродинамического режима в режим смешанного трения, возрастает, благодаря увеличению смешанного слоя в области высокого давления.

Список литературы

1. Roelands C. J. A. Correlation aspects of viscosity-temperature-pressure relationship of lubricating oils. PhD thesis//Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 1966
2. Dowson D., Higginson G. R. Elastohydrodynamic Lubrication. The Fundamentals of Roller and Gear Lubrication//Permagon Press, Oxford, Great Britain, 1966.
3. Галахов М.А., Усов П.П. Дифференциальные и интегральные уравнения математической теории трения, М.: Гл. ред. физ.- мат. лит. – 1990, 280с.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Демидов С.М.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

Разработаны проблемно-ориентированные алгоритмы управления роботом параллельной структуры, предназначенным для космического телескопа, на основе представления динамических свойств робота. В системе управления предусматриваются обратные связи по положению и по скорости. В качестве приводов приняты двигатели постоянного тока, при расчетах принято, что индуктивностью можно пренебречь. Уравнения, описывающие движение системы робот параллельной структуры – антенна космического телескопа с обратной связью по положению имеют вид:

$$\frac{dV_x}{dt} = \frac{[(\sqrt{(x_d - x_{B1})^2 + (y_d - y_{B1})^2} - \sqrt{(x - x_{B1})^2 + (y - y_{B1})^2}) \frac{(x - x_{B1})}{\sqrt{(x - x_{B1})^2 + (y - y_{B1})^2}}] K_{\phi 1}}{m} - \frac{[(\sqrt{(x_d - x_{B2})^2 + (y_d - y_{B2})^2} - \sqrt{(x - x_{B2})^2 + (y - y_{B2})^2}) \frac{(x - x_{B2})}{\sqrt{(x - x_{B2})^2 + (y - y_{B2})^2}}] K_{\phi 2}}{m} - \frac{[\frac{dx}{dt}(x - x_{B1}) + \frac{dy}{dt}(y - y_{B1})](x - x_{B1})}{\sqrt{(x - x_{B1})^2 + (y - y_{B1})^2}} C_{\omega 1} - \frac{[\frac{dx}{dt}(x - x_{B2}) + \frac{dy}{dt}(y - y_{B2})](x - x_{B2})}{\sqrt{(x - x_{B2})^2 + (y - y_{B2})^2}} C_{\omega 2}$$

По координате y уравнение аналогично. Здесь m – масса антенны, $K_{\phi 1}$, $K_{\phi 2}$ – коэффициенты обратных связей по положению, $C_{\omega 1}$, $C_{\omega 2}$ – коэффициенты противо ЭДС двигателей робота, x , y – текущие координаты центра масс антенны, x_d , y_d – предписанные координаты центра масс антенны в желаемом движении, в иллюстративном примере оно задано следующим образом: x_{B1} , y_{B1} , x_{B2} , y_{B2} – координаты точек B_1 , B_2 крепления приводов на космическом аппарате. Обобщенная скорость в каждой степени свободы определяется через абсолютную скорость и ее проекцию на ось соответствующего привода.

В иллюстративном примере принято, что $m = 1000$, $K_{\phi 1}$, $K_{\phi 2}$ – коэффициенты обратных связей по положению равны 1000, $C_{\omega 1}$, $C_{\omega 2}$ – коэффициенты противо ЭДС двигателей робота равны 1, x_{B1} , y_{B1} , x_{B2} , y_{B2} – координаты неподвижных точек B_1 , B_2 равны соответственно (-1, 0) и (0, -1). Предписанное движение задано уравнениями:

$$x_d = A [1 - \cos(\omega t)], y_d = 0.$$

Одна из обобщенных координат вызывает колебания, а другая обеспечивает сохранение траектории. В данном случае траектория расположена вдоль оси x . В результате решения получаем следующую зависимость изменения ошибки по времени (Рис. 1):

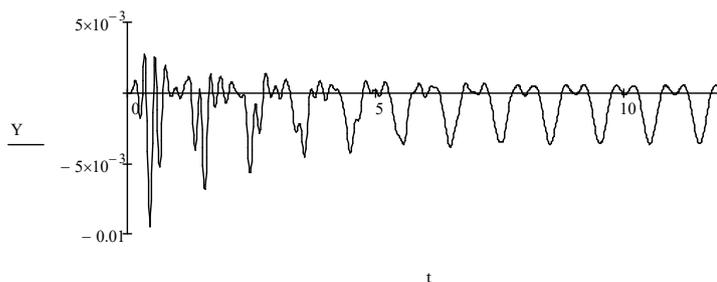


Рис. 1.

Таким образом, при анализе движений при наличии системы управления, имеющей обратную связь по обобщенным координатам, выявлено, что манипулятор работоспособен. Ошибка движения по траектории колеблется внутри некоторого «коридора», определяемого коэффициентом обратной связи.

ОЦЕНКА И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Дубинин Е.Ф., Кускова В.И.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия. (mibsts@mail.ru)

Развитие методов и средств технической диагностики потребовало исследования проблем эффективности разрабатываемых систем технической диагностики (СТД), оценки их влияния на эксплуатационные характеристики, безопасность и защищенность объектов диагностирования (ОД).

Эффективность СТД зависит от большого количества факторов, действие которых определяется, в том числе, характеристиками применяемых средств технического диагностирования, приспособленностью объекта к диагностированию, используемым диагностическим обеспечением (то есть параметрами конкретной СТД), а неэффективность, как правило, обуславливается несоответствием характеристик (параметров) СТД решаемым ей задачам [1].

Исходя из задач, решаемых СТД, можно сформулировать следующие основные направления и условия формирования эффективных систем технической диагностики (рис.1).



Рис.1. Основные направления и условия формирования эффективных систем диагностирования.

Для практических целей важна количественная оценка эффективности СТД, которая должна предусматривать (с учетом отраслевых особенностей объекта диагностики):

- определение экономической эффективности диагностической системы;
- расчет показателей, характеризующих качество (целевую эффективность) технического диагностирования (продолжительность, достоверность, точность и полнота технического диагностирования; глубина поиска отказа/неисправности; интервал упреждения; защищенность и устойчивость СТД к воздействию поражающих факторов аварийных ситуаций, технико-экономические характеристики диагностирования).

Экономическая эффективность (целесообразность) СТД определяется путем сравнения расходов на ее создание, оснащение, поддержание и развитие с экономией, получаемой от результатов ее функционирования. Экономия от результатов функционирования СТД, в свою очередь, складывается из двух основных составляющих. Это, во-первых, экономия текущих затрат от внедрения СТД и, во-вторых, величина предотвращенного ущерба от снижения аварийности ОД.

В общем случае при исследовании результативности СТД необходимо сначала оценить экономическую эффективность (целесообразность) их разработки и внедрения, а затем проанализировать пути ее возможно-го повышения и определить различные показатели качества диагностирования.

Конкретные методики оценки эффективности СТД в значительной степени зависят от отраслевой принадлежности объекта диагностики. Примерами могут служить объекты техники оборонного комплекса, железнодорожный транспорт и методы диагностики доказательной медицины [2].

Сформулированные направления отражают пути решения основных задач оценки и повышения эффективности СТД. Наилучших результатов при этом можно достичь только на основе комплексного повышения целевой эффективности всех элементов СТД, определяющих качество ее функционирования.

Список литературы

1. Махутов Н.А., Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Кускова В.И. Оценка и повышение эффективности диагностических систем // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2016. № 4. С. 8–24.
2. Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Кускова В.И. Некоторые аспекты оценки эффективности диагностических систем // Вестник научно-технического развития. 2016. № 4 (104). С. 3–18.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ПОВОРОТА ВОЛОКОН

Думанский А.М., Алимов М.А., Радченко А.А.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (alimov_mike@mail.ru).

В процессе эксплуатации элементы конструкций из композиционных материалов могут подвергаться существенным нагрузкам, а слои – испытывать деформации, выходящие за пределы упругости. Предположение о существовании линейной зависимости между напряжением и деформацией однонаправленного слоя вдоль волокна позволяет получить зависимости для определения компонент напряженно-деформированного состояния слоя [1], справедливые как в линейной, так и нелинейной области деформирования. Эти формулы верны при любых нелинейных эффектах, включая разгрузку с последующим нагружением и вязкоупругость.

Предложенный подход позволяет учесть, в частности, эффект поворота волокон в процессе деформирования, приводящий к перераспределению напряжений в однонаправленных слоях. Угол укладки волокон в процессе деформирования определяется соотношением:

$$\operatorname{tg} \theta = \operatorname{tg} \theta^* \left(\frac{1 + \varepsilon_y}{1 + \varepsilon_x} \right), \quad (1)$$

где θ^* - угол укладки волокон в недеформированном состоянии, ε_x и ε_y - деформации вдоль и перпендикулярно оси нагружения образца, соответственно.

На рис. 1 представлена диаграмма сдвига однонаправленного слоя образца из композитного материала T700SC/2500 со структурой $\pm 45^\circ$, где кривые 1 и 2 получены с учетом и без учета поворота волокон, соответственно.

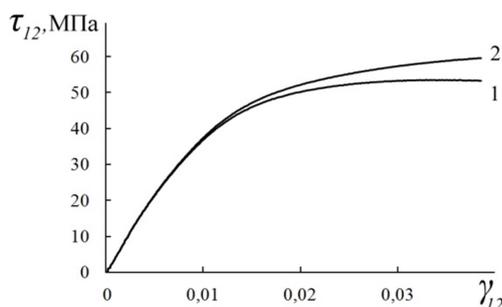


Рис. 1. Диаграмма сдвига однонаправленного слоя.

Если не учитывать поворот волокон, то уровень касательных напряжений оказывается выше фактических напряжений, определенных с учетом поворота волокон, а уровни напряжений в направлении вдоль волокна σ_1 и в поперечном направлении σ_2 будут существенно занижены.

Поскольку изменение ориентации волокон в процессе деформирования приводит к значительному перераспределению напряжений в однонаправленных слоях, то недооценка этого факта может стать причиной существенных ошибок при вычислении компонент НДС в области больших деформаций.

Список литературы

1. Думанский А.М., Алимов М.А., Радченко А.А. Анализ нелинейного поведения композитного материала при одноосном растяжении // Информатизация и связь. № 1 - 2013. - С.69-72.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОПЕРАТОРНО-МАТРИЧНЫХ МЕТОДОВ В МЕХАНИКЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ

Думанский А.М., Алимов М.А.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия: (aldumans@yandex.ru).

Цель

Широкое использование волокнистых композиционных материалов на полимерной основе подразумевает разработку методов расчета и прогнозирования их механических свойств, позволяющих производить оценку не только упругих и прочностных свойств при кратковременных внешних воздействиях, но и характеристик длительного деформирования и разрушения, сопротивления трещинообразованию материалов и элементов конструкций из них. Цель работы состояла в разработке расчетно-аналитических методов оценки механического поведения композиционных материалов, которые могут быть использованы при прочностной обработке материалов и силовых элементов конструкций, начиная с составления программы испытаний, обработки результатов эксперимента, создания методик идентификации механических свойств слоя и пакета и комплексной проверки корректности получаемых соотношений [1].

Определяющие соотношения

На основе закономерностей механического поведения однонаправленного слоя формулируются базовые предположения с помощью которых выполняется построение определяющих соотношений. В частности, при плоском напряженном состоянии определяющие соотношения для однонаправленного слоя в главных осях ортотропии могут быть записаны с помощью уравнений наследственной упругости:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= s_{ij} \sigma_j + \int_0^t K_{ij}(t-\tau) \cdot \sigma_j(\tau) d\tau = \left(s_{ij} + K_{ij}^* \right) \cdot \sigma_j \\ \sigma_i &= g_{ij} \cdot \varepsilon_j - \int_0^t R_{ij}(t-\tau) \cdot \varepsilon_j(\tau) d\tau = \left(g_{ij} - R_{ij}^* \right) \cdot \varepsilon_j, \end{aligned} \quad (1)$$

где операторные выражения описывают временные свойства материала, $i, j = 1, 2, 6$, s_{ij} g_{ij} - матрицы мгновенных компонент жесткости и податливости слоя, $K_{ij}(t)$, $R_{ij}(t)$ - ядра ползучести и релаксации, соответственно. При некоторых ограничениях установить взаимосвязь приведенных выше соотношений позволяют предложенные операторно-матричные методы, основанные на матричных алгоритмах и алгебре резольвентных операторов [1]. Подобным образом разработаны методы, позволяющие проводить оценку физически нелинейного деформирования слоев и слоистых сред.

Корректность предложенных методов показана с помощью комплексных экспериментальных исследований. Показано, что использование полученных определяющих соотношений позволяет описать анизотропию временных и нелинейных свойств композиционных материалов с произвольной укладкой слоев. Утверждается, что механические свойства определяются не только рядом числовых характеристик, но и рядом взаимосвязанных между собой материальных функций, которые характеризуют не только деформационные свойства композиционных материалов, но и их сопротивление трещинообразованию, что особенно важно для силовых элементов конструкций.

Матричные алгоритмы позволяют выполнять комплексную оценку степени влияния реологических и нелинейных свойств композиционных материалов, рассматривая их составляющие как возмущение матриц, характеризующих мгновенно-упругие свойства. Учет влияния нелинейной деформации выполнен с помощью нелинейного уравнения Работнова.

Используя принцип соответствия Вольтерра, операторные выражения наследственно-упругих характеристик композиционных материалов могут быть использованы в численных методах решения краевых задач для элементов конструкций для расчета и прогнозирования сопротивления при длительно действующих переменных во времени нагрузках.

Список литературы

1. Думанский А.М. Проблемы материаловедения в машиностроении. 2015. - М.: Ижевск: Институт компьютерных исследований – 52 с.

ВОЛНОВАЯ ДИНАМИКА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ДВИЖЕНИИ ОБЪЕКТОВ ПО УПРУГИМ НАПРАВЛЯЮЩИМ

Ерофеев В.И.

Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия; (erof.vi@yande.ru)

При постановке экспериментов на ракетном треке Российского федерального ядерного центра – Всероссийского НИИ экспериментальной физики по отработке новых перспективных видов изделий требуются все более высокие скорости разгона полезной нагрузки. Для разгона полезной нагрузки на ракетном треке используются ракетные поезда, состоящие из нескольких ступеней. В некоторых случаях движение высокоскоростных ступеней ракетных поездов сопряжено с развитием колебаний в их поперечном движении, приводящих к износу рабочих поверхностей и разрушению опорных башмаков ступени, повреждению рельсовых направляющих ракетного трека. Аналогичные проблемы имеют место и при проведении испытаний на ракетных треках США.

Возникновение упомянутых колебаний обусловлено возмущениями, вызываемыми объектом, движущимся по упругой направляющей. Динамическое воздействие движущегося объекта на направляющую вызывает в ней колебания в виде бегущих волн. Рассматриваемые колебания могут быть неустойчивы вследствие аномального эффекта Доплера, который имеет место при движении объекта со скоростью, превышающей фазовую скорость возбуждаемой им волны. В этом случае излучаемая волна увеличивает энергию поперечных колебаний объекта, уменьшая при этом энергию, обеспечивающую движение его вдоль направляющей. Существенное влияние на развитие поперечных колебаний высокоскоростных объектов оказывает динамическая жесткость в движущемся контакте рельсовых направляющих ракетного трека. В настоящее время разработаны методы определения динамической жесткости в движущемся контакте для распределенных упругих систем.

На примере простейшей модели объекта, представляющего собой двухмассовый осциллятор, движущийся по одномерной упругой направляющей, рассмотрена устойчивость поперечного движения высокоскоростных объектов по рельсовой направляющей ракетного трека. Показана зависимость динамической жесткости рельсовой направляющей в движущемся контакте от скорости движения объекта и частоты возмущения. Определены области неустойчивости поперечного движения двухмассовых осцилляторов, моделирующих движение реальных объектов. Проведено сопоставление с результатами экспериментов. Динамическая жесткость направляющей, лежащей на вязкоупругом основании, эквивалентна реакции сосредоточенного элемента, динамическая жесткость которого является комплекснозначной функцией частоты возмущения и скорости движения объекта. Действительная часть динамической жесткости отражает упругоинерционные свойства реакции направляющей, а мнимая – вязкостные. Положительная мнимая часть динамической жесткости отражает демпфирующие свойства реакции направляющей в движущемся контакте. Наличие отрицательной вязкости в движущемся контакте является необходимым условием возникновения неустойчивости колебаний движущегося по направляющей объекта.

Для двух типов осцилляторов, моделирующих движение по направляющей ракетного трека монорельсовых высокоскоростных объектов, проведены расчеты в диапазонах скоростей движения V : 500 – 2000 м/с и круговых частот воздействия: 6000 1/с. Показано, что значки, отображающие опыты с объектами массой 211 кг при скоростях движения 1080-1480 м/с, расположены выше верхней границы области неустойчивости. Все реальные опыты с этими объектами были зачетными, аварийных опытов не было. Значки, отображающие опыты с объектами массой 50 кг при скоростях движения 1280-1340 м/с, расположены выше нижней и ниже верхней границ области неустойчивости, т. е. в области неустойчивости. Эти опыты были аварийные. Сложнее обстоит дело с областью устойчивости, находящейся ниже нижней границы неустойчивости. При скоростях движения объектов 1440 м/с и 1830-1970 м/с обеспечивается устойчивость их поперечного движения. При скоростях 1560 м/с и 1600 м/с опыты завершились аварийно, хотя при той же скорости 1600 м/с имеется и зачетный опыт. Возможно, причиной этих аварий является не неустойчивость, а, например, резонанс.

Рассмотрена самосогласованная динамическая задача, включающая одномерную деформируемую направляющую, упругоинерционное основание (система осцилляторов) и движущуюся осциллирующую нагрузку. Показано, что в такой системе даже при низких «докритических» скоростях движущаяся нагрузка вызывает генерацию упругих волн. Определены частоты и волновые числа возбуждаемых волн.

Рассмотрена задача о массе, равномерно движущейся вдоль балки с периодически неоднородным поперечным сечением, лежащей на упругом основании. Аналитически показано, что в системе имеет место параметрическая неустойчивость. Получены зоны неустойчивости для различных значений параметров неоднородности.

ЭЛЕКТРОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НАПРАВЛЕННОСТИ МИКРОФОНОВ В СИСТЕМАХ ИЗМЕРЕНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Жданов А. С.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (alezhd@mail.ru)

Предлагается новый способ управления пространственным положением и шириной диаграммы направленности измерительных микрофонов различных типов с помощью многоканального электронного преобразователя сигналов. Этот метод позволяет изменять направление и ширину главного лепестка диаграммы направленности микрофонов и формировать измерительные системы с заданным базисом векторов чувствительности. В условиях сложных полей он даёт возможность повысить точность измерений путём увеличения селективности и помехозащищённости измерений. Также появляется возможность создания систем измерения акустических полей по ортогональным составляющим с формированием ортогонального базиса как с исходно квазиортогональным, так и косоугольным базисом. Принцип работы преобразователя основан на математическом аппарате линейных преобразований сигналов в многоканальных системах с перекрёстными связями между каналами.

Одним из существенных преимуществ данного метода является возможность управления характеристиками направленности микрофонов в том случае, когда они жёстко зафиксированы без возможности механического изменения их положения. Он может найти применение как для создания специализированных измерительных систем для исследований акустических полей, так и в промышленности для производства предварительно настроенных систем с установленными микрофонами.

МЕТОД УСКОРЕНИЯ ВНЕДРЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МАШИН И МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОВРЕМЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Зайнетдинов Р.И.¹, Гадолина И.В.²

¹Российская академия путей сообщения, Москва, Россия; (zri7755@gmail.com);

²Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

Создание инновационных технологий, машин и материалов для машиностроения является одним из наиболее перспективных направлений развития науки и техники современной России. Однако конкретные результаты инновационной деятельности не всегда соответствуют ожиданиям из-за недооценки научно-обоснованного управления инновационно-инвестиционными процессами. Новые возможности открываются подходами, основанными на синергетике, выявлении точек бифуркаций на траекториях инновационного замещения, а также на анализе аттракторов технологического развития.

Технологические системы в процессе своего обновления развиваются как открытые диссипативные устойчиво неравновесные системы, способные к самоорганизации. Наличие материального, энергетического и информационного потоков (в качестве которых в инноватике выступают потоки инвестиций, научной и патентной информации, кадров, оборудования, материалов и др.) от внешних источников к системе и их диссипация являются предпосылками активности обновляемой системы. В качестве критического элемента системы рассмотрена локальная зона повышенного градиента определяющего параметра X , лимитирующего режим работы всей обновляемой системы. Для анализа поведения такого критического элемента использована модель бистабильного элемента, обладающего двумя устойчивыми состояниями – старым (старвая) и новым (инновация), в каждом из которых он может находиться достаточно долго. Внешние воздействия на систему могут приводить к переходу критического элемента из одного состояния в другое. Рассмотрены три характерных режима существования системы с соответствующими значениями параметров режима α : старвая ($\alpha < 1$), бифуркация ($\alpha = 1$) и инновация ($\alpha > 1$). Выявлена зависимость режима существования системы, а также времени прохождения ею критической точки бифуркации от функции распределения случайного процесса воздействий на систему, ее входных потоков (например, инвестиционных и информационных). Построены графики зависимости параметра режима α от параметров случайного процесса (потока) на входе системы. В каждом конкретном случае внедрения инноваций законы распределения входных потоков и их параметры могут варьироваться.

При целенаправленном изменении параметров входных потоков появляется возможность оценивать время t_b преодоления критическим элементом системы точки бифуркации (или каскада бифуркаций) и влиять на него. Возможность прогнозирования времени t_b прохождения системы через это критическое состояние, характеризующее наиболее высокими рисками, позволяет заблаговременно предпринять меры, способствующие скорейшему переходу системы через точку бифуркации и успешной ее адаптации к инновационному состоянию. В этом интервале времени целесообразно (путем рационального управления входящими потоками), создать наиболее благоприятные условия для успешного прохождения обновляемой системой точки бифуркации (или каскада бифуркаций) в желаемом направлении, а также предпринять все возможные меры, чтобы направить систему по благоприятному пути развития. Потенциальные возможности, возникающие в момент бифуркации, привлекают развитие системы, она самоорганизуется, совершенствует свою структуру, переходит на качественно новый уровень развития. Отсюда следует, что технологическое развитие определяется не столько начальными условиями и «тяжелым наследием прошлого», сколько будущими возможными состояниями, т.е. аттракторами технологического развития, к которым система стремится после бифуркации. В реальности эти процессы необратимы.

Время является невозполнимым ресурсом, поэтому предлагаемый метод, предназначенный для сокращения сроков внедрения инноваций, целесообразно рассматривать, как один из важных и полезных инструментов концепции «Бережливые Инновации» (Lean Innovation) и рекомендовать его к использованию в инновационной деятельности РАН.

Разработана теоретическая модель и предложен практический метод ускорения внедрения инновационных технологий, машин и материалов для машиностроения. Метод основан на синергетическом подходе, анализе точек бифуркации и управлении входящими потоками. С целью практической апробации разработанного метода авторы готовы помочь в ускорении внедрения инноваций. Предложения о сотрудничестве просим направлять на E-mail.

3D-СКАНИРОВАНИЕ, КАК ФАКТОР РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Зуев В.В., Журавлев М.А.

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия (oozon@bk).

В настоящее время известны различные типы сканирующих систем, они отличаются по технологии сканирования, по своему типу и выполняют разные типы задач.

Можно выделить наиболее популярные технологии сканирования:

-технология структурирования света, где на объект сканирования проецируется так называемая маска из проектора, а отклонение фиксируется с помощью двух камер (система фирмы GOM);

- технологии лазерной триангуляции. Здесь роль маски играет лазерный луч (система фирмы Metroscan);

Важно понимать, что сканер — совокупность периферийного устройства и программного обеспечения, выпускаемый производителем. Многие 3D-сканеры особенно заметно различаются именно в части программного обеспечения, например — по принципу сшивки модели. Эти методы разнятся: некоторые используют сшивку по геометрии, другие — по текстуре, третьи — по меткам или сочетанию этих способов [1].

Можно выделить несколько типов сканирующих устройств. Стационарные сканеры, с их помощью мы сканируем относительно небольшие объекты с большей точностью, чем способны другие типы сканеров. Наземные лазерные сканеры предназначены для сканирования крупных объектов, может быть целое здание или элементы промышленного объекта. Применяются мобильные контрольно-измерительные машины, с возможностью замены сканирующей головки на щуп. Наиболее мобильны и просты в эксплуатации ручные сканеры.

Сканирующие системы не только позволяют производить лучшие продукты, но и сами становятся все лучше. Сканер от компании Artec — Artec Leo один из самых интересных на рынке. Его отличительной особенностью является возможность сканирования и работы с результатами сканирования без подключения к рабочей станции и электропитанию, для этого он снабжен батареей, мощным процессором и встроенным сенсорным дисплеем.

Одна из основных задач 3D-сканирования на производстве — реверс-инжиниринг или обратное проектирование. Получение чертежей единой конструкторской документации — одна из проблем, которые на современном производстве решаются с помощью сканирования. В случае, когда нет сканера, процесс получения чертежа выглядит примерно так: инженеры отправляются на объект с разным измерительным инструментом для снятия эскизных размеров, производят замеры, возвращаются к себе на рабочие места и начинают проектировать модель с нуля, по эскизу в CAD-программе — AutoCADe, Компасе, SolidWorks или какой-то другой, какая есть на предприятии.

Моделирование — трудозатратная задача, которая может отнять много времени у конструктора [2]. Еще одним негативным фактором в процессе создания чертежа может стать ошибка снятия размеров, в этом случае группе инженеров приходится возвращаться на объект. Данная процедура может повторяться несколько раз, пока не будет получен качественный, нужный нам чертеж изделия и 3D-модель, это может отнять много времени. Любое современное производство работает с 3D-моделями, куда бы вы сейчас ни обратились для создания прототипа или получения конечного изделия, такого как пресс-форма, везде будут требовать 3D-модель.

Сканирующая система получает трехмерную модель в виде облака точек. Далее, с помощью программного обеспечения, получаем 3D-модель в формате .STL или OBJ, из которой можно получить конструкторскую документацию, снять необходимые размеры.

При сканировании получаем геометрию изделия по всей его длине, а имея специализированный софт, можем на основе этих данных сделать заключение о сканируемом объекте.

Ручное снятие размеров приемлемо для крупногабаритных тяжелых объектов не самой сложной геометрической формы. Подобные объекты также оцифровывают с помощью сканера, к примеру — дома или промышленные установки. Данные задачи, как правило, выполняют специализированные сканеры.

Еще одна область применения, где незаменимы сканирующие системы, это операция контроля. На любом производстве имеется контроль: входной, выходной, промежуточный. В большинстве случаев там, где отсутствуют сканирующие системы, используются контрольно-измерительные машины, если мы говорим о серийном производстве. В отличие от контрольно-измерительных машин, сканеры не требуют выравнивания детали и написания сложной управляющей программы для каждого изделия, с которой не каждый квалифицированный специалист справится.

Повышение производительности труда вынуждает менять технологический процесс производства и межоперационного контроля. Ужесточающиеся требования к качеству выпускаемой продукции так же меняют требования к контролю качества.

Основное преимущество сканирующих систем перед другими методами контроля - это полное сканирование геометрии изделий по всей длине без данных САПР, инспекция всей поверхности изделий и функциональных размеров, экспорт результатов измерений и отчетов на внутренние серверы и в базы данных, статистический контроль процессов.

Нельзя не отметить, что сканирующие системы мобильны, в отличие от тех же традиционных контрольно-измерительных машин, позволяют носить их с собой и оцифровать габаритные объекты, сканируя их частями и сшивая модель в ПО.

Важным фактором является также то, что, сканируя и получив 3D-модели нескольких деталей, можно осуществить виртуальную сборку продукта до того, как будет осуществлена сборка на производстве. Это позволяет увидеть все проблемные места и исправить недочеты, не теряя лишнего времени.

На Рис.1 можно наглядно видеть сравнение результата сканирования с CAD-моделью. Все отклонения выражены в виде температурной шкалы, где зеленая зона — все, что находится в пределах допусков, красная и синяя — за ее пределами. Осуществлять сравнение можно в автоматическом режиме. Софт имеет возможность тонкой настройки, для вывода отчета в виде Excel-таблицы или PDF. Результат может быть направлен на производство, технологу, для скорейшего устранения брака.

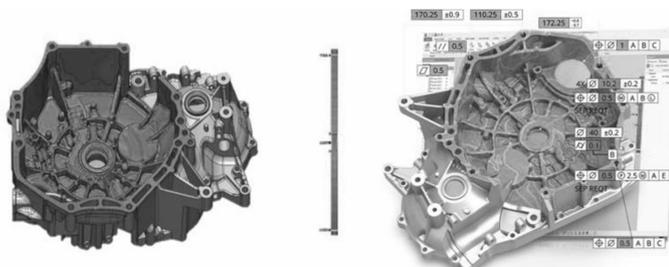


Рис. 1. Сравнение результата сканирования с CAD-моделью

Сканер, установленный на манипуляторе, позволяет автоматизировать процесс контроля выпускаемой продукции, и создать цифровую библиотеку изделий производства. При обнаружении брака конечным пользователем, у производителя появится возможность найти причину брака, достав 3D-модель из библиотеки [3].

Храня всю информацию о сканированных на производстве объектах, можно сформировать картину выпускаемой продукции и, на основе этого, прогнозировать дальнейший производственный цикл и влиять на него для сокращения издержек, если речь о контроле качества продукции, и предотвращения аварий, если мы говорим о диагностическом сканировании оборудования. Остановится производство, сломается инструмент, будут нарушены сроки и сорваны контракты, в результате вы потеряете доверие своих клиентов, которые в следующий раз обратятся не в вашу компанию, а в другую. Всего этого можно избежать своевременной модернизацией средств контроля.

Список литературы

1. Алиханов В.С. Создание 3D-модели детали, применяемые в оборудовании для промышленной теплоэнергетики. В сборнике материалов VIII всероссийской научно-технической конференции молодых ученых с международным участием «Россия молодая» Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2016. С. 672.
2. Большаков В.П., Бочков А.Л. Основы 3D-моделирования. СПб.: Питер, 2013.- 304с.
3. Печенкин И.А., Пузанов В.Ю., Гильфанов Р.М. Применение 3D-лазерного сканирования для повышения эффективности механической обработки исполнительных поверхностей деталей штамповой оснастки. Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 2 (24). С. 57-59.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ

Иванов А.Р., Большев К.Н.

Институт физико-технических проблем Севера СО РАН, Якутск, Россия; (spartak01@mail.ru);

В статье обосновывается актуальная проблема обеспечения безопасности эксплуатации трубопроводов и резервуаров нефтегазовой промышленности в условиях Республики Саха (Якутия), климатические условия в которой отличаются экстремальными перепадами температур и низкими температурами в холодное время года. Приводится сложившаяся классификация причин аварий на объектах нефтяной и газовой промышленности, при этом при дальнейшей детализации причин аварий отдельной группой причин аварий можно выделить повреждения материала и конструкции, вызванные их длительной эксплуатацией, когда в металле и конструкции происходят необратимые изменения: коррозия металла; усталость металлов; ухудшение механических характеристик металла; ползучесть.

В качестве характерного примера аварии с описываемыми выше предпосылками приводится повреждение резервуара РВС-700 №9 в Момском улусе Республики Саха (Якутия), произошедшее в сентябре 2008 года. Данное повреждение имело место вследствие хрупкого разрушения по основному металлу стенки, зоне термического влияния швов соединения стенки с крышей и дном при сочетании ряда факторов: старение металла резервуара, проявляющееся в охрупчивании металла, понижение температуры окружающего воздуха до - 42° С, наличия дефекта в виде трещины на стенке, использование СтЗпс, в качестве материала резервуара.

В качестве одного из средств предупреждения и предотвращения подобных аварийных ситуаций авторами предлагается автоматизированная система мониторинга, которая позволит контролировать текущее состояние резервуара, анализировать предыдущие нагрузки, а также предупреждать аварийные ситуации при превышении предельных деформаций материала.

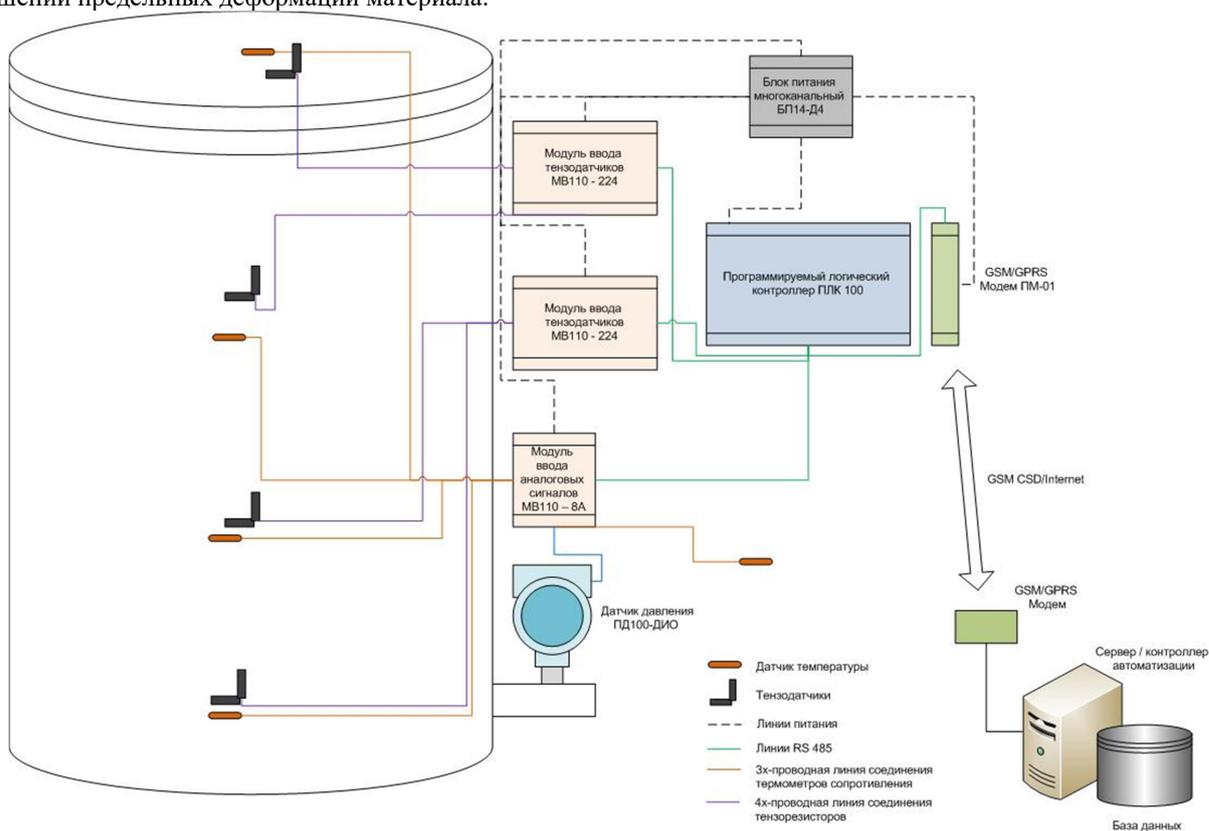


Рис.1. Аппаратная схема системы мониторинга.

Целью разработки системы является исследование и анализ нагрузок, действующих в течение процесса эксплуатации на резервуары для хранения нефтепродуктов.

Внедрение предлагаемой автоматизированной системы позволит осуществлять контроль режима эксплуатации резервуара и своевременно реагировать на потенциально аварийные ситуации. Работы по технической диагностике резервуаров проводятся в рамках экспертизы промышленной безопасности раз в 5 лет. Таким образом, предлагаемое нами решение дополняет существующий регламент оценки технического состояния резервуаров и осуществляет непрерывный контроль состояния в период между проведениями экспертных работ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В СРЕДЕ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ

Иванов В.П.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

При введении в жидкую среду частиц скорость распространения малых возмущений (скорость звука) в среде может существенно меняться в зависимости от концентрации частиц, их величины и взаимного расположения, что необходимо учитывать в исследовании динамических процессов в средах с включениями. В работе [1] был предложен способ вычисления скорости звука в среде с включениями, основанный на теории многократного рассеяния. При произвольном расположении частиц в пространстве анализ физического механизма изменения скорости звука затруднен из-за сложного поведения дифракционного поля на совокупности частиц. В работе [2] разработан другой способ многократного рассеяния. В этом способе не нужно вычислять конфигурационное среднее поле, а следует решать задачу дифракции на большом количестве регулярно расположенных частиц. Суть способа заключается в следующем. В пространстве с заданной скоростью распространения звука c и плотностью ρ выделяется область D , равномерно заполненная частицами, причем частицы расположены регулярно в виде соответствующих решеток, и исследуется задача дифракции стороннего звукового поля на этом множестве частиц. Далее предполагается, что область D без частиц представляет собой прозрачное тело с произвольной постоянной скоростью распространения звука c^* и плотностью ρ^* , и решается задача дифракции того же стороннего поля на прозрачном теле D . Из условия равенства вне области D звукового поля, рассеянного на решетке частиц и на прозрачном теле, находится величина скорости распространения поля в прозрачном теле D и эта скорость полагается равной эффективной скорости распространения поля в среде с частицами. Далее в качестве области D рассматривается круг радиуса R^* . В области D размещена Q -слойная решетка соосных кругов D_{qn} радиуса a с параметрами среды внутри цилиндров ρ_1 и c_1 . В цилиндрической системе с центром в O координаты $(r_{qn}^0, \varphi_{qn}^0)$ центров кругов D_{qn} задаются соотношениями $\{(r_{qn}^0, \varphi_{qn}^0): r_{qn}^0 = R_q, R_q = qR, R = R^*/Q, 2a < R, q = 1, \dots, Q-1, \varphi_{qn}^0 = \pi(n-1)/2q, n = 1, \dots, 4q\}$. Исследуется задача дифракции плоской волны $U_0 = A \exp(ikx - i\omega t)$, $k = \omega/c$, ω – круговая частота поля, c – скорость звука, на частицах с абсолютно мягкой поверхностью. Рассеянное поле U_1 удовлетворяет однородному уравнению Гельмгольца

$$(\Delta + k^2)U_1 = 0, \quad (U_0 + U_1)|_{D_{qn}} = 0, \quad q = 1, Q-1, \quad n = 1, \dots, 4q \quad (1)$$

и условию погашаемости на бесконечности. Рассмотрим задачу дифракции плоской волны U_0 на прозрачном цилиндре радиуса R^* с параметрами среды c^* , ρ^* . На прозрачный цилиндр падает плоская волна $U_0 = A \exp(ikx)$. Выпишем представление для рассеянного поля W_1 из работы [3].

$$W_1(r, \varphi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} w_{1n} H_n^{(1)}(kr) \exp(in\varphi), \quad k = \omega/c, \quad k^* = \omega/c^*, \quad (2)$$

$$w_{1n} = \frac{A i^n}{H_n^{(1)}(kR^*)} \left[\frac{2i J_n(k^* R^*)}{\pi k R^* [J_n(k^* R^*) H_n^{(1)'}(kR^*) - \frac{\rho k^*}{\rho^* k} J_n'(k^* R^*) H_n^{(1)}(kR^*)]} - J_n(kR^*) \right],$$

Где $J_n(x)$, $H_n^{(1)}(x)$ – функции Бесселя и Ханкеля. Потребуем, чтобы в области $r \geq R^*$ функции U_1 , определенная как решение задачи (1), и W_1 , определенная по формуле (2), совпадали

$$U_1(Q, k, r, \varphi) = W_1(k, k^*, r, \varphi) \quad (3)$$

Соотношение (3) после интегрирования по φ при фиксированном r , например $r = R^*$, есть уравнение для вычисления скорости звука в среде с включениями c^* . В таблице приведены результаты вычисления относительной скорости c^*/c для параметров $Q=5$, $ka=0.05$, $a/R=0.1, 0.2, 0.3, 0.4$.

a/R	0.1	0.2	0.3	0.4
c^*/c	0.506	0.318	0.218	0.167

Список литературы

1. Foldy L.L. The multiple scattering of Waves// *Phy. Rev.* 1945, v.67, N3,4, p.107-119.
2. Иванов В.П. Исследование метода вычисления скорости звука в среде с включениями// *Журн. вычисл. матем. и матем. физики.* 2016, Т.56. №8. С.1470-1479.
3. Ваганов Р.Б., Каценеленбаум Б.З. Основы теории дифракции М.: Наука, 1982. 272с.

ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ДВУХПОДВИЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Иванов К.С.

Институт механики и машиноведения МОН РК, Алматы, Казахстан; (E-mail: ivanovgreek@mail.ru);

Работоспособность двухподвижных механизмов проблематична из-за отсутствия в механизме некоей дополнительной опорной точки. Цель работы: проанализировать определенность механизмов с двумя степенями свободы и разработать принципы конструирования на основе оптимального использования трения. Механическая система с двумя степенями свободы (рис. 1, рис. 2) является в принципе неопределимой. Условие равновесия механизма по принципу возможных перемещений [1] $F_1 V_1 - R_3 V_3 - R_5 V_5 = 0$ сводится к равенству нулю суммы моментов относительно мгновенного центра скоростей S промежуточного звена 2

$$F_1 SB - R_3 SC - R_5 SD = 0. \quad (1)$$

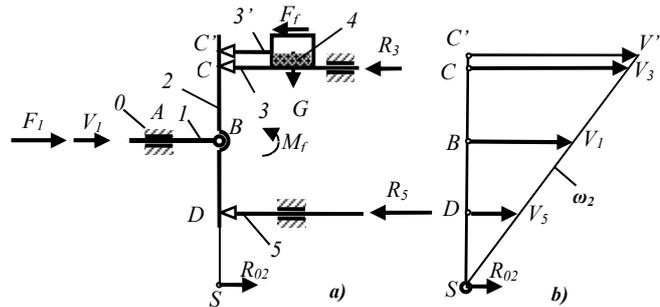


Рис. 1. Рычажный двухподвижный механизм.

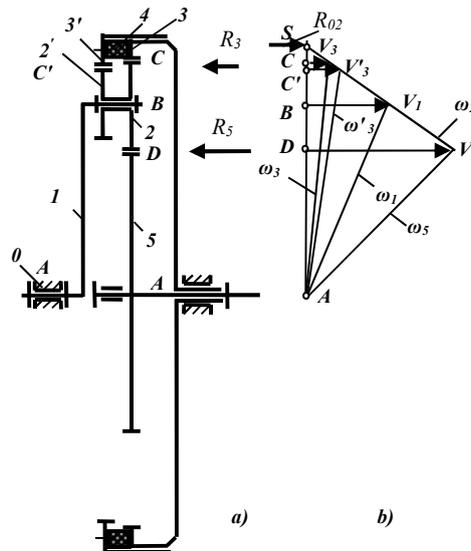


Рис. 2. Зубчатый дифференциальный механизм.

Однако уравнение (1) не является необходимым и достаточным условием равновесия, так как из-за отсутствия опоры в точке S появляется неуравновешенная реакция $R_{02} = R_3 + R_4 - F_1$, полученная из условия $\sum F = 0$. Эта равнодействующая должна быть создана неподвижной опорой. Для достижения определенности предлагается заменить момент этой силы относительно точки B моментом силы трения F_f , создаваемой на звене 3 $M_f = F_f \cdot BC$. Потери на трение можно значительно уменьшить, если использовать для создания силы трения разность скоростей звена 3' с фрикционной прокладкой 4 и звена 3 $\Delta V_3 = V_3' - V_3$.

Список литературы

1. Маркеев А.П. Теоретическая механика. М. «Наука», Физматлит, 1990. 416 с.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ В ОПАСНЫХ СЕЧЕНИЯХ

Иванов Н.З.¹, Думанский А.М.¹, Неповинных В.И.²

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (naurivanov@gmail.com)

²АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина», Обнинск, Россия.

Определение эксплуатационных характеристик элементов тонкостенных конструкций летательных аппаратов неразрушающим методом контроля.

В настоящее время непрерывно растет количество проектов, в рамках которых разрабатываются объекты аэрокосмической техники, испытывающие значительные нагрузки. Их введение в эксплуатацию не представляется возможным без соответствующей экспериментальной отработки. Исторически сложилось два подхода для проведения испытаний – разрушающими и неразрушающими методами. Среди изделий аэрокосмической промышленности можно выделить отдельным классом изделия, представляющие собой тонкостенные нагруженные конструкции. Для такого типа объектов предлагается изложенный способ. Методом для анализа выбран метод компьютерной рентгеновской томографии. Предложенная в данной работе методика является, по своей сути, неразрушающей, но при этом нацелена на получение прямых эксплуатационных характеристик, таких как эффективный модуль упругости материала в оболочках и критические нагрузки.

Объектом исследования является обтекатель летательного аппарата. Он представляет собой тонкостенную оболочку оживальной формы, изготовленную из стеклопластика.

Работа состоит из планирования и проведения эксперимента, разработки средства для оценки полученных результатов, построения математической модели деформирования тонкостенной оболочки под воздействием внешнего давления, обработки и анализа всех полученных данных.

На первом этапе были выбраны опасные сечения оболочки. Для контроля полей деформаций в выбранных сечениях использовался компьютерный рентгеновский томограф, при этом изделие пошагово вакуумировалось, таким образом обеспечивалось увеличение нагрузки. На каждом этапе нагружения были получены томограммы отслеживаемых сечений. С целью обеспечения надежности измеряемых по изображениям деформаций было разработано специальное программное обеспечение, на котором были получены все перемещения по периметру исследуемых сечений (рис. 1).

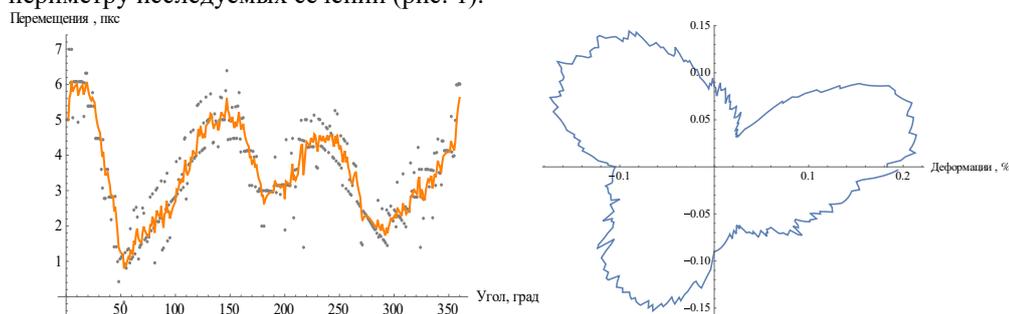


Рис. 1. Перемещения и деформации оболочки в полярных координатах с экспоненциальным сглаживанием.

После определение полей деформаций представляется возможным определение эффективного модуля упругости и критических нагрузок для прогнозирования устойчивости:

$$E = \frac{pR_2^2 \sin \theta}{\xi \delta} \left(1 - \frac{R_2}{2R_1} - \frac{\nu}{2} \right); q_{кр} = \frac{3EI}{R^3}. \quad (1)$$

Показана возможность применения такого метода неразрушающего контроля как компьютерная томография для определения упругих характеристик элементов тонкостенных конструкций летательных аппаратов; Показана возможность применения данного метода и для прогнозирования устойчивости тонкостенных оболочек; Разработана математическая модель, позволяющая определять упругие характеристики материала на основе деформаций сечения.

К ПОВЫШЕНИЮ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПНЕВМОАККУМУЛИРУЮЩИХ БУФЕРОВ.

Ивлев В.И.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия. (E-mail: 6805158@mail.ru)

Проблема хранения электрической энергии в последнее время приобрела особую актуальность в связи с широким распространением солнечных, ветровых и волновых электростанций, которые имеют непостоянную мощность генерации, а также значительными колебаниями величины потребляемой мощности. Поэтому для обеспечения стабильных параметров напряжения и частоты в сети необходимо использовать т.н. энергоаккумулирующие буферы, которые заряжаются в период низкого потребления энергии (например ночью), а отдают энергию в моменты пиковых нагрузок. Энергоаккумулирующие устройства также востребованы для систем аварийного электропитания и как источники энергии для мобильных приложений. Самый очевидный путь решения этой задачи (но и самый дорогой и ненадежный) – использование электрохимических батарей. В настоящее время разрабатываются различные технологии хранения энергии, например, на основе супермаховиков, водородных топливных ячеек, суперконденсаторов или пока еще экзотических сверхпроводящих накопителей [1].

Одним из перспективных накопителей энергии являются т.н. пневмоаккумулирующие устройства, накапливающие энергию в виде сжатого воздуха. Как известно, пневматические приводные системы по сравнению с электромеханическими и гидравлическими отличаются более простой конструкцией, высокой надежностью, пожаро- взрывобезопасностью и относительно невысокой стоимостью. Этим системам посвящено большое количество исследовательских работ [2]. В англоязычной технической литературе даже применяется аббревиатура – CAES (Compressed air energy storage). К сожалению, в России, работы по данной тематике практически не ведутся. Основной недостаток этих систем – низкая энергоэффективность, обусловленная значительными изменениями энтропии сжатого воздуха в процессах сжатие – расширение. Важными показателями являются также плотность запасаемой энергии, время хранения, ресурс, стоимость.

В докладе рассматривается задача получения максимальной работы от сжатого воздуха, находящегося в емкости заданного объема при его расширении до атмосферного давления, при заданной температуре окружающей среды. Под энергоэффективностью понимается отношение величины произведенной работы на валу пневмомотора до полной разрядки баллона, к величине эксергии сжатого воздуха при заданном начальном давлении и температуре. Рассмотрены случаи одноступенчатого и трехступенчатого расширения сжатого воздуха с возможностью подведения тепла, запасенного при сжатии или от окружающей среды. Применение многоступенчатой схемы позволяет наиболее приблизить процесс к изотермическому идеалу. Так для эквивалентного показателя политропы 1,3 одноступенчатая схема дает энергоэффективность 48%, а трехступенчатая – 64%. Дальнейшее увеличение числа ступеней незначительно повышает энергоэффективность, но приводит к увеличению габаритов и стоимости системы. Проведен анализ энергоэффективности различных пневмомоторов объемного и динамического принципа действия в зависимости от развиваемой мощности на выходном валу. Показана целесообразность применения разных типов пневмомоторов на отдельных ступенях при развиваемых мощностях до 20 кВт. Некоторые сравнительные характеристики пневмомоторов приведены в [3]. Показана необходимость учета свойств реального газа для более точного определения массы сжатого воздуха в баллоне и описания процессов наполнения – опорожнения при давлениях больше 10 – 12 МПа. Расчетные зависимости здесь получены с использованием уравнения состояния реального газа Редлиха – Квонга и соотношений, описывающих конвективный теплообмен поверхности баллона с окружающей средой.

Можно отметить, что пневмоаккумулирующие буферы по таким важным показателям, как энергоэффективность и плотность хранения энергии уступают другим типам устройств. Тем не менее, количество разработок пневмобуферов, в том числе доведенных до опытной и промышленной эксплуатации достаточно велико, и именно с пневматическими системами хранения энергии связаны наибольшие ожидания. Это, в частности, объясняется относительно небольшими капитальными и эксплуатационными затратами, значительным ресурсом работы, а также тем, что основные компоненты для создания пневмоаккумулирующих буферов уже освоены промышленностью и могут быть использованы напрямую, либо с небольшими конструктивными изменениями.

Список литературы

1. Luo X., Wang J., Dooner M., Clarke J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation.// Applied Energy. 2015, V. 137, p. 511 – 536.
2. Budt M., Wolf D., Span R., Yan J. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments.// Applied Energy. 2016, V. 170, p. 250 – 268.
3. Ивлев В.И., Бозров В.М., Воронов В.А. Оценка технических показателей перспективных спиральных пневмомоторов.// Компрессорная техника и пневматика. 2014, №1, с.26 – 29.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГИДРОУПРУГИХ СИСТЕМАХ АЭС

Каплунов С.М., Махутов Н.А., Панов В.А., Фурсов В.Ю.
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Доклад посвящен решению задач анализа целесообразности применения, постановки исследований и повышения их эффективности при использовании физического моделирования динамических процессов в энергоблоках стационарных АЭС с последующими оценками конструктивного совершенства, прочности и долговечности конструкций ЯЭУ.

В докладе основной целью исследования является разработка методики физического моделирования (с использованием теории подобия и анализа размерностей) при определении и анализе параметров и характеристик динамики и прочности, долговечности и безопасности при эксплуатации крупномасштабных конструкций ЯЭУ в интенсивных турбулентных потоках однофазного теплоносителя в условиях как режима нормальной эксплуатации (НЭ), так и ряда дополнительных режимов при переходе в критические состояния. При этом сформулированы основные правила и положения проведения физического моделирования с практическими примерами его использования и приведены необходимые сведения, включая результаты динамических исследований комплексов водо-водяных реакторов с оценками погрешности выбранной методики физического моделирования и экспериментальных исследований (физических и численных).

Решение приведенных задач реализуется с использованием последних достижений в разработке программного обеспечения (отечественные и зарубежные программные комплексы, разработка и применение ряда современных вихревых методов и т.д.), а также использование современных измерительных систем для проведения физических экспериментов.

Проверка корректности применения полученной методики физического моделирования проводилась для ВВЭР-440 (Н.Воронеж и Ловииза) и ВВЭР-1000 (Н.Воронеж) по п.п.1-4.

1. Сравнение полученных автокорреляционных функций пульсаций давления в потоке на входе в реактор (модель и натура) показывает их довольно хорошую сходимость в соответствии с предложенной методикой моделирования, постановкой задачи и принятыми допущениями (расхождение в значениях дисперсии - $K_p(0)$ или D_p^2 для природы и модели порядка 12-14%).

2. Сравнение экспериментальных значений собственных частот колебаний шахты в средней части для реактора ВВЭР-440 (-1000) в воде $f_{1,2}^n$ с результатами расчета и физического моделирования по разработанной ОКБ ГП совместно с ИМАШ РАН методике свидетельствуют о хорошем их соответствии (относительная погрешность 5-10 %), с учетом, что они получены моделированием и расчетом, а также по результатам модельных и натуральных тензометрических исследований.

3. Характерные амплитудные значения виброперемещений (или динамических деформаций) находятся в результате динамического анализа опытных данных. Погрешность их нахождения в значительной степени определяется погрешностью определения демпфирования и его воспроизведения при моделировании. В первом случае для обсуждаемых данных такая относительная погрешность по демпфированию составляет для статистической надежности (вероятности) $P = 0/95$ величину $\pm 15 \%$, а при определении амплитуд динамических деформаций при той же вероятности не превышает $\pm 10-15\%$. В отечественной и зарубежной практике подобных исследований при физическом моделировании учитывается также неизбежный разброс значений декремента колебаний для модели и природы, который может в настоящее время также составлять до $\pm 15-20 \%$.

4. Обобщенные данные по относительной погрешности при проведении модельных и натуральных экспериментальных исследований соответственно составили для значений статистической надежности $P_1 = 0.95$ и $P_2 = 0.99$ при измерении вибропараметров - ± 10 и $\pm 15\%$, соответственно; при измерении динамических деформаций - ± 8 и $\pm 10\%$, соответственно, а при измерении пульсаций давления, соответственно - ± 15 и $\pm 20\%$.

Представленные в докладе результаты полезны и необходимы при постановке экспериментальных натуральных и модельных исследований с привлечением физического моделирования и получением при этом необходимого комплекса критериев и коэффициентов пересчета параметров напряженно-деформированного состояния конструкций, а также нагрузок от турбулентного потока теплоносителя и распределения их на поверхностях исследуемых конструкций с учетом реальных (или известных) условий закрепления элементов конструкций и демпфирования их в потоках теплоносителя.

С развитием производства и эксплуатации в современной энергетике однотипных систем конструкций и машин, испытывающих силовое воздействие со стороны потоков среды, возникло и совершенствуется физическое моделирование наблюдаемых сложных гидраэродинамических установившихся (стационарных) процессов взаимодействия потоков с конструкциями при решении связанных задач гидроупругости различного типа. Необходимо также отметить успешное применение методики для различных типов установок и теплоносителя от воды вплоть до жидкого свинца.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ НА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СТЕНДАХ ИМАШ

Карпов И.А., Гребенников А.С.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (karpov@imash.ac.ru)

В ИМАШ РАН на протяжении многих лет проводятся работы, направленные на создание метаматериальных акустических поглотителей и исследование их эффективности. Акустические метаматериалы (АММ) - новая область исследования в акустике, позволяющая создавать высокоэффективные звукопоглотители. Такие звукопоглотители особенно востребованы, например, в авиационном моторостроении. Для имитации звукопоглощения акустической энергии при скользящем падении волны в отделе была создана специализированная экспериментальная установка. В этой установке реализовано скользящее падение акустической волны, в отличие от нормального падения в стандартной установке «труба Кундта». Стандартная оценка акустических свойств поглотителей, которая используется при нормальном падении волн, для стенда ИМАШ не подходит. Поэтому в отделе разработан метод оценки эффективности метаматериальных поглотителей при скользящем падении волн. Метод заключается в том, что на установку, на которой исследуется образец АММ подается один из трех типов сигналов: *силовой* – сигнал с постоянной спектральной плотностью мощности (СПМ) давления, *энергетический* - сигнал с постоянной СПМ интенсивности, *кинематический* - сигнал с постоянной СПМ ускорения. Записываются сигналы с микрофонов и акселерометра на входе и микрофонов на выходе установки, а затем обрабатываются для получения оценки эффективности поглотителей в виде отношения спектральных плотностей мощности сигналов (см. формулу 1).

$$\xi_a = \frac{K'_a}{K''_a}, K'_a = \frac{s'_p}{s'_a}, K''_a = \frac{s''_p}{s''_a}, \quad (1)$$

где ξ_a – эффективность поглотителя (в данном случае по кинематическому источнику (a)) в дБ;

K'_a - коэффициент передачи (transmission loss) для установки без поглотителя;

K''_a - коэффициент передачи (transmission loss) для установки с поглотителем;

s'_p и s''_p - спектральные плотности мощности выходного сигнала (например, давления) без поглотителя и с поглотителем соответственно;

s'_a и s''_a - спектральные плотности мощности входного сигнала (например, ускорения) без поглотителя и с поглотителем соответственно.

Для реализации данного метода в эксперименте проведены калибровки всех каналов записи, разработаны программы расчета с дружественным графическим интерфейсом пользователя.

Приведены результаты экспериментов, которые подтверждают эффективность поглотителей, разработанных в ИМАШ РАН. На рис. 1 представлен график эффективности ξ_I (коэффициенты передач здесь определялись через отношение СПМ давления на выходе к СПМ интенсивности (I) на входе - K'_I и K''_I) многочастотного резонансного метаматериального поглотителя, созданного с использованием аддитивных технологий на 3D-принтере для поглощения звука в полосе частот 600-900 Гц. Из графика видно, что в этой полосе частот метаматериальный поглотитель обладает высокой эффективностью.

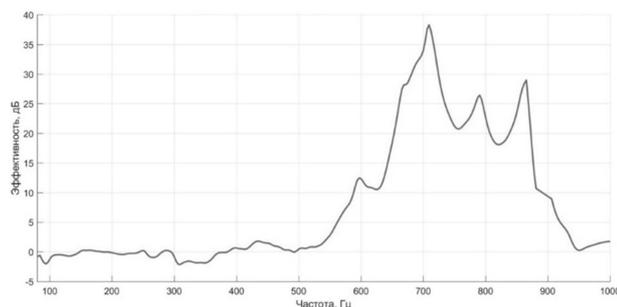


Рис. 1. Эффективность (ξ_I) звукопоглощающих панелей АММ

1. Т.М. Томилина, В.Г. Смелов, А.В. Сотов, Б.Н. Бахтин, И.А. Карпов, А.А. Ким, Ш.А. Асфандияров, Р.А. Вдовин, Новые материалы и технологии для решения задач виброакустики // Динамика и виброакустика машин: материалы четвертой международной научно-технической конференции, Самара, 18-20 июля 2018 г., с. 28-29.

ВОЛНОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ РЕЗОНАНСНЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛН

Касилов В.П., Курменев Д.В.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

На основе применения волновых явлений и эффектов, обнаруженных в ходе создания и развития нелинейной волновой механики, в ИМАШ РАН (НЦ НВМТ) разработан новый класс технологий, названных волновыми технологиями. Волновые технологии позволяют на принципиально новом уровне с высокой эффективностью решать технологические задачи для целого ряда отраслей промышленности.

Реализация волновых технологий базируется на применении нелинейных волновых эффектов, возникающих в многофазных средах при специальном образом сформированных в условиях внутренних нелинейных резонансов течений периодического и непериодического характера. Источником волновых воздействий для создания необходимых управляемых движений многофазной системы являются волновые генераторы различных конструкций. В НЦ НВМТ РАН разработан целый спектр волновых генераторов, которые по принципу создания колебаний и волн можно разделить на две группы: гидродинамические генераторы, и генераторы, для приведения в действие подвижных элементов (активаторов), контактирующих с обрабатываемой средой (ВМ с ПЭ). В части ВМ с ПЭ применяются электромеханические резонансные генераторы колебаний (ЭРГК).

Специфические условия работы волновых машин (среди которых: необходимость регулирования по определенным законам частоты и амплитуды колебаний рабочих органов, обеспечение длительной устойчивой работы в резонансных и околорезонансных режимах в условиях сильно изменяющейся нагрузки на рабочих органах и ряд других) делают применение этих известных решений в ряде случаев весьма затруднительным, а иногда и невозможным. В связи с этим, возникла необходимость разработки специальных электромеханических резонансных генераторов колебаний (ЭРГК).

В основу технических решений при создании ЭРГК наряду с принципами резонансной волновой механики, положены принципы прямого электромеханического преобразования электрической энергии в энергию колебаний ротора (крутильных или близких к линейным) и связанных с ним активаторов волновых процессов посредством магнитного поля, без промежуточных механических устройств (вращающихся эксцентриков, кулачков или кривошипно-шатунных механизмов) в сочетании с резонансными и волновыми процессами в механической системе и обрабатываемой среде.

Принятые концепции позволили создать регулируемые источники колебаний, отвечающие предъявленным требованиям, сочетающие в себе надежность с высокими эксплуатационными характеристиками. Динамически сбалансированная конструкция ЭРГК крутильных колебаний позволила практически свести к нулю вибрационные воздействия на опоры и окружающую среду, а также существенно снизить шум.

С использованием ЭРГК разработан ряд экспериментальных волновых машин, для измельчения, механоактивации, смешения и дозирования сыпучих компонентов, для получения тонкодисперсных эмульсий, суспензий и высоковязких составов. На экспериментальных установках с ЭРГК (общий вид одной из которых представлен на рис. 1) получены результаты, открывающие широкие перспективы промышленного внедрения, в том числе:

- получены результаты, подтверждающие высокую эффективность волновых технологий для диспергирования жидких и вязких фаз, получения и обработки различных эмульсий. При этом получены стабильные тонкие эмульсии (масло в воде) контролируемого уровня дисперсности, показано, что уровнем дисперсности можно управлять, изменяя уровень волнового воздействия;
- достигнуто повышение прочности образцов с цементно-известняковым вяжущим до 1,5 раз в результате механоактивации вяжущих при помощи роторно-волновой мельницы;
- получен ряд положительных результатов, свидетельствующих о эффективности использования волновых машин с резонансными электромеханическими генераторами для создания нанокompозитов и модифицированных ПКМ за счет равномерного смешения и диспергирования микро- и нанонаполнителей различного химического состава в матрице высоковязкого полимерного связующего. Показано, что в результате модификации эпоксидной смолы углеродным модификатором по волновой технологии ее механические характеристики в отвержденном состоянии существенно повышаются: так, модуль упругости на сжатие возрастает в 1,5 - 2,5 раза.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ В ПРОЦЕССЕ ТЕСТОПРИГОТОВЛЕНИЯ НА КАЧЕСТВО ХЛЕБОПЕКАРНЫХ ИЗДЕЛИЙ.

Касилов В.П., Курменев Д.В., Кислогубова О.Н.

Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН, Москва, Россия.

Цель работы исследовать возможности применения волновых технологий для интенсификации процессов тестоприготовления и повышения качества полученных хлебобулочных изделий.

Известно, что качество хлебобулочных изделий в значительной степени зависит от качества замеса теста, в результате которого обеспечиваются, в том числе необходимые реологические и структурно-механические свойства (в т. ч. упругость и газодерживающая способность). Требуемые с точки зрения соответствующего технологического процесса упругость и растяжимость теста, обеспечиваются за счет образования в процессе замеса трехмерной губчато-сетчатой структуры. Структурообразующим компонентом теста является присутствующий в муке белково-клейковинный комплекс, достижение максимальной степени проработки содержащейся в муке клейковины при вымешивании теста осуществляется путем интенсивной механической обработки. Одновременно с этим, при замешивании теста необходимо обеспечить максимальную целостность клейковинного каркаса, поэтому в процессе замешивания разрывы клейковины должны быть сведены к минимуму. В условиях этих во многом противоречивых требований развитие традиционного тестомесильного оборудования практически приблизилось к своему пределу.

На базе положительных результатов широкого спектра разработок и экспериментальных исследований, проводимых в ИМАШ РАН (ИЦ НВМТ РАН), по применению волновых технологий для интенсификации перемешивания многофазных вязких и высоковязких сред на волновых машинах и аппаратах, были проведены исследования эффективности применения волновых технологий для решения вопросов интенсификации процессов тестоприготовления и улучшения качества полученных хлебобулочных изделий. Результаты сравнительных экспериментов по изучению влияния волновой обработки на качество замешанного теста оценивались по степени проработки клейковины в водно-мучной суспензии и реологическим показателям полученного теста.

Волновую обработку водно-мучной суспензии проводили на установке ВСМ-5, конструкция и общий вид которой представлены на рис. 1.

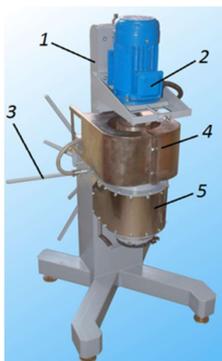


Рис. 1. Установка ВСМ-5 для волновой обработки вязких и высоковязких сред: 1 – станина; 2 – электропривод и ротор; 3 – система выгрузки и фиксации реактора; 4 – волновой реактор; 5 – электромеханический резонансный генератор.

Реологические характеристики полученных составов исследовались при помощи ротационного вискозиметра Brookfield RVDV-II с программным обеспечением Wingather. На рисунках 2 и 3 представлены графики зависимости вязкости от времени, полученные при скорости сдвига 0,68 с⁻¹. Как видно из рис. 2, водо-мучная суспензия, полученная по традиционной технологии, проявляет слабые тиксотропные свойства, после достижения максимального значения (более 14000 сП) наблюдается падение значений вязкости со временем.

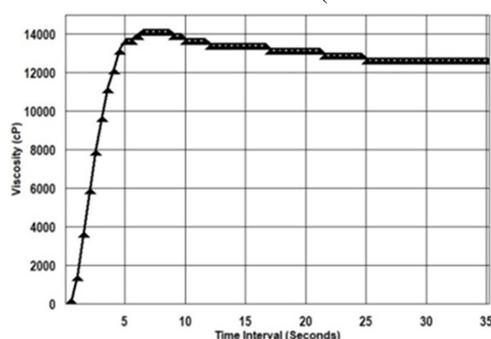


Рис. 2. Вязкость водо-мучной суспензии, полученной традиционным способом

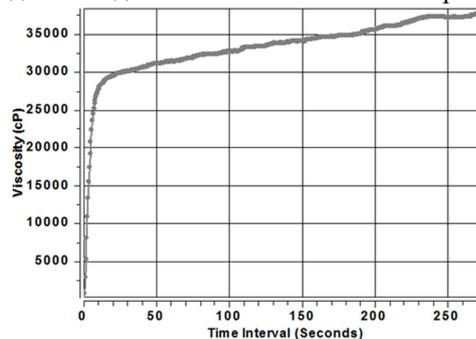


Рис. 3. Вязкость водо-мучной суспензии, полученной по волновой технологии.

Как показывает кривая изменения вязкости от времени (рис. 3) водо-мучной суспензии, полученной по волновой технологии, значения эффективной вязкости данной суспензии выросли более чем в 2 раза по сравнению с суспензией, полученной традиционным способом, при этом изменился характер кривой: наблюдается рост значений вязкости со временем. Суспензия, полученная волновым способом, упругая и цельная; разработанная клейковина образует своего рода «эластичный каркас», о чем свидетельствует возрастающая кривая вязкости.

Результаты проведенных исследований показывают, что применение волновых технологий для тестоприготовления позволяет интенсифицировать процесс смешения и создать оптимальные режимы обработки белково-клейковинного комплекса муки, что способствует улучшению качества конечного продукта за счет повышения упругости и газодерживающей способности получаемого теста. Новые волновые способы замеса теста открывают широкие возможности для специалистов хлебопекарной отрасли, позволяют сократить время технологического процесса при улучшении качества выпускаемого ассортимента.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АЭРОДИНАМИКИ И ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ СОПЛА ЖРД

Кассин Д.В.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия. (dmitry1550@gmail.com)
Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

В камере сгорания происходят процессы ионизации, т.к. топливный компонент используется при температуре 2500–4000 К. Следовательно продукты сгорания представляют собой слабоионизованную, низкотемпературную плотную плазму [1].

Для вычисления точного значения потенциала требуется вычислить все процессы в камере сгорания для данного топлива, и только затем имея выходные данные: температуру, давление, концентрации нейтральных частиц, ионов и электронов можно вычислить поток заряженных и нейтральных частиц в ЖРД [2]. Расчет был проведен с тестовыми данными, для оптимизации программы и проверки ошибок.

Сопло было представлено в двухмерном виде: подобно соплу Лавала.

По оси X направлен вектор скорости потока u . Направленная скорость и концентрация заряженных частиц считаются постоянными во всех точках выходного сечения сопла, истечение происходит в воздушную среду. Внешние магнитные поля отсутствуют, а собственное магнитное поле мало.

Математическая модель задачи о течение потока плазмы, истекающего из сопла ЖРД включает:

- систему уравнений Навье-Стокса для нейтральной компоненты потока;
- уравнения неразрывности для заряженных компонент;
- уравнения движения для заряженных компонент;
- уравнение Пуассона для самосогласованного электрического поля.

Список литературы

1. Ягодников Д.А, Рудинский А.В. Диагностика ракетных и реактивных двигателей по характеристикам собственного электромагнитного поля продуктов сгорания. // *ТВТ*, 2018.
2. Котельников В.А., Котельников М.В. Зондовая диагностика плазменных потоков. М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая дисциплина», 2016, -С. 404.

СПОСОБ ЗАЩИТЫ СТАЛЬНЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ВЗРЫВНЫХ УСТРОЙСТВ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА

Кельнер М.С.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; (mskelner@yandex.ru)

Цель работы - разработка концепции защиты стальных отражателей энергоаккумулирующими материалами (ЭАМ) от разрушающего воздействия продуктов детонации при инициировании зарядов твердых взрывчатых веществ (ВВ) на их поверхности и экспериментальная проверка данной концепции.

Идея работы – отвод избыточной энергии ударной волны в зоне контакта заряда с отражателем с помощью прокладки из энергоаккумулирующих материалов, находящейся между ними, за счет фазовых переходов в ЭАМ и рассеивания энергии ударной волны за счет отражения.

Еще в 1940г. было доказано, что по термодинамическим показателям режим детонационного горения топливной смеси более выгоден, чем режим дефлаграционного горения [1]. В современных условиях, когда энергетические возможности химических топлив практически достигли своего предела, разработчики ищут новые подходы и пути повышения КПД энергосиловых установок [2, 3].

Для повышения эффективности пульсирующих взрывных устройств (ПВУ) калибром более 250 мм предлагается концепция защиты многоцветных отражателей от разрушения продуктами детонации за счет оснащения зарядов ВВ тонкостенными корпусами и/или днищами, выполненными из энергоаккумулирующих материалов, стенки которых поглощают избыточное тепло и давление, воздействующее на отражатель в зоне их контакта с зарядом. [4, 5].

Для защиты стальных отражателей от деформаций и разрушений был предложен способ защиты с помощью сборки из ЭАМ, основу которой должны составлять легкоплавкие материалы. Тонкий слой (слои) такого материала размещают на поверхности отражателей под днищем инициируемых зарядов ВВ. Идея заключалась в поглощении избыточного давления и тепловой энергии продуктов взрыва (ПВ) и ударных волн (УВ) с помощью ЭАМ [6, 7].

В качестве легкоплавкого материала для исследований был выбран свинец. Выбор обусловлен, прежде всего, доступностью данного металла и знанием его физико-механических характеристик при динамических нагрузках.

Для изучения зависимости разлета ПВ для различных типов ВВ при разных массах заряда и количестве свинцовых пластин была проведена серия экспериментов.

Проведенные исследования показали, что:

- при отсутствии защиты, выполненной из ЭАМ на поверхности отражателя - в зоне контакта заряда с поверхностью отражателя - в начальный момент расширения ПВ образуется кратер, который формирует разлет ПД с поверхности отражателя в форме конуса;

- при частичной защите поверхности отражателя сборкой из ЭАМ, в начальный момент расширения ПВ образуется кратер, как в самой сборке, так и в отражателе, при этом габариты кратера имеют большие размеры, которые формируют разлет ПД с поверхности сборки и отражателя в форме полуэллипсоида, близкой к конусу;

- при полной защите поверхности отражателя сборкой из ЭАМ, кратер образуется только в самой сборке, формирующей разлет ПВ в форме полуэллипсоида, растянутого вдоль поверхности отражателя, но больших размеров, чем на самом отражателе.

Проведенные съемки и полученные при их обработке результаты позволяют рассчитать:

- минимальные толщины стенки корпуса для заряда ВВ, обеспечивающей защиту отражателя при инициировании заряда ВВ на его поверхности, в зависимости от энергетических характеристик заряда ВВ;

- скорости расширения ПВ и отброса выбитой массы свинца в зависимости от энергетических характеристик используемых зарядов ВВ и их вклада в увеличение силы тяги твердотопливных детонационных ракетных двигателей (ТДРД).

Список литературы

1. Зельдович Я.Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ, 1940, т.10, вып.17, с.1453-1461.
2. Соловьев В.О., Факторы, влияющие на КПД многоимпульсных взрывных устройств с отражателями // Проблемы машиностроения и автоматизации. Международный журнал. М., №3, 2002, с.50-55.
3. Гаранин И.В., Соловьев В.О., Суслов Ю.В., Черкашин В.А., Исследование повышения эффективности детонационных энергосиловых установок, работающих на газообразных топливах. - В сб.: Научных докладов IV-го международного совещания по проблемам энергоаккумулирования и экологии в машиностроении, энергетике и на транспорте. М.: ИМАШ РАН, 2004, с.357-380.
4. Соловьев В.О., Воронцов А.В., Кутузов Б.Н., Способ работы и устройство пульсирующего детонационного двигателя с последовательно срабатывающими кассетами. // С1 МПК 7 F 02 K 9/08, Патент №2245449, РФ, приоритет от 25.06.2003 г. Оpubл. в Официальном бюллетене. «Изобретения. Полезные модели» №3 от 27.12.2005г., ФИПС РОСПАТЕНТ.
5. Гаранин И.В., Соловьев В.О., Суслов Ю.В., Способ работы и устройство энергосиловой детонационной установки // С2 МПК F 02 K 7/02, Патент №2285142, РФ, приоритет от 02.12.2003 г. Оpubл. в Официальном бюллетене. «Изобретения. Полезные модели» №28 от 10.10. 2006г., ФИПС РОСПАТЕНТ.
6. Соловьев В.О., Кельнер М.С., Защита стальных отражателей от разрушающего воздействия продуктов детонации, использующихся в твердотопливных пульсирующих взрывных устройствах // Проблемы машиностроения и надежности машин. М., №1, 2015, с.88-93.
7. Перминов М.Д., Соловьев В.О., Панкова Н.В. и др. Вибрационные процессы, виброзащита в машиностроении. Отчет о НИР по теме 6-13 (промежуточный). Часть 1, 2015, 207с. Номер гос. регистрации 01201355403.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛН В ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

Ким А.А

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (kim.an96@mail.ru)

Современные акустические метаматериалы представляют собой периодически структуры, состоящие из сложных ячеек со многими степенями свободы. В зависимости от конструкции одной ячейки, можно получить разнообразные волновые свойства всей структуры. Для такой физической модели материала в докладе представлена математическая модель как для одной, так и для двух степеней свободы (количество степеней свободы определяется непосредственно самой конструкцией ячейки). Получены дисперсионные соотношения, групповые и фазовые скорости для обоих случаев. Дисперсионное соотношение для двух степеней свободы представлено на рис. 1. Из графика можно видеть, что существуют, так называемые, зоны не пропускания – область частот, в которой не могут распространяться волны. Для одной степени свободы существует только одна зона, для двух – две зоны. Таким образом, можно создавать фильтр для различных частот.

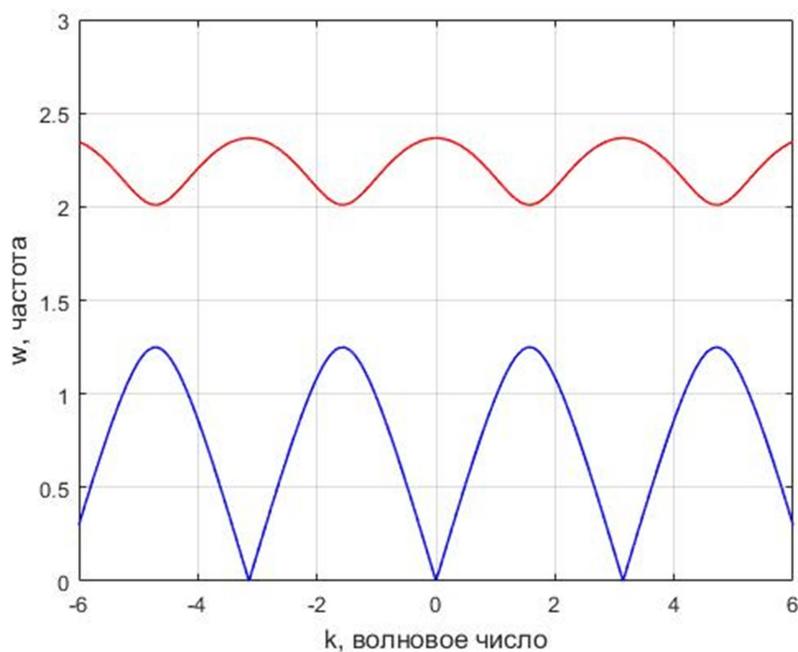


Рис. 1. Дисперсионное соотношение для двумерной структуры в безразмерных величинах.

Также в докладе рассматриваются резонансные явления в периодических структурах, вызванные добавлением искусственных неоднородностей. Для упрощения математического аппарата и удобства описания явления, используется импедансный подход. Импеданс рассматривается на неоднородности, его исследование позволит определить характеристики неоднородности, добавление которой в периодическую структуру вызывает резонанс на определенных частотах в зонах не пропускания. Таким образом, можно устранять зоны не пропускания с помощью искусственного добавления неоднородности.

ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ МЕТАЛЛА: ПОТЕНЦИАЛ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Ковш И.Б.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия (las@tsr.ru)

В число критически важных для страны технологий в разрабатываемой в настоящее время стратегии развития фотоники в Российской Федерации, безусловно, должна войти лазерная упрочняющая обработка поверхностного слоя металлоизделий. Такая обработка позволяет существенно увеличивать ресурс деталей и узлов за счет локального упрочнения участков поверхности, подвергающихся внешнему воздействию, и при этом не требует сколько-нибудь значительных трудов – и энергозатрат. Согласно экспертным оценкам, экономический эффект от немедленного массового освоения этих технологий в России мог бы составить 80-100 млрд руб. В течение длительного времени главным препятствием на пути широкого освоения этой высокоэффективной лазерной технологии была высокая стоимость лазерных технологических установок (ЛТУ) и необходимость привлечения высококвалифицированных специалистов для их эксплуатации в производственных условиях. Создание мощных полупроводниковых и волоконных лазеров, обладающих большим – до 40-60% - КПД и не требующих какого-либо специального обслуживания, заметно изменило ситуацию, но теперь на первый план вышли две другие задачи: уточнение режимов операций, отработанных ранее на лазерах с другой длиной волны излучения (как правило, это были CO_2 – лазеры), и поиск организационных форм, обеспечивающих постоянную загрузку и, соответственно, быструю окупаемость высокопроизводительных ЛТУ, которые, к сожалению, не стали дешевле. Кроме того, в последнее время существенно вырос интерес к использованию лазерной упрочняющей обработки в применении к таким материалам как алюминиевые и титановые сплавы.

В докладе последовательно рассмотрены технологии лазерного упрочнения – от закалки поверхностного слоя стали до проковки ударными волнами сварных швов в деталях из алюминиевых сплавов – с указанием достигаемых эффектов и имеющихся исследовательских задач, перечислены специализированные ЛТУ для упрочняющей обработки, предлагаемые отечественными изготовителями, и отмечены возможности совершенствования таких ЛТУ, приведены примеры эффективного внедрения указанных технологий в России. В заключение сформулированы предложения по отражению тематики лазерного упрочнения (профильные НИОКР – производство ЛТУ – практическое освоение технологий) в Стратегии развития фотоники в Российской Федерации.

ОСОБЕННОСТИ ЛЕГИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ 30ХГСН2А МЕДЬЮ МЕТОДАМИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ И ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Козлов Д.А.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; (koslov74@mail.ru).

В конструкциях летательных аппаратов достаточно широко применяются высоконагруженные шарнирные соединения, работающие в условиях трения скольжения. К ним относятся тормозные гаки самолетов корабельного базирования, шарнирные узлы крепления закрылков, элеронов и горизонтальных рулей поворота; узлы крепления посадочных тормозных щитков. Эффективность управления и маневренности самолетов в значительной степени зависит от надежности и работоспособности указанных высоконагруженных шарнирных соединений. При ограниченных размерах шарнир должен выдерживать значительные сосредоточенные нагрузки, обеспечивать минимальные люфты между его элементами, обладать малым коэффициентом трения в условиях высоких контактных напряжений и хорошей износостойкостью в течение всего ресурса самолета. Данное сочетание свойств шарнирных соединений может быть получено путем нанесения на поверхность высокопрочного слоя материала определенной толщины с хорошими антифрикционными свойствами. Материалом, отвечающим данным требованиям, является конструкционная сталь 30ХГСН2А с нанесенным антифрикционным покрытием.

В работе проведен анализ двух методов модификации поверхности стали 30ХГСН2А – нанесение покрытия методом электроискрового легирования и модифицирование поверхности методом ионной имплантации изучалось их влияние на механические и трибологические свойства деталей. При нанесении покрытия электроискровым легированием применяли катоды из бронз марок ВБр5М и БрАЖМц10-3-1,5, а при ионной имплантации использовались ионы меди. Было показано преимущество имплантации ионами меди по сравнению с электроискровым легированием. В частности, было выявлено уменьшение коэффициента трения при испытании на износостойкость деталей после ионной имплантации ионами меди по сравнению с покрытием из бронзы ВБр5М, а также увеличение износостойкости ионно-модифицированной поверхности. Экспериментально показано положительное влияние ионной имплантации на механические свойства: при испытаниях на усталостную прочность детали после имплантации выдержали большее число циклов по сравнению с исходными и после нанесения покрытий. Режимы нанесения покрытий и режимы ионной имплантации рекомендованы для применения в производстве.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛАЗЕРНОЙ КОНТУРНОЙ РЕЗКИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ МЕТАЛЛОПРОКАТА

Кокорин В.Н.¹, Подмарев Д.Р.²

¹Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия.

²Ульяновское конструкторское бюро приборостроения, Ульяновск, Россия; (damirka10a@gmail.com).

Цель данного исследования – разработка физической модели в рамках технологии контурной лазерной резки при использовании механической активации металлопроката и выбор рационального режима механической активации поверхностного слоя за счет холодного деформационного упрочнения металла.

Широкое применение в промышленности получили высокоэнергетические методы обработки листовых материалов и, прежде всего, контурная лазерная резка.

Для повышения качества лазерной резки рекомендуется уменьшать тепловое воздействие на металл заготовки с целью уменьшения теплопроводности. В результате пластической деформации увеличивается плотность дефектов кристаллической решетки (дислокаций, точечных дефектов, двойниковых границ и т.д.). Это явление обуславливается деформационным упрочнением металла и может быть использовано для изменения свойств металлических материалов в требуемом направлении [1].

Модификация поверхности за счет механической активации позволит существенно повысить адгезионную способность материала.

Разрабатываемая технология модификации поверхности может быть использована для повышения качества разрезаемой поверхности, уменьшение образования града.

На основании экспериментальных работ была предложена теоретическая модель, которая объединяет механическую деформацию с энергией связи между элементами [2].

Установлено, что для повышения эффективности эмиссии электронов необходимо уменьшить энергию активации в продольном направлении кристаллической решетки (ее растяжение), что соответствует эффекту, создаваемому механической одноосной деформацией сжатия [3].

На рисунке 1 представлена физическая модель лазерной контурной резки с применением механической активации поверхности металлопроката (фрагмент кристаллической решетки стальной пластины), позволяющая иллюстрировать повышение эффективности процесса теплового воздействия частицами лазерного луча разрезаемым материалом.

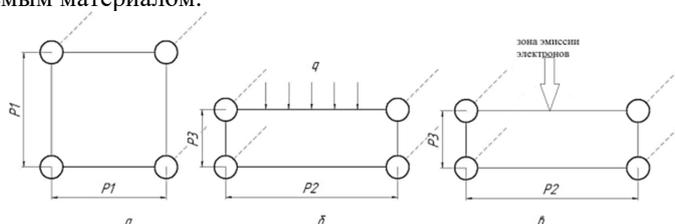


Рис. 1. Физическая модель лазерной контурной резки при модифицировании поверхностного слоя: а – исходная структура (период P_1); б – продеформированная структура, – одноосное сжатие ($P_2 > P_1$, $P_3 < P_1$); в – модифицированная структура ЛКР.

Как установлено, возникающее механическое напряжение увеличивает силу связи между элементами структуры, что является результатом «стягивания» атомов металла ($P_3 < P_1$) при некоторой величине увеличения периода ($P_2 > P_1$) в ортогональной проекции, что приводит к повышению интенсивности воздействия эмиссии электронов в зоне воздействия луча лазера.

Применение технологии, обеспечивающей активацию металлопроката, позволит уменьшить себестоимость изделия из-за резкого сокращения (до 2.1 раза) трудоемкости слесарных работ за счет существенного уменьшения образования града на боковой поверхности реза (от 60% в базовом варианте до 28,5% по разрабатываемой технологии при использовании механической активации).

Список литературы

1. Панченко В.Я., Голубев В.С., Васильцов В.В. и др. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В. Я. Панченко. М.: Физматлит. 2009. – 664 стр.
2. М.В. Кокорин, Д.Р. Подмарев, К.С. Левушкин, В.Н. Кокорин. Лазерный технологический комплекс для контурного раскроя листовых материалов «ТЕГРА-500Р». 49 НТК «Вузовская наука в современных условиях». – Ульяновск.: УлГТУ, 2015. – С.113–117.
3. Кокорин В.Н., Шанченко Н.И., Мищенко О.В., Кокорин М.В., Левушкин К.С. Моделирование процесса контурной лазерной резки с механической активацией листового металлопроката // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – №11. – стр.42– 49.

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Кондратьев И.М.¹, Печейкина М.А.², Раков Д.Л.¹

¹ Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (rdl@mail.ru);

² Национальный исследовательский университет "МЭИ Москва, Россия.

В работе проводился синтез и оценка технологических решений (ТР) для выполнения высокопроизводительной финишной операции обработки поверхностей лопатки газотурбинных двигателей (ГТД) с учетом особенностей геометрии детали [1]. Заготовки для финишной обработки лопаток газотурбинных двигателей изготавливаются ковкой и штамповкой, а затем фрезеруются. При этом удается удовлетворить ограничительные требования по точности к размерам профиля заготовки, но не обеспечивается стабильность угла ее закрутки относительно продольной оси и заданная кривизна поверхности. Поэтому для получения готовой лопатки необходима адаптивная финишная обработка абразивным инструментом, учитывающая форму конкретной заготовки и обеспечивающая плавность сопряжений между различными участками (видами) ее поверхностей. В качестве финишных операций используется шлифование и полирование – шлифование для обеспечения допустимых геометрических размеров, полирование – для получения требуемого качества поверхности.

Для поиска перспективных вариантов технических решений для финишной обработки лопаток ГТД была разработана морфологическая матрица [2]. Ее размерность, соответствующая существенным признакам технического решения, была установлена с помощью экспертных оценок. Прежде всего, были выделены 13 существенных для облика технической системы признаков: осуществление движения для финишной обработки, тип измерительного модуля, обрабатывающий инструмент, число степеней свободы обрабатывающего инструмента, расположение основания портала, возможность вращения детали относительно продольной оси, возможность вращения детали относительно поперечной оси, компоновочная схема, наличие поддержки концевой части лопатки, контроль поверхности лопатки, относительное расположение измерительного модуля и каретки с инструментом, количество обрабатываемых деталей, тип проводимых измерений. Любой набор альтернатив всех признаков (по одному из каждой строки морфологической таблицы) представляет собой возможный вариант исполнения технологии; при этом мощность морфологического множества составляет 559872 варианта. Из этого множества были выбраны так называемые опорные варианты ТР [3]. На рисунке 1 представлены некоторые возможные ТР, синтезированные на основе морфологического анализа задачи поиска перспективных вариантов технических решений для финишной обработки лопаток ГТД.

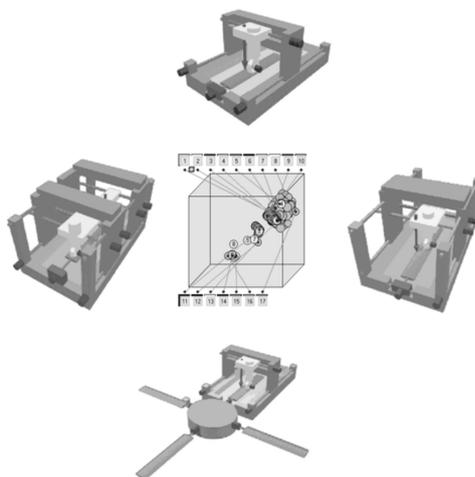


Рис. 1. Возможные ТР.

На базе предложенного подхода проведена оценка перспективных технологических и конструкторских решений для финишной обработки лопаток ГТД. Общее число возможных технических решений в матрице превысило полмиллиона вариантов; часть из них была синтезирована, оценена по набору критериев, отобрана и сгруппирована в кластеры, подвергнутые последующему анализу. Исследованные варианты обладают высокими оценками выбранной целевой функции, что позволяет сделать заключение о высоких технико-экономических показателях соответствующих ТР.

Список литературы

1. Сухоруков Р.Ю., Афонин В.Л., Раков Д.Л., Шитов А.М., Назаров Р.А., Гаврилина Л.В., Кошавцев Н.Ф., Кондратьев И.М., Смоленцев А.Н. Исследование и разработка интеллектуальных технологических систем и управления данными системами для машин нового поколения. Отчет о НИР, 2016, Номер государственной регистрации: 01201355405, 205с.
2. Bardenhagen, L. V. Gavrilina, B. M. Klimenko, M. A. Pecheykina, D. L. Rakov, I. N. Statnikov. A comprehensive approach to the structural synthesis and evaluation of engineering solutions in the design of transportation and technological systems. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. ISSN 1052-6188, 2017, Vol. 46, No. 5, pp. 453–462.
3. Кондратьев И.М., Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю. Поиск перспективных технических решений для финишной обработки лопаток газотурбинных двигателей. Проблемы машиностроения и автоматизации. № 3, 2018, с. 25-35.

О СПОСОБАХ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В ВОЛНОВОМ ГЕНЕРАТОРЕ С КАВИТАЦИОННЫМИ ЗОНАМИ И ИХ ПРЕИМУЩЕСТВАХ ПРИ ТОПЛИВОПОДГОТОВКЕ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Кормилицын В. И., Ганиев С. Р., Чередов В. В.

Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Исследованы зависимости влияния режимно-технологических и конструктивных факторов на формирование кавитационных зон в проточных каналах плоского типа при течении в них различных сред (воды, газового конденсата, мазута, сырой нефти, а также потоки углеводородов и некондиционных составляющих энергетических топлив, как нерастворимых друг в друге, так и в гетерогенном виде при преобразовании их в многофазные среды).

Рассмотрены процессы смешения нерастворимых друг в друге вязких сред исходных составляющих и твердых частиц исходного сырья для приготовления как традиционных, так и альтернативных топлив при применении специальных решений для формирования полей скоростей, давлений, температур и других гидродинамических величин с весьма сложной структурой в определенных комбинационных сочетаниях. Знание и реализация их в конструктивном исполнении волновых генераторов является необходимым условием для проектирования, создания и успешной эксплуатации оборудования. Это позволяет оптимизировать технологические процессы и исключить «холостые» режимы работы оборудования в промышленных условиях.

Результаты экспериментов позволили интенсифицировать производительности генератора за счет повышенной турбулентности потока поверхностными вихрегенераторами (лунками) перед участком формирования кавитационных зон.

В качестве примера демонстрируется существенно улучшение теплофизических и энергетических характеристик водотопливной эмульсии на основе сырой нефти Удмуртского месторождения при кавитационном воздействии на традиционное углеводородное сырье, в котором обработка исходного углеводородного сырья проводилась в волновом проточном генераторе плоского типа с двумя рядами цилиндрических тел обтекания.

Натурные эксперименты при сжигании полученного топлива в котле ДКВР-10/13 показали эффективное его использование, надежную работу энергетического оборудования и высокие экологические показатели в зоне воздействия энергетического объекта на окружающую природную среду. Сжигание топлива при этом достигнуто с меньшими коэффициентами избытка воздуха (с 1,3 до 1,17), что обеспечило снижение потерь и повысило КПД котельной установки на 8-10%. Показана возможность использования сырой нефти как энергетического топлива при выработке тепло- и электроэнергии с существенным повышением технико-экономических, эксплуатационных и экологических показателей при незначительных капитальных затратах.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА И ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОНЕНТОВ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА ПРИ КАВИТАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Кормилицын В.И.¹, Масленков А.А.²

¹Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

²ФГБОУ ВО Национальный исследовательский университет «МЭИ»

В технологиях топливоприготовления энергетических топлив (как традиционных, так и альтернативных) применяются исходные компоненты, содержащие в своем составе элементы: сера (S), углерод (C), водород (H), азот (N), кислород (O), натрий (Na), калий (K), ванадий (V), железо (Fe), кальций (Ca), кремний (Si), ионы тяжелых металлов: медь (Cu), свинец (Pb), кадмий (Cd); галогены: фтор (F), хлор (Cl), йод (I), а также механические примеси (зольность), кроме этого компоненты характеризуются также интегральными показателями pH (водородный) и Eh- (окислительно-восстановительный потенциал), от количественных значений которых зависят физико-химические свойства и теплоэнергетические характеристики топлив. При этом некоторые из них имеют доминирующее значение в технико-экономическом и экологическом аспектах.

Для количественного и качественного определения состава проб принят метод потенциометрии водных и водноорганических растворов. Принцип действия анализатора основан на измерении потенциалов в жидкости с использованием набора ионоселективных сенсоров в растворах. Измерения производятся параллельно набором сенсоров в реальном времени с выстраиванием проб в случайном порядке. Измерение состава проб производится в трех технологических режимах разных вариантов кавитационных воздействий. Подготовка проб исходным компонентом производится с их предварительным перемешиванием с использованием магнитной мешалки.

В качестве примера приведены результаты анализа проб мелассы свекловичной, как составного компонента альтернативного топлива с параметрами сенсоров (табл. 1).

Ион	Диапазон измерений		Допустимый диапазон		Мешающие ионы
	моль/дм ³	мг/дм ³	pH	Температура, °C	
Cl ⁻	10 ⁻⁵ - 10 ⁻¹	0,3-3,6·10 ³	2-12	5-50	S ²⁻ , I ⁻ , Br ⁻
F ⁻	10 ⁻⁶ - 10 ⁻¹	0,019-1,9·10 ³	4-8	5-80	Fe ³⁺ , Al ³⁺
I ⁻	10 ⁻⁵ - 10 ⁻¹	1-12,7·10 ³	3-9	5-50	S ²⁻ , Cl ⁻ , Br ⁻
Cu ²⁺	10 ⁻⁵ - 10 ⁻¹	0,64-6,36·10 ³	3-7	5-50	Hg ²⁺ , Ag ⁺ , Fe ³⁺
Pb ²⁺	10 ⁻⁵ - 10 ⁻¹	2-20,72·10 ³	4-7	5-50	Hg ²⁺ , Ag ⁺ , Cu ²⁺ , Cd ²⁺
Cd ²⁺	10 ⁻⁵ - 10 ⁻¹	1-11,24·10 ³	3-7	5-50	Hg ²⁺ , Ag ⁺ , Pb ²⁺ , Cu ²⁺ , Fe ²⁺

Таблица 1. Параметры сенсоров

pH	1-14	5-80	-
Eh	±2в	0-150	-

Продолжение таблицы 1

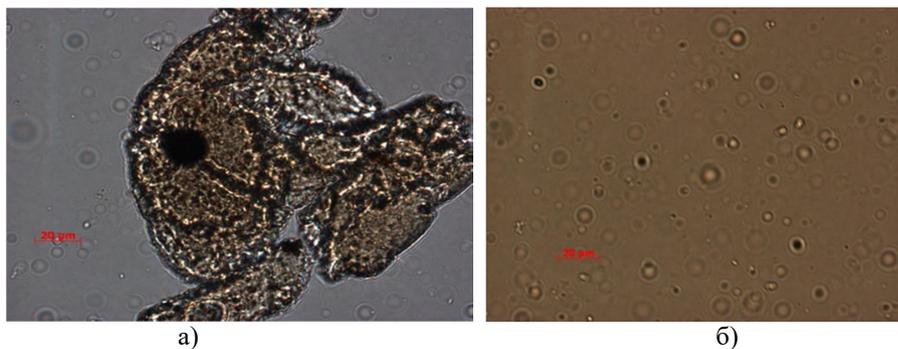


Рис. 1. Структура проб мелассы свекловичной до (а) и после (б) кавитационной обработки

Результаты анализа исходной и подвергнутой кавитационной обработке проб показали:

- меласса свекловичная при кавитационной обработке приобретает тонкодисперсную структуру высокоомогенной эмульсии;
- кавитационная обработка активировала минеральный состав компонентов проб по ионам Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} , F, Cl, I;
- повышение pH с 8 до 9;
- снижение окислительно-восстановительного потенциала (Eh) с +90 до -48 mv.

Полученные результаты анализа компонентов исходной среды позволяют более полно и обоснованно подходить к выбору рецептуры альтернативного топлива.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ КОЛЕБАНИЙ

Корнеев А.С.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (E-mail: korneev47@gmail.com)

Цель работы - создание методов расчета нестационарных турбулентных течений несжимаемой жидкости при наличии кавитации, учитывающих особенности гидродинамических генераторов колебаний. Эти генераторы являются одним из основных устройств, используемых в волновых технологиях [1]. Поэтому их исследование и оптимизация параметров для различных условий применения являются актуальными задачами.

Математическая модель. Использовалась система уравнений неразрывности и Навье-Стокса, двухпараметрическая модель турбулентности и уравнение переноса массовой доли пара для модели кавитации [2]. Течение считалось осесимметричным. Для гидродинамических генераторов данного типа характерны большие значения окружных компонент скорости. Это не учитывается в стандартной $k-\varepsilon$ модели турбулентности [3]. В данной работе представлена поправка к выражению для турбулентной вязкости μ_t [3], учитывающая закрутку потока:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \left(1 - \frac{w^2}{u^2 + v^2 + w^2} \right).$$

Здесь $C_\mu = 0,09$; ρ – плотность жидкости, k – кинетическая энергия турбулентности, ε – скорость ее диссипации, u, v, w – осевая, радиальная и тангенциальная компоненты скорости. При отсутствии закрутки ($w=0$) модель турбулентности переходит в стандартную.

Объект исследования. Гидродинамический генератор (рис. 1) представлял собой цилиндрический канал с расширением [4, 5]. Рабочая жидкость (водопроводная вода) подавалась через два тангенциальных отверстия, обеспечивающих закрутку потока. Для измерения среднего по времени давления на стенке канала было выполнено по 6 отверстий в плоскостях xz и yz . С помощью трубок отверстия соединялись с манометрами. Эксперименты были выполнены О.В. Шмырковым.

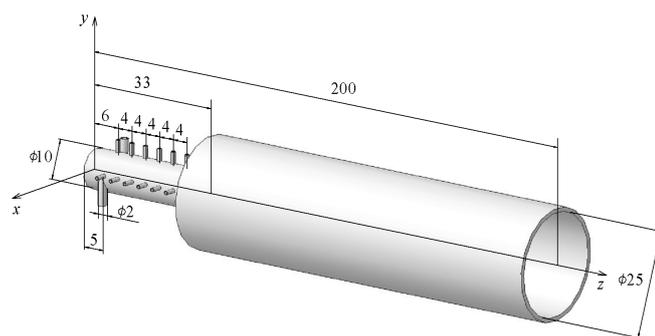


Рис. 1. Схема исследованного генератора.

Полученные результаты. Расчет по стандартной $k-\varepsilon$ модели турбулентности [3] показал заметные отклонения от измеренных распределений давления вдоль цилиндрической стенки канала, в то время как расчет с учетом поправки на закрутку дал результаты, согласующиеся со средними экспериментальными распределениями давления в плоскостях xz и yz (рис. 2).

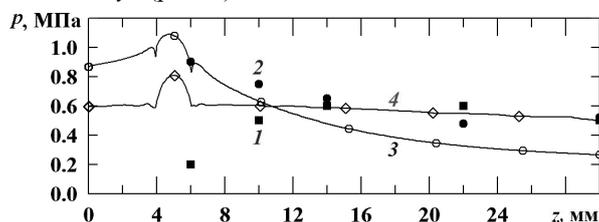


Рис. 2. Распределение среднего по времени давления на стенке канала генератора: эксперименты в плоскости xz (1) и yz (2), расчеты без поправки на закрутку (3) и с поправкой (4).

Список литературы

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технология. М.: Научно-издательский центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2008. 712 с.
2. Корнеев А. С. Математическое моделирование гидродинамических генераторов колебаний // Известия РАН. МЖГ. 2013. № 4, с. 67 – 73.
3. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows // Comput. Methods in Appl. Mech. and Eng. 1974. Vol. 3, № 2, p. 269 – 289.
4. Шмырков О. В. Исследование кавитации в вихревом генераторе проточного типа // Известия РАН. МЖГ. 2015. № 3, с. 35 – 44.
5. Корнеев А. С., Шмырков О. В. Влияние геометрических параметров на характеристики гидродинамических генераторов колебаний // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 4, с. 46 – 53.

ГАШЕНИЕ ЗВУКОВОГО ПОЛЯ, ПЕРЕИЗЛУЧЕННОГО КОНЕЧНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКОЙ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ

Косарев О.И., Остапишин Н.М., Пузакина А.К.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

Впервые задача активного гашения рассеянного телом звукового поля была поставлена Малюжинцем. В его постановке задачи - полное поле состоит из падающего поля в отсутствие тела и поля, рассеянного телом. Задача решается путем факторизации (разделения) полей и создание поля, компенсирующего рассеянное поле с использованием излучателей, расположенных на излучающей поверхности, охватывающей приемную поверхность, внутри которой расположено тело. Долгое время задача гашения считалась полностью решенной и имела много последователей. В результате решения задачи Малюжинца рассеянное поле действительно гасится, но поскольку это только часть дифракционного поля, тело не становится акустически прозрачным в дальнем поле. В этом заключается недостаток задачи Малюжинца.

Для решения задачи гашения дифракционного поля конечной цилиндрической оболочки в дальнем поле воспользуемся формулой Кирхгофа в виде

$$p(N) = \frac{e^{ikR} i^n \pi \varepsilon_n}{4\pi R} \left[\mu \cdot J'_n(\mu) \int_0^L (p_0 + p_s - Z_2 w) e^{ikz \cos \theta} dz \right] \quad (1)$$

$$Z_2 = \frac{\rho \omega^2 \cdot J_n(\mu)}{(k \sin \theta) J'_n(\mu)}, \quad \mu = ka \sin \theta,$$

где θ - угол наблюдения, a - радиус оболочки, L -длина оболочки.

Задача об акустически прозрачном теле в дальнем поле, в отличие от задачи Малюжинца, решается из условия равенства нулю подынтегральной скобки в (1)

$$p_0 + p_s - Z_2 w = 0. \quad (2)$$

Выполнение условия (2) может быть реализовано путем размещения на поверхности цилиндрической оболочки датчиков, измеряющих звуковое давление p и виброперемещения $w(x)$, и активной системы гашения, состоящей из звуковых излучателей и вибраторов и компьютерной системы управления.

Погасить дальнее звуковое поле $p(N)=0$ можно тремя способами с использованием: 1) только сил, 2) только излучателей, 3) совместно сил и излучателей. Во всех этих способах измерительная поверхность совмещается с поверхностью тела. Во всех способах активная система гашения располагается на поверхности тела, что позволяет выполнить ее в виде интеллектуального покрытия. Здесь, в качестве примера, ограничимся рассмотрением первого из указанных способов гашения, т.е. с использованием сил, приложенных к поверхности тела. Приложим к поверхности оболочки S распределенные вынуждающие силы $f_a = F_a/s$ имеющие размерность давления. Уравнение вынужденных колебаний оболочки в этом случае

$$\left(L(\gamma) + \omega_*^2 \bar{E} \right) \begin{pmatrix} U \\ V \\ W \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{a}{q} (p_0 + p_s + f_a) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где элементы матрицы $L(\gamma)$ являются функциями фазы падающего поля $\gamma = kac \cos \psi$. Уравнение (3) решаем относительно радиальных колебаний w

$$ZW = p_0 + p_s + f_a$$

где Z представляет собой механический импеданс оболочки. Рассеянное поле можно представить в виде

$$p_s = -\varepsilon_n i^n \frac{A (k \sin \psi) J'_n(ka \sin \psi) H_n(kr \sin \psi)}{(k \sin \psi) H'_n(ka \sin \psi)} + \frac{\rho \omega^2 W H_n(kr \sin \psi)}{(k \sin \theta) H'_n(ka \sin \psi)},$$

где $A = A_0 \exp(ikz \cos \psi)$, первое слагаемое соответствует полю, отраженному абсолютно твердым цилиндром, а второе слагаемое - полю, излученному (переизлученному) оболочкой вследствие колебаний ее поверхности W . После определения W и p_s найдем гасящие силы

$$f_a = \frac{p_0 (Z_0 - Z_s) (Z - Z_2)}{Z_0 (Z_2 - Z_s)}.$$

Для реализации гашения надо измерить полное поле p , измерить вибрации w и с использованием импедансов Z, Z_0, Z_s посчитать силы f_a .

ДИФРАКЦИЯ ЗВУКА НА КОНЕЧНОЙ ТВЕРДОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

Косарев О.И., Остапишин Н.М., Пузакина А.К.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

Решение задачи упрощается в тех случаях, когда упругими деформациями оболочки вследствие малости можно пренебречь и оболочку можно считать абсолютно твердым телом. Этой задачей занимались многие авторы, в том числе Р. Дж. Урик, В.В. Музыченко, Е. Скучик, П.Я. Уфимцев, Е.Л. Шендеров, Williams W.E. Однако анализ результатов этих работ показал, что они ошибочные. Звуковое давление рассеянного поля на поверхности конечного твердого цилиндра

$$p_s = -\frac{\rho\omega^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_0 e^{ikx \cos \psi} e^{-i\gamma x} \frac{H_m^{(2)}\left(a\sqrt{k^2 - \gamma^2}\right) e^{i\gamma z}}{\sqrt{k^2 - \gamma^2} H_m^{(2)'}\left(a\sqrt{k^2 - \gamma^2}\right)} d\gamma dx, \quad (5)$$

где амплитуда колебательного перемещения W_0 в падающей звуковой волне определяется из граничного условия

$$\frac{\partial p_0}{\partial n} = \rho\omega^2 w_0(x) = \rho\omega^2 W_0 e^{ikx \cos \psi},$$

из которого также следует, что колебательные перемещения рассеянной и падающей волны на твердой цилиндрической оболочке $w_s(x) = -w_0(x)$

$$W_0 = \frac{K_H k \sin \psi}{\rho\omega^2} \sum_{m=0}^{\infty} i^m \varepsilon_m J'_m(ka \sin \psi) \cos m\varphi.$$

Формулу (2) для твердой цилиндрической оболочки можно представить в виде

$$p(N) = -\frac{e^{-ikR} i^m}{2R} ak \sin \theta J'_m(ka \sin \theta) \int_0^L (p_0 + p_s) e^{ikx \cos \theta} dx, \quad (6)$$

Формулу (6) с учетом (4) и (5) можно упростить путем проведения ряда преобразований с использованием, в том числе, свойств дельта-функции, определителя Вронского и других преобразований, опускаемых для краткости. Окончательную формулу звукового давления вторичного гидроакустического поля в дальней зоне в результате проведенных преобразований можно представить в виде

$$p(N) = \frac{K_H}{\pi} \frac{e^{-ikR}}{R} \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m i^{2m+1} \left(\frac{\sin \theta}{\sin \psi} \right) \left(\frac{J'_m(\mu)}{H_m^{(2)'}(\lambda)} \right) \left(\frac{e^{ik\beta L} - 1}{ik\beta} \right) \cos m\varphi, \quad (7)$$

где $\beta = \cos \psi + \cos \theta$, $\lambda = ka \sin \psi$, $\mu = ka \sin \theta$.

На рис.1 приведены примеры расчета диаграмм направленности по (7) на частотах $f=50, 500, 5000$ Гц для твердого цилиндра с параметрами: $L=70$ м, $a=4$ м, $h=0,04$ м, $\psi=10^\circ$, $V=V_m/f$, $V_m=2,09 \cdot 10^{-2}$ (м³/сек²).

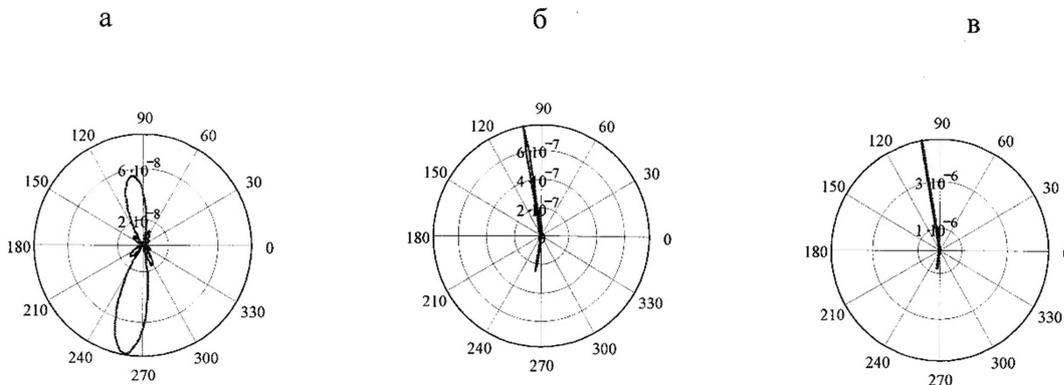


Рис.1 Диаграммы направленности: а - $f=50$ Гц, б - $f=500$ Гц, в - $f=5000$ Гц

ЗВУКОВОЕ ДАВЛЕНИЕ В ДАЛЬНОМ ПОЛЕ, СОЗДАВАЕМОЕ КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ КОНЕЧНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Косарев О.И., Остапшин Н.М., Пузакина А.К.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

Статья посвящена расчету первичного дальнего поля, излучаемого колеблющейся конечной цилиндрической оболочкой в дальней зоне. Обоснованного общепринятого решения данной задачи нет. Проблема ее решения остается актуальной в настоящее время. Целью работы является предложить численно – аналитический метод расчета диаграмм направленности первичного поля в дальней зоне. Для расчета звукового давления в дальнем поле используется интегральная формула Кирхгофа, приведенная к виду

$$p(r, \theta) = \frac{e^{-ikR}}{R} \frac{i^n}{2} \left[\mu J'_n(\mu) \int_0^L p(x) e^{ikx \cos \theta} dx - a \rho \omega^2 J_n(\mu) \int_0^L w(x) e^{ikx \cos \theta} dx \right],$$

где $\mu = k \sin \theta$, $k = \omega/c$, $\omega = 2\pi f$ - угловая частота, c - скорость звука в жидкости, L - длина оболочки, ρ - плотность жидкости, $w(x, \varphi)$ - виброперемещение поверхности оболочки, a - радиус оболочки, x, φ - продольная и окружная координаты оболочки, θ - угол наблюдения. Деформации $w(x)$ определяется из решения задачи о вынужденных колебаниях оболочки. Считая, что взаимодействие оболочки с жидкостью происходит только по радиальной координате W , уравнение вынужденных колебаний оболочки можно представить в виде

$$\left(L(\gamma) + \omega_*^2 \bar{E} \right) (U, V, W)^T = (0, 0, a p_s / q)^T,$$

где U, V, W - продольные, касательные и радиальные перемещения при колебаниях поверхности оболочки, элементы матрицы $L(\gamma)$ являются функциями фазы падающего поля $\gamma = k a \cos \varphi$.

Звуковое давление на поверхности конечной цилиндрической оболочки при произвольной функции $w(x)$, представляемой интегралом Фурье, определяется формулой (без суммирования гармоник n)

$$p_s = \frac{a \rho \omega^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{w(x) H_n^{(2)}(a\tau) e^{i\gamma(z-x)} d\gamma dx}{a\tau H_n^{(2)\prime}(a\tau)}, \quad (1)$$

где $H_n^{(2)}(a\tau), H_n^{(2)\prime}(a\tau)$ функция Ганкеля второго рода и ее производная, $\tau = \sqrt{k^2 - \gamma^2}$, γ - переменная интегрирования. Расчет вынужденных колебаний конечной цилиндрической оболочки с определением форм колебаний $w(x)$ представляет собой сложную задачу, решаемую только численно.

Проведены сравнительные исследования двух методов расчета звукового давления в дальнем поле, создаваемого колеблющейся конечной цилиндрической оболочкой. Первый метод основан на формуле распределения звукового давления на поверхности конечного цилиндра при произвольном распределении колебательной скорости, допускающем разложение в ряды и интегралы Фурье. Второй метод основан на импедансе, устанавливающем связь между обратными преобразованиями Фурье поверхностного распределения звукового давления и виброперемещения на оболочке. Приведены примеры расчета диаграммы направленности при различных формах колебаний оболочки. При проведении расчетов виброперемещение задавалось в виде $w(x) = \sin(\pi m x / L)$, (2), где m число полуволн по длине оболочки, а также в экспоненциальном виде. Величина

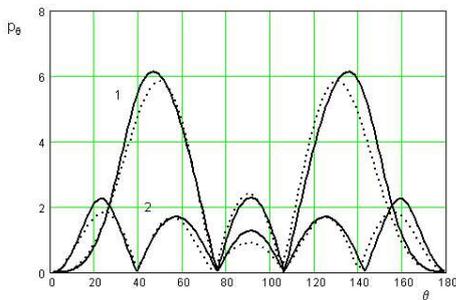


Рис.1. Диаграммы направленности.

и характер распределения давления по длине конечной оболочки и, соответственно, диаграмма направленности в случае задания перемещений в виде (2) зависят от безразмерных параметров: волнового числа t (частоты колебаний), длины оболочки L , окружной и продольной гармоник n, m . На рис.1 показаны диаграммы направленности с относительными величинами звукового давления в долях $\rho c^2 (e^{-ikR}/R)$. Сплошные кривые соответствуют расчету с использованием формулы (1), а пунктирные – по второму методу. Две верхние кривые 1 посчитаны для параметров: $n=3, m=3, t=4, L=3$, две нижние кривые 2 посчитаны для параметров: $n=2, m=5, t=4, L=3$.

ЗОНДОВЫЕ МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Котельников В.А., Кассин Д.В.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия
Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

Разработка ракетных двигателей предполагает наличие эффективных методов и средств диагностики физических процессов в камере сгорания. Это позволяет создавать надежные системы управления и аварийной защиты при возможных изменениях характеристик рабочего процесса. Поскольку температура в камерах сгорания достигает 2000-7000 К, в продуктах сгорания происходит термическая ионизация. Максимальные значения концентраций заряженных частиц составляют $10^{18} - 10^{19} \text{ м}^{-3}$ [1].

По мере движения по газодинамическому тракту и истечении из сопла концентрация ионов и электронов снижается до значений $10^{13} - 10^{14} \text{ м}^{-3}$ [2]. Для исследования параметров пристеночной плазмы и использования этих параметров для диагностики двигателя предпочтительно использовать плоские пристеночные зонды, располагая их в области газодинамического тракта и сопловой части. Такие зонды не нарушают аэродинамику потока, не подвержены чрезмерному нагреванию вследствие контакта с ионизованным потоком газа, а также удобны в технологическом отношении, поскольку их монтаж осуществляется через относительно малые отверстия (1-2 мм). Теория и методика обработки зондовых характеристик таких зондов - подробно изложена в работах [3]. В [3] приведены алгоритмы зондовых измерений. Все алгоритмы подтверждены методическими исследованиями и неоднократно применялись в практике зондовых измерений.

Список литературы

1. Ягодников Д.А., Рудинский А.В. Диагностика ракетных и реактивных двигателей по характеристикам собственного электромагнитного поля продуктов сгорания. // *ТВТ*, 2018.
2. Котельников В.А., Котельников М.В. Зондовая диагностика плазменных потоков. М. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая дисциплина», 2016, -С. 404.
3. Котельников В.А., Котельников М.В., Филиппов Г.С. Методы диагностики потоков столкновительной плазмы истекающих из технологических плазмотронов.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФУЗИИ ГАЗА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРИБОРАМ ВАКУУМНОЙ ТЕХНИКИ

Котельников М.В.^{1,2}, Платонов М.А.²

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

²Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

Развитие вакуумной промышленности привело к появлению различных устройств и систем, использующих вакуум. Это вакуумные насосы различных типов, вакуумные печи, вакуумные поезда, электровакуумные приборы, вакуумная изоляция и др. Здесь возможно проникание газа через зазоры трущихся деталей и микротрещины в вакуумное пространство, что приводит к различным нарушениям функциональности [1]. Таким образом, процесс истечения газа через относительно малые отверстия в результате теплового движения молекул, получивший название эффузия, часто встречается в вакуумной технике, что оказывает существенное влияние на ее живучесть и безопасность. Поэтому детальное исследование эффузионных процессов применительно к приборам вакуумной техники, в том числе и методами компьютерного моделирования, представляется актуальным.

В работе методами компьютерного моделирования исследуется явление истечения газа в вакуумное пространство в случае, когда величина средней длины свободного пробега частиц газа больше размера отверстия. При этом впервые используется кинетический подход, рассчитывается функция распределения частиц газа путем решения уравнения Власова [2].

В общем случае такая задача является шестимерной в фазовом пространстве (x, y, z, v_x, v_y, v_z) и нестационарной [3,4]. Предлагается рассматривать в качестве отверстия прямоугольник, у которого одна сторона много больше другой. Такая модельная форма отверстия за счет сдвиговой симметрии позволит с одной стороны существенно уменьшить размерность задачи (в этом случае в фазовом пространстве задача зависит от x, y, v_x, v_y) [5], а с другой стороны получить все основные особенности распределения параметров газа в расчетной области. Соответствующие этой модели дефекты часто встречаются на практике в виде трещин в корпусах вакуумных приборов.

Численная модель задачи базируется на методе последовательных итераций по времени. На каждом временном слое уравнение Власова решается усовершенствованным методом характеристик [6].

Результаты вычислительных экспериментов показали, что форма функции распределения существенно зависит от взаимного расположения исследуемой точки и эффузионного отверстия. Анализ полученных функций распределения было уделено первостепенное внимание, т.к. именно они лежат в основе информации о параметрах газа вблизи отверстия. Были также получены поля концентраций и средних скоростей частиц газа, контролировалось соответствие потока частиц газа из отверстия к их потоку через границы расчетной области. Установлено, что средняя скорость частиц газа вдоль оси симметрии струи несколько возрастает, а концентрация падает в результате рассеяния струи.

Список литературы

1. Саксаганский Г.Л. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах. М.: Атомиздат, 1980, 216 с.;
2. Власов А.А. Статистические функции распределения. М.: Наука, 1966, 356 с.;
3. Котельников В.А., Ульданов С.В. Котельников М.В. Процессы переноса в пристеночных слоях плазмы. М.: Наука, 2004, 422 с.;
4. Котельников В.А., Котельников М.В., Гидаспов В.Ю. Математическое моделирование обтекания тел потоками столкновительной и бесстолкновительной плазмы. М.: Физматлит, 2010, 266 с.;
5. Котельников М.В., Котельников В.А., Морозов А.В. Математическое моделирование взаимодействия потока разреженной плазмы с поперечным магнитным полем. М.: Издательство МАИ, 2015, 170 с.;
6. Котельников М.В., Котельников В.А. Усовершенствованный метод характеристик. Математическое моделирование, 2017, т. 29, №5, с. 85-95;

РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ УДАРНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ПОЛЕЙ

Крупенин В.Л.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

Моделирование вибрационных полей в машинных конструкциях является важной и актуальной проблемой, поскольку их особенности и структура с одной стороны определяют виброактивность машин или систем машин, а с другой стороны могут также определить и многие аспекты полезного использования вибрационных процессов. Один из важнейших факторов формирования вибрационного поля - систематические соударения элементов конструкций, генерирующие широкополосные виброударные процессы. Во многих случаях именно виброударные процессы оказываются определяющими факторами, влияющими на структуру вибрационных полей [1, 2].

Описание глобальных виброполей, устанавливающихся в пространственных областях может быть отнесено к двум разделам.

Во-первых, для многих задач важен учет волновых свойств самих соударяющихся тел. Например, в случаях, когда виброполя определяются, в частности, соударениями каких-либо струн, нитей, балок, цепей, проводов, кабелей, мембран, пластин, панелей, решеток и тому подобных протяженных, плоских или более сложных объектов.

Во-вторых, большое число систем представимо в виде каких-либо несущих упругих, вязкоупругих, упруго-пластичных и тому подобных конструкций с упруго амортизированным оборудованием, содержащим какие-либо ударные пары.

В-первом случае моделирование должно осуществляться посредством описания процесса удара в самих конструкциях. Здесь могут быть использованы модели распределенных сильно нелинейных систем простой структуры [3, 4]. Во-втором случае, может оказаться целесообразным провести некоторую идеализацию («размазывание» оборудования по пространству) и воспользоваться моделями сильно нелинейных сплошных сред сложной структуры [1, 5 - 7]. В то время как для систем с простой структурой перемещение каждой их точки описывается одной функцией поля перемещения, описание точек сред со сложной структурой требует набора определенного числа функций.

Отметим, в то же время, что выделение двух случаев сделано для удобства. Они имеют близкую природу, описываются во многом аналогичными моделями и им присуще проявление сходных динамических эффектов, возможно, главный из которых - возникновение «хлопков» (появление синхронизации ударов в отдаленных точках). Именно системы двух указанных типов и будут рассматриваться в представляемом докладе.

На рис. 1а показана модель системы первого типа, на которой натянутая струна вибрирует вблизи точечного и прямолинейного ограничителей, с которыми может соударяться. На рис.1б дана дискретная модель системы второго типа, представляющая собой цепочку тел, с закрепленными на них виброударными механизмами.

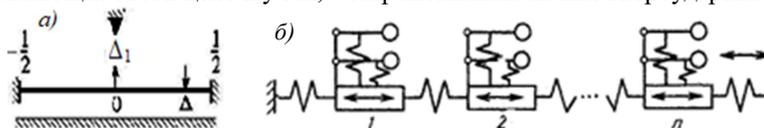


Рис. 1. Системы простой (а) и сложной (б) структуры.

Уравнения движения представляют собой дифференциальные уравнения в частных производных с сильными нелинейностями, описывающими ударное взаимодействие в соответствии с какой-либо теорией удара [2, 7, 8]. Методы решения этих уравнений используют современные методики нелинейной механики, алгоритмы частотно-временного анализа виброударных процессов, а также специально разработанные численные схемы.

Список литературы

1. Веприк А.М., Вознюк А. Д., Крупенин В.Л., Чирков И. М. Широкополосные виброударные генераторы механических колебаний. Л.: Машиностроение, 1987. 80 с.
2. Асташев В.К., Крупенин В.Л. Нелинейная динамика ультразвуковых технологических процессов. М.: МГУП им. Ивана Федорова, 2016. 372 с.
3. Асташев В.К., Крупенин В.Л. Волны в распределенных и дискретных виброударных системах и сильно нелинейных средах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1998. №5 С.13-30.
4. Крупенин В.Л. Вибрация струны, расположенной между протяженным и точечным ограничителями// Проблемы машиностроения и надежности машин. №2. 2017. С.13-22
5. Крупенин В.Л. Модель сильно нелинейной вибропроводящей среды с распределенным ударным элементом// ДАН. 1995. Т. 343. №6. С. 759-763.
6. Крупенин В.Л. К описанию процессов прохождения нелинейных волн через машинные конструкции, моделируемые посредством сильно нелинейных сплошных сред сложной структуры (часть 1 и 2) // Интернет-журнал Вестник научно-технического развития. №№6, 7. 2011. С.26-33; с.3-16
7. Крупенин В.Л. Об описании сильно нелинейных вибропроводящих и виброгенерирующих сред // Проблемы машиностроения и надежности машин. №4. 2016. С.9-19.

ОБЗОР РАЗВИТИЯ БУРОВЫХ РАСТВОРОВ ЗА РУБЕЖОМ

Кузнецов Р.Ю.

Gazprom International, г. Санкт-Петербург, Россия

В зарубежной практике буровых работ совершенствование технологий промывок скважин и совершенствование составов буровых растворов напрямую связано с повышением качества и увеличением номенклатуры применяемых химических реагентов и материалов.

При бурении во всем мире буровые компании сталкиваются с одними и теми же вопросами, связанными с буровыми растворами: устойчивость ствола скважины, ликвидация прихватов, термостабильность бурового раствора, его смазывающая способность, разрушение породы, скорость проходки и токсичность. Среди основных современных тенденций в области растворов на нефтяной основе выделяются тенденции снижения их токсичности, в основном за счет применения различных видов малотоксичных дисперсионных сред, в том числе содержащих минимальное количество ароматических соединений. Альтернативным вариантом является применение синтетических буровых растворов, которые по своим характеристикам аналогичны РНО, но безвредны для окружающей среды и используются в морском бурении.

Повышение технико-экономических показателей бурения нефтяных и газовых скважин за рубежом напрямую связано с улучшением качества существующих и созданием новых, более совершенных рецептур буровых растворов для массового бурения. Область применения буровых растворов на водной основе расширяется наряду с сохраняющейся тенденцией придания им свойств характерных для растворов на нефтяной и синтетической основе. Чаще всего проблема решается применением композиции из нескольких полимеров.

Продолжается проявление интереса к силикатам как составляющей промывочных жидкостей, начавшиеся в конце 90-х годов с коммерческого использования силикатов при реализации совместного проекта BW Mud, Mobil NSL, BP Exploration и Shell Research в Северном море. Дальнейшие лабораторные испытания установили, что при содержании в буровом растворе до 25-30 % низших силикатов достигается превосходное ингибирование сланца, что было впервые применено при бурении газовой скважины в северо-восточной Британской Колумбии.

Альтернативой биополимерным буровым растворам, имеющим уникальные реологические свойства, но являющимися одними из наиболее дорогостоящих реагентов в бурении, считают новое поколение растворов на основе оксидов магния и алюминия (ММО – mixed metal oxide), в частности система “Дрилплекс”. Благодаря сверхтиксотропным свойствам системы “Дрилплекс” – быстрому переходу системы в состояние, близкое к твердому телу, в состоянии покоя, она идеально подходит для вскрытия трещинных и высокопроницаемых горизонтов с аномально низкими пластовыми давлениями, стабилизация осыпающихся рыхлых и микротрещинных осадочных пород. Поскольку уникальный плоский реологический профиль бурового раствора на основе оксидов магния и алюминия достигается без использования дорогостоящих биополимерных добавок, то с уверенностью можно утверждать, что данная система является одной из наиболее экономичных и универсальных систем современных буровых растворов.

Исследования по разработке новых буровых растворов на водной основе, которые по эффективности не уступают растворам на нефтяной основе, продолжают.

Ведутся работы по разработке порошкообразных смазочных композиций. Разработана композиция смазки на основе крахмала, экологически безопасная.

Все буровые компании, так или иначе сталкиваются с проблемой поглощений бурового раствора, которая актуальна с самого начала истории буровых работ и значительно осложнилась при бурении глубоких скважин или через истощенные пласты. Продолжается разработка новых кольматирующих материалов. Сообщается о внедрении в Южном Техасе деформируемого уплотняющего материала (deformable sealant – DS).

ИЗУЧЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИЯХ СТРОИТЕЛЬСТВА СКВАЖИН. ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ И ВОЛНОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ КОЛЬМАТАЦИИ. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БУРОВОГО РАСТВОРА И ГЛИНИСТЫХ КОРОК. МЕТОДЫ СОХРАНЕНИЯ КОЛЛЕКТОРСКИХ СВОЙСТВ ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТОВ ПРИ ИХ ВСКРЫТИИ БУРЕНИЕМ

Кузнецов Ю.С., Аверьянов А.П., Урманчев В.И., Артамонов В.Ю.,
Султанов Д.Р., Султанова И.И., Шульгина А.П.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

В НЦ НВМТ РАН создан экспериментальный стенд, на котором проводятся исследования по изучению волнового воздействия на изменение проницаемости пористых пород и разработке методов управления данным процессом. Стенд позволяет моделировать основные процессы воздействия волнового поля на образец породы или искусственного песчаника различными промывочными жидкостями. Принципиальная схема установки приведена на рисунке 1, где 1 – гидрокомпенсатор, 2 – насосы ЗПН-32 и 9-Т, 3 – полая колонна, имитирующая ствол скважины, внутрь которой на НКТ спущен гидродинамический генератор волн, 4 – места крепления высокочувствительных и малоинерционных датчиков давления, 5 – кернодержатель с моделью керна или с настоящим керном, позволяющий исследовать процессы фильтрации при волновом воздействии и распространение волн в керне, 6 – шкаф с контрольно-измерительной и управляющей аппаратурой, 7 электродвигатели и редукторы, 8 – приемная емкость.

В качестве модели проницаемого участка ствола скважины на экспериментальной установке служит кернодержатель с керном из искусственного песчаника (рисунок 2). Насосная группа с обвязкой состояла из двух насосов ЗПН-32 и 9-Т суммарной производительностью $5 \cdot 10^{-3} - 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{с}$. Гидравлическая обвязка позволяет работать на каждом из насосов самостоятельно, а также при необходимости одновременно.

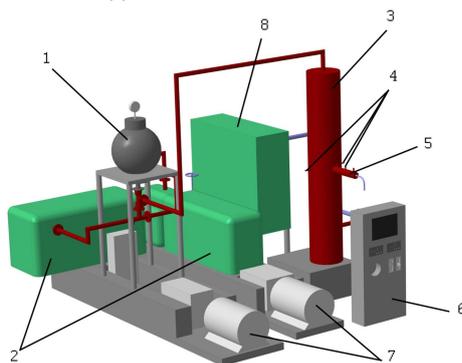


Рис. 1. - Схема экспериментальной установки.

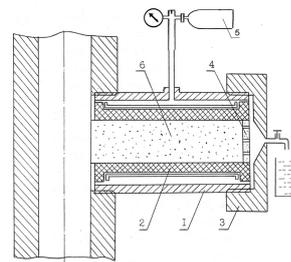


Рис. 2. – Кернодержатель.

Модель участка ствола скважины представляет собой вертикальную колонну, выполненную из обсадной трубы диаметром 0,275 м, во внутрь которой на насосно-компрессорных трубах (НКТ) спускались гидродинамические генераторы проточного типа. Наличие быстросъемных трубных соединений позволяет оперативно заменить моделируемые объекты без изменения схемы обвязки.

Колонна установлена на изолированном фундаменте. В колонне через равные промежутки установлены гнезда для подключения пьезометрических датчиков для снятия спектральных характеристик колебаний давления внутри колонны. В нижних частях колонны смонтированы кернодержатель и выкидная линия с кранами высокого давления, позволяющие регулировать давление внутри колонны. При работе насосы создают круговую циркуляцию поступающей из приемной емкости рабочей жидкости через нагнетательную линию, гидродинамический волновой излучатель и затрубное пространство. Через расходомер жидкость по возвратной линии поступает обратно в приемную емкость.

При работе гидродинамического волнового излучателя создаются колебания давления, которые воздействуют на пористую породу, помещенную в кернодержатель. Кернодержатель с одной стороны вворачивается в колонну, с другой - зажимается гайкой. На выходном конце установлен демпфер для гашения отраженных волн. Гидрообжим образца осуществляется воздухом через манжету. Для измерения амплитуды и частоты импульсов давления использовались осциллографы.

Кольматация - процесс заполнения порового пространства породы дисперсной фазой бурового раствора и твердыми продуктами реакций фильтрата бурового раствора с компонентами пористой среды. Основными факторами процесса кольматации являются: соотношение размеров фильтрующих каналов пласта-коллектора и частиц бурового раствора, дифференциальное давление на забое скважины, физико-химические свойства породы-коллектора и бурового раствора.

Кольматация в условиях скважины – процесс кратковременный – он длится не более нескольких секунд; затем на поверхности стенки скважины начинает откладываться фильтрационная корка, которая с этого момента становится главным препятствием проникновению компонентов бурового раствора в пласт.

Среди большинства специалистов-буровиков и нефтяников обычно принято считать, что кольматация является главной причиной снижения проницаемости ПЗП и продуктивности добывающих скважин. Но в результате многочисленных геофизических исследований скважин, а также лабораторных исследований твердо установлено, что в породы с первоначальной проницаемостью 0,10-0,25 мкм² проникновение частиц твердой фазы традиционно применяемых растворов практически не происходит. Основной же причиной снижения продуктивности скважин является не процесс кольматации, а проникновение фильтрата бурового раствора в ПЗП и снижение фазовой проницаемости, как по воде, так и по нефти, причем отмечено, что наибольшие трудности представляет освоение низкопроницаемых пластов, формирование зоны кольматации в которых вообще не происходит. Фильтрационная корка не способна служить надежной защитой пласта от проникновения водной фазы даже при низком показателе водоотдачи бурового раствора.

На наш взгляд целенаправленное создание неглубокого и низкопроницаемого кольматационного экрана способно существенно ограничить поступление фильтрата вглубь пласта и повысить продуктивность скважин. Для этого в НЦ НВМТ РАН коллективом под руководством академика РАН Р.Ф. Ганиева разработаны технологии управления перечисленными выше факторами. Основные элементы этих технологий следующие:

- получение реагентов-кольматантов и систем буровых растворов на безглинистой основе с требуемыми гранулометрическими характеристиками, физико-химическими и технологическими свойствами с применением волновых методов;
- управление физико-химическими и кольматирующими свойствами бурового раствора непосредственно на забое скважины в процессе бурения;
- создание кольматационного экрана низкой проницаемости на необходимую глубину (не более 10 см) в пласте-коллекторе сразу после его вскрытия с помощью специального волнового генератора, встроенного в компоновку низа бурильной колонны.

ВОЛНОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВСКРЫТИЯ ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТОВ С СОХРАНЕНИЕМ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА ГАЗОВЫХ СКВАЖИН В СЛОЖНЫХ ГЕОЛОГО-ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Кузнецов Ю.С.¹, Ганиев С.Р.¹, Шульгина А.П.¹, Артамонов В.Ю.¹, Аверьянов А.П.¹, Кузнецов Р.Ю.², Султанова И.И.¹, Султанова Д.Р.¹, Аржанов А.Ф.³, Мнацаканов В.А.⁴

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

²Филиал «Газпром Интернейшнл» в г. Санкт-Петербург

³ЗАО «Нефтегазэкспорт», г. Москва, Россия

⁴ООО «Газпром бурение», г. Санкт-Петербург, Россия

В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция роста сложности геолого-технических условий строительства и эксплуатации нефтяных и газовых скважин, связанных с природными и техногенными факторами, все более негативно отражаются на конечных показателях качества и эффективности буровых работ, а также эксплуатации скважин. Результаты аналитических обобщений и исследований свидетельствуют о низкой эффективности традиционных технологий строительства и эксплуатации скважин при решении ключевых проблем качества и эффективности буровых работ, интенсификации добычи углеводородного сырья и снижения темпов обводненности скважин.

Основной причиной снижения продуктивности пластов-коллекторов нефти и газа является глубокое проникновение фильтрата бурового раствора, формирование зоны проникновения (ЗП) с существенно более низкой фазовой проницаемостью по нефти, чем незатронутая часть пласта.

Процесс проникновения фильтрата бурового раствора особенно активно протекает при вскрытии интервалов геологического разреза с низкими градиентами гидроразрыва. В этих интервалах при спуске бурильного инструмента в стенках ствола скважины могут образовываться вертикальные трещины гидроразрыва относительно небольшой протяженности, которые, тем не менее, существенно увеличивают площадь фильтрации бурового раствора, приводят к расширению зоны проникновения и значительному ухудшению условий для качественного цементирования, последующего освоения и эксплуатации нефтяных и газовых скважин. Технология кольматации стенок скважин позволяет решить и задачу повышения градиента гидроразрыва.

Управление процессом кольматации обеспечивается специально созданным устройством (Рис.1), в котором совмещены гидроэлеватор и волновой кольмататор. Это позволило решить проблему упрочнения открытого ствола скважины и первичного вскрытия продуктивных горизонтов без нарушения их естественных фильтрационно-емкостных свойств.

Промысловые испытания показали высокую эффективность и целесообразность применения этого устройства при вскрытии продуктивных горизонтов. При применении оптимальных режимов обработки, формируемый в пристволенной зоне кольматационный экран толщиной $(15 - 25) \cdot 10^{-3}$ м повышает гидромеханическую прочность ствола до градиента горного давления и снижает коэффициент приемистости проницаемых пород до $0,01 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с} \cdot \text{МПа}$ и менее при действии репрессий. А также выдерживает действие депрессий в терригенных коллекторах 2 – 4 МПа, в карбонатных 3 – 5 МПа.

Была разработана «комплексная технология гидромеханического упрочнения ствола при бурении скважин».

Экспериментальные исследования показали:

1. Высокая стабильность гидравлических условий и технологических процессов бурения за счет оперативного предупреждения газонефтеводопроявлений и гидроразрыва горных пород, а также эффективной изоляции поглощающих пластов с затратами средств и времени на 30–50% меньшими, чем при применении традиционных технологий. Здесь проявляется внутрисистемный эффект снижения или полного исключения из технологического процесса бурения механизмов гидромеханического и физико-химического взаимодействия технологических жидкостей и вскрываемого бурением массива горных пород.

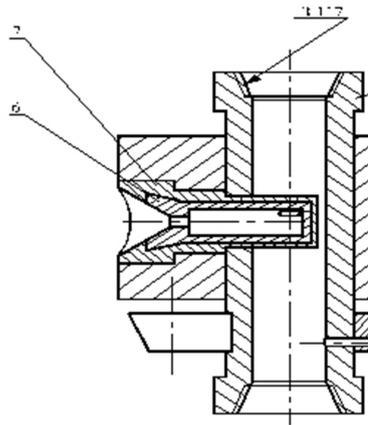


Рис. 1. Гидроэлеватор со струйно-волновым кольмататором.

2. Повышается качество и эффективность крепления скважин за счет комбинированного разобщения пластов в результате предварительной изоляции комплекса вскрываемых флюидонасыщенных пластов. Это приводит к росту дебита нефти и снижению обводненности скважин в среднем в 2,5 раза и в 8,8 раза соответственно. Внутрисистемный эффект в этом случае связан с формированием в пристволевой зоне третьего элемента крепи – кольматационного экрана с высокими гидроизолирующими характеристиками, которые, в свою очередь, подавляют процессы водоотдачи исходного цементного раствора и сохраняют исходные тампонажно-технические свойства камня.

3. Сохраняются природные коллекторские свойства продуктивных пластов призабойной зоны за счет совмещения технологий их вскрытия и гидроизоляции от ствола бурящейся скважины посторонних флюидонасыщенных пластов продуктивной толщи.

4. Применение комплекса технологий гидромеханического упрочнения ствола глубоких скважин формирует геолого-технические условия, оптимальные для совершенствования их конструкций (облегчения и упрощения), а также нелинейно повышает показатели эксплуатации нефтяных и газовых скважин.

Аналогичные результаты эксплуатации опытных скважин получены при заканчивании открытым забоем с формированием пристволевого кольматационного экрана. Как следует из данных, прорыв пластовых вод к фильтру скважин за период эксплуатации (75–213 суток) отсутствует, показатели добычи нефти в сравнении с закрытым забоем скважин повысилась на 24,5%, а коэффициент продуктивности – в 2,2 раза. Причем в скважинах с открытым забоем (гидравлически совершенные по характеру и степени вскрытия) имеется существенный резерв по увеличению добычи нефти. Опытные скважины эксплуатируются при забойных депрессиях в 1,9 раза меньших, чем базовые (среднее значение депрессий 2,6 МПа) и динамических уровнях жидкости в опытных скважинах, сниженных в 3,0–3,5 раза.

На основе широких научных обобщений, результатов аналитических, экспериментальных исследований, промысловых испытаний и внедрения комплекса системных разработок по гидромеханическому упрочнению ствола в процессе бурения скважин достигнут нелинейный рост качественных и технико-экономических показателей бурения по стабилизации технологических процессов, сохранению природных коллекторских свойств нефтегазонасыщенных пластов продуктивной толщи, долговременной изоляции комплекса флюидонасыщенных пластов при креплении скважин и тем самым, предложено техническое решение для улучшения строительства скважин в сложных геолого-технических условиях.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕПЛОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ, ПОДВЕРГНУТЫХ ОБРАБОТКЕ МЕТОДОМ АКТИВАЦИИ ПРОЦЕССА ДИФФУЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ ПРИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОМ АЗОТИРОВАНИИ

Куксенова Л.И.¹, Герасимов С.А.², Фахуртдинов Р.С.², Алексеева М.С.^{1,3},
Громов В.И.³, Данилов В.Д.¹

¹ИМАШ РАН, Москва, Россия (lkukc@mail.ru)

²МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия

³ВИАМ, Москва, Россия

Существующие традиционные технологии изготовления и упрочнения поверхностных слоев высоконагруженных деталей из теплостойких сталей, в частности ответственных деталей турбо- и моторостроения, гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания, зубчатых колес, различных деталей сложной конфигурации, нуждающихся в совершенствовании. Повышение качества деталей может быть достигнуто в результате разработки новых технологий термической и химико-термической обработки, основанных на активизации процессов диффузионного насыщения и обеспечивающих объемное и поверхностное мелкодисперсное состояние конструкционных материалов, достигаемое методами предварительного интенсивного силового и теплового воздействия и последующих процессов химико-термической обработки.

Испытываемые образцы изготавливали из сталей ВКС-7 (16Х2Н3МФБАЮ-Ш по ТУ 14-1-4483-88) и ВКС-10 (13Х3Н3М2ВФБ-Ш по ТУ 14-1-4999-91).

Образцы сталей при подготовке к ионно-плазменному азотированию подвергались предварительной термической обработке, состоящей из нормализации и высокого отпуска по режимам: нормализация при температуре 950°C, высокий отпуск при температуре 640-670°C, время обработки – 6 ч. Для создания мелкодисперсного состояния поверхностного слоя образцы из сталей ВКС-7 и ВКС-10 подвергали предварительной интенсивной пластической деформации (ИПД) – осадке при температуре 700°C и степени деформации 80% в условиях мультиосевой деформации. После осадки в осевой направлении заготовка подвергалась кратковременному подогреву и затем протяжке в поперечном направлении. При этом изменялось направление оси прилагаемого деформирующего усилия и, соответственно деформации, что обеспечивало формирование однородной мелкодисперсной структуры. Ионно-плазменное азотирование проводили на опытной установке ионно-плазменного азотирования в среде азотно-водородной газовой смеси состава 95% N₂ + 5% H₂ при температуре 500°C в течение 20 ч.

Проведенные исследования показали, что новая технология ионного азотирования, основанная на активизации процесса диффузионного насыщения за счет предварительного формирования мелкодисперсного состояния сталей, обеспечивает по сравнению с традиционным газовым азотированием:

- повышение микротвердости поверхности обрабатываемой стали на 10-20%;
- повышение износостойкости до 10 раз;
- повышение контактной выносливости до 1,4 раза.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ОСОБЫХ ПОЛОЖЕНИЙ В МЕХАНИЗМАХ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Ларюшкин П.А., Эрастова К.Г.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; (erastovakg@gmail.com).

В данной работе рассмотрены некоторые особенности анализа особых положений механизмов параллельной структуры (МПС) с использованием винтового исчисления.

К настоящему времени имеется несколько различных подходов к классификации особых положений, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки [1,2]. На основе оригинального подхода Глазунова В.А. [2] авторами была разработана следующая классификация:

- особое положение типа «ПС», характеризующееся потерей степени свободы. Возникает при вырождении пересечения групп кинематических винтов цепей механизма:

- особое положения типа «ПУ», характеризующееся потерей управляемости выходного звена. Возникает при вырождении объединенной группы силовых винтов, взаимных кинематических винтам только пассивных пар цепей при сохранении размерности группы силовых винтов связей, накладываемых цепями:

- особое положение типа «ВС», характеризующееся появлением у выходного звена дополнительной подвижности вне рамок имеющихся изначально степеней свободы. Возникает при вырождении группы силовых винтов связей, накладываемых цепями

- особое положение типа «ПП», характеризующееся неуправляемой подвижностью в пассивных парах какой-либо цепи. Возникает в случае, если размерность группы кинематических винтов пассивных пар цепи меньше числа самих пар.

Данная классификация и описанные условия возникновения особых положений позволяют выделять различные виды изменения подвижности механизма и исследовать их отдельно.

Для определения точек особых положений целесообразно использовать итерационный метод: каждая точка рабочей зоны проверяется на некоторое условие, после чего делается какой-либо вывод. При анализе особых положений удобно вычислять определитель соответствующей матрицы и сравнивать между собой соседние точки. Если знак определителя в точках разный, то между ними (при условии достаточно малого шага сетки разбиения) находится особое положение. При этом обойтись одной теорией винтового исчисления в данном случае невозможно, поскольку матрицы Плюккерových координат винтов в большинстве случаев не будут квадратными, а для особых положений типа «ПС» понижение ранга матрицы кинематических винтов цепи не является достаточным условием наличия особого положения. Основным недостатком данных методов является то, что попасть точно в точку, соответствующую особому положению, невозможно.

Авторами предлагается комбинированная методика: в соседних точках рассматриваются знаки определителя матрицы A , а также матрицы силовых винтов. Если знаки определителей матрицы силовых винтов отличаются, то между двумя точками существует особое положение или типа «ПУ» или типа «ВС». Если при этом знаки определителя матрицы A одинаковы, то особое положение типа «ПУ» отсутствует, а значит остается только особое положение типа «ВС». Для практического применения может быть удобнее рассматривать изменение знака произведения $\det(W)\det(A)$ во всей рабочей зоне сразу: если в двух соседних точках знак произведения разный, то между ними находится особое положение типа «ВС».

Список литературы

1. Gosselin C., Angeles J. Singularity Analysis of Closed Kinematic Chains // J. Mech. Des. 1990. Vol. 6, № 3. P. 281–290.
2. Глазунов В.А., Колисков А.Ш., Крайнев А.Ф. Пространственные механизмы параллельной структуры. М.: Наука, 1991. 95 p.

УСТАЛОСТНАЯ ЖИВУЧЕСТЬ СТАЛИ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО НАГРУЖЕНИЯ

Лебединский С.Г., Москвитин Г.В., Пугачев М.С., Поляков А.Н.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (SLebedinski@Yandex.ru)

Для оценки прочностной надежности несущих деталей подвижного состава по условию живучести необходимы экспериментальные данные для формирования расчетных моделей при типизированных нерегулярных процессах нагружения. Для экспериментального моделирования процесса развития усталостных трещин при нерегулярном нагружении использован известный тип образца С(Т) – компактный образец для внецентренного растяжения размером 125x120x10 мм. Химический состав стали образцов:

C 0,2104; Mn 1,085; Si 0,292; P<0,0030; S 0,020; Cr 0,108; Ni 0,130; Cu 0,215; V<0,0030; Fe 97,91.

При моделировании эксплуатационного процесса нагружения использовано распределение экстремальных значений напряжений на раме тележки рефрижераторного вагона [1]. На рис.1 (кривая 2) представлена экспериментальная зависимость длины трещины от числа блоков моделируемого нагружения. Вместе с этим, проведен расчет для такого же процесса нагружения (кривая 1 на рис.1). При этом использовалась полная диаграмма усталостного разрушения стали 20ГФЛ, принятая, как базовая для литых сталей этого типа [2,3]. При расчете процесс нагружения схематизировался методом «дождя». На основании расчета можно прийти к выводу, что на рассмотренной стадии развития трещины при случайном процессе нагружения, подобного тому, что в эксперименте, может быть использована модель линейного суммирования (относительно диаграммы усталостного разрушения). Но при этом необходимо уточненное определение коэффициента интенсивности напряжения (КИН) эффективного порога развития трещины $K_{th,ef}$ при соответствующем нерегулярном нагружении. По стандартной диаграмме усталостного разрушения для стали 20ГФЛ, величина порогового КИН $K_{th,R=0}$, равна $14 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ [2,3]. А при блочном нагружении, принята в расчете величина $K_{th,R=0}=10 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, как более соответствующая полученным экспериментальным результатам и находящаяся в рамках возможного разброса этого параметра [4]. Но она, в дальнейшем, требует экспериментального обоснования.

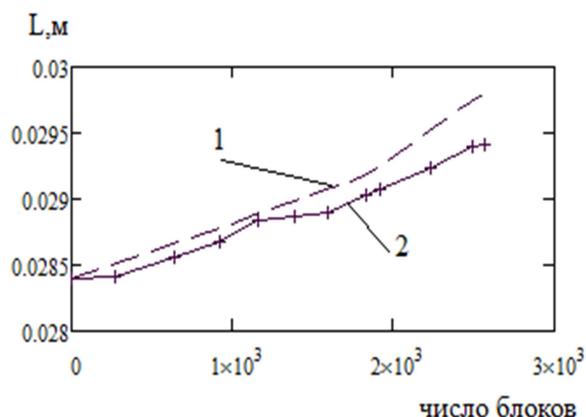


Рис. 1. Закономерность развития трещины при блочном нагружении (1- расчетная при $K_{th,R=0}=10 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$; 2- экспериментальная зависимость)

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 17-08-01513А).

Список литературы

1. Никольский Л.Н., Коцубенко В.П., Игнатенко Ю.В. Применение классифицирующих устройств типа KLA-2 для исследования нагруженности рам вагонных тележек// Брянск. Брянский институт транспортного машиностроения. 1974.С. 11-22.
2. Лебединский С.Г.,Змеева В.Н. Закономерности развития усталостных трещин в литых сталях железнодорожных конструкций// Проблемы машиностроения и надежности машин. 2000. №3. С.98-103.
3. Москвитин Г.В., Лебединский С.Г., Пугачев М.С. Стадии развития усталостных трещин в низколегированной стали при нерегулярном нагружении. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. №2. С. 28 -31.
4. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. Справочник. М.: Машиностроение, 1985, 224 с.

ГЛУБОКОВОДНЫЙ ГЕНЕРАТОР УДАРНЫХ ВОЛН ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Лысенко Г.П.¹, Котельников В.А.^{1,2}, Украинский Л.Е.¹

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук.

²Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет).

Существует целый ряд задач, для решения которых требуется генерация мощных импульсов в жидкой среде при высоком давлении. Такие импульсы используются для зондирования поверхности дна мирового океана с целью обнаружения залежей полезных ископаемых. Мощные импульсы давления создаются в нефтяных скважинах для очистки отверстий, через которые поступает нефть.

В большинстве этих задач генератор импульсов должен находиться на большой глубине и функционировать при давлениях окружающей среды в несколько сотен атмосфер.

В качестве источников таких импульсов применяются небольшие заряды взрывчатых веществ, что требует специального лицензирования на хранение и применение, либо используется эффект взрывающихся проволочек, испаряющихся при пропускании через них тока от конденсаторных накопителей. При этом, для получения значимых энергий разряда нужны конденсаторы емкостью порядка сотен микрофарад и напряжения в несколько тысяч вольт, что создает серьезную опасность при использовании их во влажной среде. Энергия импульса в этом случае имеет порядок 1000 Джоулей.

В данной работе предлагается способ генерации импульсов давления, основанных на запасании химической энергии стехиометрической смеси водорода и кислорода, получаемых электролизом на глубине при высоком давлении. Относительно небольшое увеличение энтальпии смеси, даже при давлении 10^8 Па приводит к увеличению напряжения разложения воды на 0.16 В, что практически не сказывается на характеристиках электролизера.

Изменяя объем камеры детонации от 0.5 см^3 до 500 см^3 можно получить энергию импульса на глубине 2 км в диапазоне от 800 Дж до 8×10^5 Дж.

Испытания генератора импульсов в созданной установке с рабочим давлением 2×10^7 Па полностью подтвердили работоспособность предложенного устройства.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО УГЛЕПЛАСТИКА

Лю Хао¹, Думанский А.М.²

¹МГТУ им. Баумана, Москва, Россия; E-mail: haoliu@mail.ru;

²Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

Данная работа посвящена исследованию влияния скорости деформирования образцов однонаправленного углепластика, нагружаемых сжатием под разными углами к направлению армирования. Нагружение выполнялось при скоростях деформации различающихся на несколько порядков. Результаты испытаний показывают наличие заметной зависимости кривых деформирования от скорости деформирования для нагружения под углами 15, 30, 45, 60, 75 и 90°, а также в разной степени проявляющаяся физическая нелинейность. Описанная выше закономерность выявлена у ряда конструкционных углепластиков, в частности [1-2]. Анализ кривых деформирования образцов показал, что в наибольшей степени нелинейное деформирование проявляется при сжатии под углом 45°, что связано с максимумом сдвиговых напряжений. При нагружении в направлении 90° нелинейными эффектами можно пренебречь. Следует также отметить сложность проведения и измерений при повышенных скоростях деформации.

В большинстве работ при большой сложности проведения испытаний разработка аналитических методов обычно основывается на выявлении регрессионных зависимостей модуля упругости и прочности в зависимости от скорости деформирования. Поэтому в данной работе предлагается исследование, основанное на соотношениях наследственной упругости и анизотропной теории упругости.

Используется принцип Вольтерра, основанный на замене упругих характеристик соответствующими операторными выражениями, которые в дальнейшем обращаются, используя фундаментальные свойства резольвентных операторов. Беря в качестве ядра ползучести слабосингулярное ядро Абеля, после ряда преобразований в линейной области получаем определяющее соотношение для описания кривой деформирования при скоростном деформировании

$$\sigma_{\theta} = E_{\theta}^0 \left[1 - k_{\theta} \left(\frac{\varepsilon_2}{\dot{\varepsilon}} \right)^{1+\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\left(-k_{\theta} \left(\frac{\varepsilon_2}{\dot{\varepsilon}} \right)^{1+\alpha} \right)^n}{\Gamma[2 + (1+\alpha)(1+n)]} \dot{\varepsilon} \right] \varepsilon_{\theta} \quad (2)$$

где E_{θ}^0 - мгновенный модуль и k_{θ} - параметры, определяемые с помощью анизотропной теории упругости, являются функциями от параметра θ , k_{θ} и α являются параметрами ядра Абеля. В соотношении (2) учтено, что резольвентой ядра Абеля является дробно-экспоненциальная функция Работнова [3]. Выражение, стоящее в скобках (2), позволяет оценить зависимость модуля упругости однонаправленного углепластика при нагружении под углом θ к направлению армирования.

В работе было учтено условие $\alpha = -0,9$, проверенное при обработке и анализе ряда экспериментальных данных.

Выполнено построение расчетных кривых деформирования в линейной области и проведено сопоставление полученных кривых с экспериментальными данными, которые были получены оцифровкой экспериментальных кривых. Показано удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных.

Дальнейшее направление исследований заключается в обобщении полученных определяющих соотношений, позволяющих учитывать нелинейный характер кривых деформирования. Возможно обобщение полученных определяющих соотношений использованием нелинейного ядра Работнова. Такой подход приведет к заметному усложнению соотношений, однако в этом случае может быть развита обобщенная модель, позволяющая с помощью ограниченного набора параметров описывать анизотропию механических свойств углепластика при различных режимах нагружения. Использование такого подхода также может быть использовано при оценке и прогнозировании энергопоглощающих свойств композиционных материалов и элементов конструкций из них.

Список литературы

1. Daniel I.M., Werner B.T., Fenner J.S. Strain-rate-dependent failure criteria for composites. *Comp. Sci. and Tech.*, 2011, Vol. 71, p. 357-364.
2. Tsai Jia-Lin, Sun C.T., Strain rate effect on in-plane shear strength of unidirectional polymeric composites, M.: *Comp. Sci. and Tech.*, 2005, Vol. 65, p. 1942-1947.
3. Dumansky A.M., Tairova L. P, The prediction of viscoelastic properties of layered composites on example of cross ply carbon reinforced plastic. M.: *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2007, Vol II.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СЫПУЧЕЙ СРЕДЫ НА ВИБРОЛОТКЕ

Лян И.П.¹, Пановко Г.Я.^{1,2}

¹ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; (lyanilyaimash@yandex.ru)

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия,

В современных технологических процессах переработки твердых тел, сыпучих материалов, гранулированных сред широко используются различные методы вибрационной обработки. Вибрация позволяет существенно интенсифицировать процессы транспортирования, грохочения, сепарации. В большем числе случаев для осуществления этих и подобных технологических процессов применяются вибрационные машины с инерционными самосинхронизирующимися возбудителями [1]. При этом из-за неравномерного распределения сыпучего материала по поверхности лотка или изменения объема материала, поступающего из питателей или бункеров, неизбежно возникает смещение центра масс всей системы, что может приводить к рассинхронизации вибровозбудителей. Моделирование и изучение процессов обработки сыпучих сред, получение информации о состоянии среды в каждый момент времени необходимо для выбора рациональных параметров вибрации и создания систем управления, обеспечивающих стабильность технологического процесса и повышение его эффективности.

Целью настоящей работы является определение перемещения центра масс сыпучей среды, непрерывно поступающей на поверхность вибrolотка. Сыпучая среда рассматривается как неньютоновская (дилатантная) жидкость, что позволяет использовать подход механики сплошной среды [2]. Процесс течения материала описывается системой, состоящей из трех групп дифференциальных уравнений: закона сохранения импульса системы, закона сохранения массы системы и реологических соотношений.

Принципиальной особенностью полученной системы уравнений является то, что поверхность перехода (где уравнения изменяют свой тип) остается неизвестной, а граничные условия формируются на поверхностях и линиях, которые сами определяются во время решения задачи.

Для решения этой системы на основе метода крупных частиц [3] разработан и программно реализован численный алгоритм, позволяющий получить глобальные и локальные параметры среды в произвольный момент времени. В результате выполненного численного расчета было получено распределение во времени объема и концентрации материала на наклонном вибрирующем лотке. Отдельные фрагменты расчета представлены на рис. 1, где горизонтальная ось совмещена с продольной осью лотка длиной L , а вертикальная ось - расстояние от выходного сечения бункера до поверхности лотка.

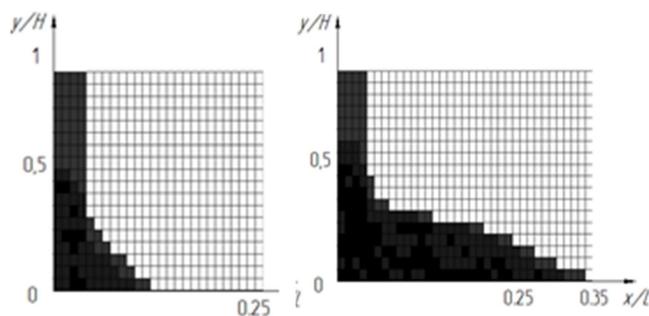


Рис. 1. Распределение сыпучей среды по поверхности лотка

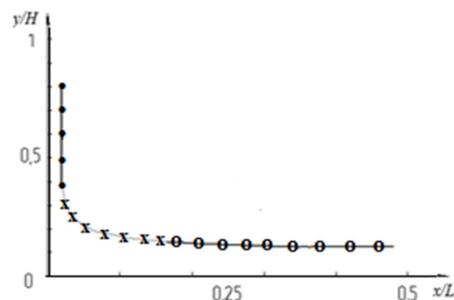


Рис. 2. Изменение положения центра масс среды во времени

На основе анализа распределения объемной концентрации сыпучего материала по лотку рассчитывалось положение центра масс среды в каждый фиксированный момент времени. На рис. 2 представлена траектория центра масс в расчетной области. Процесс перемещения сыпучей среды с постоянным подсыпанием можно разделить на 3 этапа. Первый этап соответствует свободному падению материала из отверстия питателя (обозначен точками на рис. 2); на этом этапе центр масс перемещается строго вертикально. На втором этапе (крестики на рис. 2) формируется насыпь, которая начинает перемещаться по поверхности лотка. На третьем этапе (кружочки на рис. 2) происходит перемещение среды и заполнение всей рабочей поверхности лотка равномерным слоем материала. Во время формирования насыпи и перемещения среды по вибрирующему лотку центр масс смещается в направлении оси x и к моменту полного заполнения лотка оказывается вблизи к центру расчетной области. Полученные результаты соответствуют общим физическим представлениям о процессе. Предложенный алгоритм может быть использован для моделирования динамики сыпучих сред при других условиях вибрационных воздействий.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00708).

1. Список литературы

2. Блехман И. И. Вибрационная механика. – М.: Наука. Физматлит, 1994.

3. Яцун С.Ф., Локтионова О.Г., Пинаева Т.В. Определение оптимальных параметров счета в задачах моделирования динамики сыпучих сред // Известия Курского государственного технического университета. 2000. № 5. С. 13-19.

4. Белоцерковский О. М., Давыдов Ю. М. Метод крупных частиц в газовой динамике: Вычислительный эксперимент. – Наука, 1982.

О ПРИМЕНЕНИИ МНОГОЧАСТОТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ (МДГК) К ЗАДАЧАМ СЕЙСМОЗАЩИТЫ.

Макаров С.Б., Панкова Н.В.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

Авторы данной работы многие годы в Институте машиноведения РАН занимались колебаниями в структурно-сложных системах (ракетные системы, автомобили, строительные конструкции для высоких технологий и т.п.). Полагаем этот опыт полезным для решения проблемы защиты от сейсмических воздействий строительных конструкций [1-3].

С землетрясениями, как и с любыми нежелательными динамическими воздействиями, можно бороться только 3-мя способами: подавить землетрясение в источнике (пока это невозможно), подавить или ослабить на пути распространения и, наконец, как-то защитить саму конструкцию от разрушения. В условиях «плотной» застройки по сути возможен только 3-й способ. Обсуждается вопрос: как лучше защитить от сейсмических воздействий бетонное здание, в котором планируется высокотехнологическое производство или имеются иные причины, накладывающие жесткие ограничения на допустимый уровень вибраций. Нужно построить здание на мощном фундаменте или разработать какой-то иной способ защиты?

Предлагается использовать многочастотный динамический гаситель колебаний (МДГК), как некий континуум, выполненный из резиноподобного материала и обладающий большим количеством собственных частот в частотном диапазоне сейсмике. При наличии у него собственных частот, близких к резонансам защищаемого объекта, энергия колебаний здания перекачается в колебание гасителя. Такой способ защиты может оказаться менее затратным и более эффективным

При компьютерном моделировании были получены обнадеживающие результаты по снижению уровней колебаний защищаемых строений, на крышах которых (т.е. в местах их наибольшей виброактивности на низких частотах) были установлены МДГК. При этом колебания здания значительно снижаются вследствие поглощения их энергии гасителем (МДГК), настроенным на диапазон основных низкочастотных резонансов здания.

Классический (стандартный) алгоритм устранения/снижения вредной/нежелательной вибрации какого-либо элемента сложной конструкции состоит из следующих основных этапов:

А) определение частотного спектра вибрации элемента конструкции, вибрацию которого необходимо снизить, и, соответственно, частотного диапазона решения задачи;

Б) определение спектра собственных частот защищаемой конструкции в исследуемом диапазоне частот;

В) определение частотного спектра внешнего воздействия на конструкцию;

Г) сопоставление результатов этапов (А) – (В) и разработка мероприятий по изменению либо спектра внешнего воздействия путем подавления источника вибрации или снижения вибрации на пути ее распространения (демпфирующие покрытия и т.п.), либо резонансных свойств защищаемого объекта, по возможности «выводя» резонансные пики отклика защищаемого элемента конструкции за границы заданного частотного диапазона.

Использование многочастотных динамических гасителей колебаний (МДГК) на этапе (Г) позволяет снизить уровень вибраций элемента защищаемой конструкции не на одном резонансе, а одновременно на нескольких резонансах, находящихся в заданном частотном диапазоне сейсмической активности.

Однако применение динамического гашения колебаний имеет существенный недостаток – оно требует заметного увеличения массы конструкции. Этот недостаток практически отвергает использование динамических гасителей колебаний в наземных и летающих транспортных средствах, а также во многих машиностроительных конструкциях – из-за снижения их энергоэффективности.

Поэтому авторы рассматривают возможность применения МДГК для снижения низкочастотных колебаний строительных объектов, для которых одними из самых опасных воздействий являются антропогенные и природные сейсмические воздействия.

Список литературы

1. Макаров С.Б., Панкова Н.В., Перминов М.Д., Тропкин С.Н. Об использовании упругой конструкции, частично заполненной жидкостью, в качестве многочастотного динамического гасителя колебаний // Труды международного форума «Инженерные системы -2015», – Москва, 6-7 апреля 2015г. – С.145-149.
2. Макаров С.Б., Панкова Н.В., Тропкин С.Н. Использование пассивных многочастотных гасителей колебаний (МДГК) в задачах сейсмозащиты // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2016, №6, С.42-47.
3. Макаров С.Б., Панкова Н.В., Перминов М.Д., Тропкин С.Н. Модельная задача о применении многочастотного динамического гасителя колебаний (МДГК) на объекте, имеющем собственные формы колебаний различного типа // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2017, №4, С.103-108.

МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПО ДАННЫМ НАТУРНОЙ ТЕНЗОМЕТРИИ

Маслов С.В., Лыкина Н.А.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия. (E-mail: maslovsv@inbox.ru)

В докладе рассмотрены полученные ИМАШ РАН результаты развития методов и систем мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) ответственных конструкций в условиях их реальной эксплуатации. В связи с невозможностью, с одной стороны, учесть расчетным путем сложный характер реализуемой последовательности термомеханического нагружения элементов энергетических установок и, с другой стороны, обеспечить измерение параметров НДС непосредственно в наиболее опасных точках конструкций, предлагается использовать расчетно-экспериментальные алгоритмы, основанные на методах натурной тензометрии и методах решения прямых и обратных задач экспериментальной механики.

Накопленный ИМАШ РАН опыт проведения натуральных исследований нагруженности создаваемых энергетических установок [1,2], имеющийся опыт разработки методов и средств измерений [3], а также выполненный анализ современных и перспективных методов и алгоритмов обработки и анализа результатов расчетно-экспериментального определения НДС [4] позволяют установить основные принципы построения и функционирования диагностических систем, основанных на данных экспериментального контроля НДС ответственных конструкций. В табл. 1. представлены основные варианты применения созданных и разрабатываемых методов и систем для повышения надежности и безопасности эксплуатации новых образцов энергоустановок со сложными и многофакторными условиями внутреннего и внешнего нагружения.

Этап создания установки	Определяемые параметры	Использование результатов измерений и анализа НДС	Системы обработки данных
Монтаж, наладочные операции	Напряжения, деформации в ответственных элементах. Усилия затяга резьбовых соединений	Предотвращение опасных ситуаций, связанных с превышением допустимых параметров	.Информационно-измерительные системы натурной тензометрии
Пусконаладочные испытания при пробных режимах нагружения	Напряжения, вибрации, пульсации давлений и температур в элементах конструкции	Определение параметров нагружения, уточнение динамических характеристик элементов, отладка алгоритмов мониторинга НДС	Системы мониторинга НДС, системы диагностики вибрационных динамических характеристик
Начальный период эксплуатации	Напряжения, температуры наружных и внутренних поверхностей, пульсации температур теплоносителей, динамические характеристики конструкции.	Мониторинг НДС, температурных полей и динамических характеристик конструкции в условиях эксплуатации. Формирование «портретов нагружения» для основных эксплуатационных режимов.	Системы мониторинга и диагностики НДС. Системы контроля остаточного ресурса САКОР, АСТДК
Основной период эксплуатации	Температуры теплоносителей и поверхностей, пульсации температур на наружных поверхностях, взаимные перемещения элементов конструкции.	Мониторинг состояния установки, учет реализованных эксплуатационных режимов, контроль накопленных повреждений и остаточного ресурса конструкции	Системы контроля остаточного ресурса САКОР, АСТДК

Таблица 1. Применение методов натурной тензометрии для диагностики НДС на различных этапах ввода в строй головных образцов энергоустановок

На основе анализа проведенных исследований установлены перспективные направления развития расчетно-экспериментальных методов и систем мониторинга НДС высоконагруженных технических систем.

Список литературы

1. Махутов Н.А., Дайчик М.Л., Маслов С.В. и др. Методы и результаты исследований напряженного состояния реакторной установки ВВЭР-1000 при эксплуатации/Международный центр научной и технической информации, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. М., 1992.
2. Михалев Ю.К., Фомин А.В., Маслов С.В. Натурные тензотермометрические исследования напряженно-деформированных состояний оборудования АЭС// Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. №5. С. 121-126.
3. Методы и средства натурной тензометрии: Справочник/ М.Л.Дайчик, Н.И.Пригоровский, Г.Х.Хуршудов. – М.:Машиностроение, 1989. – 240с. ISBN 5-217-00392-8
4. Разумовский И.А., Чернятин А.С., Фомин А.В. Развитие экспериментально-расчетных методов определения напряженно-деформированного состояния элементов конструкций в ИМАШ РАН//Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013, №10. С. 87-94.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РАВНОМЕРНОСТИ \mathcal{L}_τ -ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН.

Л. Б. Матусов.

Институт Машиноведения РАН, Москва, Россия.

В данной работе исследуется возможность построения \mathcal{L}_τ -последовательности [1] со свойством А так, чтобы было возможно в качестве последовательности операторов $\{L_k\}$ брать все операторы низших порядков. Это обосновано тем, что именно в этом случае значение τ будет минимальным, что наилучшим образом отразится на всех характеристиках равномерности. Только в этом случае данные последовательности могут быть успешно использованы при решении практических задач, относящихся к оптимизации машин и механизмов, и т.д.

Рассмотрим K^n – единичный n -мерный куб.

1. Свойство А. Разобьем куб K^n плоскостями $x_j = 1/2$ при $j=1, 2, \dots, n$ на $t=2^n$ октантов, которые будем считать двоичными параллелепипедами. Разобьем последовательность точек $P_0, P_1, \dots, P_i, \dots$ на двоичные участки, длина которых равна 2^n : $P_0, \dots, P_{t-1}, P_t, \dots, P_{2t-1}, P_{2t}, \dots, P_{3t-1}, \dots$. Если в любом из этих участков все точки принадлежат различным октантам, то мы говорим, что последовательность обладает свойством А[2].

В данной работе удалось доказать следующие утверждения.

Пусть L_1, L_2, \dots, L_n – различные моноциклические операторы с порядками m_1, m_2, \dots, m_n соответственно.

Лемма 1. Пусть $p^j(i)$ – есть DP – последовательности, соответствующие всем моноциклическим операторам низших порядков L_1, \dots, L_n . Пусть m – порядок оператора L_n . Тогда справедливо следующее неравенство:

$$n + \frac{m(m+1)}{2} < 2^m \quad \text{при } m \geq 5$$

Теорема. Существуют такие начальные условия для первых столбцов направляющих матриц, что последовательность точек $P_i = (p^1(i), \dots, p^n(i))$, построенная по последовательности всех взятых подряд моноциклических операторов, при каждом n обладает свойством А.

Список литературы

1. Соболев И.М. Многомерные квадратурные формулы и функции Хаара, Москва, Наука, 1969, 288с.
2. Соболев И.М. Точки, равномерно заполняющие многомерный куб, Москва, Знание, 1985.

ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МАШИНОВЕДЕНИЯ И МАШИНОСТРОЕНИЯ

Махутов Н.А.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия. (E-mail: kei51@mail.ru);

При создании восемь десятилетий назад Института машиноведения (ИМАШ) в составе и во главе Отделения технических наук АН СССР в качестве основных направлений фундаментальных исследований и прикладных разработок были определены четыре – теория машин и механизмов, динамика и прочность, трение и износ, технологии машиностроения и конструкционные материалы. Каждое из этих направлений в предвоенные годы способствовало становлению в нашей стране автомобилестроения, технологического машиностроения, авиации, станкостроения. В военные годы все внимание Института было сосредоточено на оборонной промышленности и оборонном машиностроении, когда долговечность машин приобрела критерильное значение (рис. 1).



Рис. 1. Развитие основных направлений фундаментальных исследований и прикладных разработок.

В первые послевоенные годы основные усилия ученых ИМАШ были направлены на расширение исследовательских, технологических и конструкторских работ в области повышения точности технологических процессов, восстановления энергетического, тяжелого, транспортного машиностроения. Во второй половине прошлого века ключевое значение для ИМАШ стали приобретать вопросы исследований и развития автоматизации производства, авиационной, ракетно-космической и атомной промышленности с повышением требований к ресурсу, износостойкости, хладостойкости несущих элементов и узлов. ИМАШ был включен в государственные программы создания техники северного исполнения, атомных реакторов на тепловых нейтронах для стационарных энергетических установок, для атомных подводных лодок и надводных ледоколов. В эти годы были проведены исследования и разработаны рекомендации по оценке живучести уникальных турбогенераторов мощностью до 1200 МВт, технологических прессов и испытательных установок с усилиями 8÷75 тыс. тонн, магистральных нефтегазопроводов с диаметрами до 1200÷1400 мм и давлениями до 80÷100 атм.

В последние десятилетия прошлого века в исследованиях ИМАШ важное место занимали работы по атомным реакторам на быстрых нейтронах, термоядерным установкам импульсного типа и с магнитным удержанием плазмы. Наиболее сложными и значимыми были работы по многоразовым космическим системам («Энергия-Буран»), по ракетным двигателям на водородном топливе.

После распада СССР резко сократилась интенсивность промышленного развития в стране, включая

практически все отрасли машиностроения. Это привело к резкому снижению востребованности науки в целом и машиноведения в частности. Это сказалось на уровне технологической независимости и национальной безопасности страны.

В канун первого десятилетия в принципиально новых условиях государством были поставлены проблемы развития теории безопасности, рисков и повышения защищенности человека, общества, государства, техносферы и природной среды от аварийных и катастрофических ситуаций. ИМАШ стал инициатором и научным руководителем государственных целевых программ и проектов в этом направлении.

В настоящее время сюда входят разработки новых ядерных энергоустановок для освоения дальнего космоса, техники и технологий освоения российского шельфа, сверхскоростного и тяжеловесного железнодорожного транспорта, оборонной техники новых поколений.

К ТЕОРИИ МНОГОИМПУЛЬСНЫХ ВИБРОУДАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Метрикин В.С., Никифорова И.В.

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия;
(tsii@list.ru)

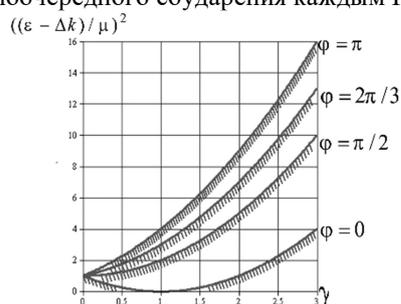
В последнее время наряду с ударно - вибрационными механизмами с дебалансным возбудителем колебаний достаточно широкое применение в машиностроении нашли эксцентриковые ударно - вибрационные механизмы (ЭУВМ) с кривошипно - ползунным возбудителем колебаний (КПВК). В основу нового конструктивного решения был положен принцип "перевернутого вибратора"[1], у которого рабочий орган, являясь дебалансом, шарнирно посажен на эксцентриковом валу и уравновешен при вращении дебалансом. Силовой импульс, передаваемый среде (грунту, сваи и т.п.), возникает как за счет распора с плечом эксцентрикового вала, так и за счет кинетической энергии падения рабочего органа. Очевидно, что плотная и вместе с тем прочная структура грунта достигается лишь в том случае, когда в процессе обработки (уплотнения) среды удельное давление на поверхности контакта рабочего органа со средой повышается постепенно. При этом частота следования импульсов в каждом одиночном цикле должна быть такой, чтобы исключить возможность развития упругого последствия обрабатываемой среды в промежутках между импульсами. Такой многоимпульсный способ нагружения может быть реализован с помощью многоударниковых ЭУВМ с КПВК, конструкция которых позволяет достаточно просто регулировать режимы работы посредством изменения геометрии кинематических связей и решать задачи уплотнения грунтов в стесненных условиях промышленного и гражданского строительства.

Рассматриваемый в работе ударно - вибрационный механизм[2] состоит из корпуса, с расположенным в нем эксцентриковым валом с маховиками на концах. На этом валу установлены эксцентриковые механизмы, каждый из которых состоит из двух эксцентриков, вставленных друг в друга с возможностью изменения положения шайб, что позволяет регулировать величины эксцентриситетов r_i и сдвигов по фазам φ_i между ними ($i = 1, 2, \dots, N$). На свободных концах шатунов установлены шарнирно поршни- ударники (ПУ). Уравнения движения механизмов при ряде ограничений могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= -p, x > f(\tau), \\ \dot{x} &= -R\dot{x} + (1+R)\frac{df(\tau)}{d\tau}, x = f(\tau). \end{aligned} \quad (1)$$

где x, τ - безразмерные координата центра масс и время соответственно, $0 \leq R \leq 1$ - коэффициент восстановления скорости при ударе, $f(\tau) = \max\{f_1(\tau), f_2(\tau), \dots, f_N(\tau)\}$ - поверхность Пуанкаре

($f_i(\tau) = \varepsilon_i - \mu\gamma_i \cos(\tau - \varphi_i)$). Фазовое пространство системы (1) в координатах x, \dot{x}, τ усечено по x , причем $x \geq f(\tau), \dot{x} < +\infty$. Все фазовые траектории располагаются либо на поверхности $S(x = f(\tau))$, либо выше ее, представляющую собой N пересекающихся поверхностей $x = f_i(\tau) (i=1, 2, \dots, N)$. Случай $x > f(\tau)$ соответствует свободному движению механизма, а $x = f(\tau)$ - ударному взаимодействию одного или нескольких ПУ с ограничителем. Используя математический аппарат метода точечных отображений поверхностей Пуанкаре, удалось создать общую методику подбора параметров механизмов, определяющих требуемый режим движения последних. Так ниже в плоскости обобщенных параметров для механизма с двумя ПУ и при различных значениях φ_i представлены границы областей существования режимов движения (заштрихованная сторона границ) с возможностью поочередного соударения каждым ПУ



Исследование сложной динамики механизмов при различном числе ПУ проведено с использованием численных экспериментов с помощью программного комплекса, разработанного в среде Borland Developer Studio 2006.

Выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект №16-19-10237)

Список литературы

1. А.с. 1020479 СССР. Вибротрамбовка / Шилков. В.А., Савалюк А.Д.,
2. Метрикин В.С., Поляков А.А., Шабардин А.К., Алехин А.И., Омененко И.Я. (СССР) - N 3376593/29-33; заявлено 05.01.1982; опубликовано 30.05.1983. Бюл. N 20.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЭЛАСТОМЕРОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ДЕМПФЕРНЫХ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ.

Минаев А.Я., Коровкин Ю.В.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия;(minaev0804@ya.ru).

Работа направлена на изучение динамических свойств новых материалов, разрабатываемых для использования в научном и промышленном оборудовании. На созданном экспериментальном оборудовании исследуются образцы материалов, предоставленных НЦ ГНИИХТЭОС. Данные материалы позволяют генерировать магнитодеформационный эффект и эффект памяти формы, что относит их к так называемым «умным или интеллектуальным материалам». Создание электропроводящих магнитоэологических эластомеров (MRE) позволяет при воздействии магнитного и электрического поля в исследуемых материалах генерировать сжатие и растяжение материала, что дает возможность использовать их в качестве активных демпферов для виброизоляции машин, а также в качестве элементов робототехники.

При проведении экспериментальных исследований на вибростендах ИМАШ было установлено, что при воздействии магнитных полей для испытуемых материалов характерно изменение динамических свойств: смещение или увод резонансных частот, более чем в два раза [1,2]. На рис. 1 показаны АЧХ режимов увода резонансных частот виброзащитного изделия. Увод резонансных частот может осуществляться в область более высоких частот: АЧХ - 2 или в область более низких частот: АЧХ - 3 относительно рабочей частоты: АЧХ - 1. Данный фактор позволяет с помощью регулировки динамических характеристик магнитоуправляемых опор защищать демпфируемое изделие от резонансных частот (Гц), появляющихся на рабочих режимах. Схема устройства демпфера для активного гашения колебаний, показана на рис. 2. Устройство содержит демпфируемое изделие, контрольные датчики, электромагниты прямой и обратной полярности, магнитоуправляемую эластичную опору. Сигналы с вибродатчиков поступают в АЦП и далее в компьютер. В компьютере происходит сравнение сигналов. После сравнительного анализа и обработки сигналов с помощью заданной программы, при превышении допустимых значений вибрации на контролируемом изделии, компьютер подает управляющий сигнал на блоки ЦАП для создания магнитных полей соответствующей силы. АЧХ демпферной опоры изменяется. Сигналы на управление электромагнитами задаются программой, заложенной в компьютер.

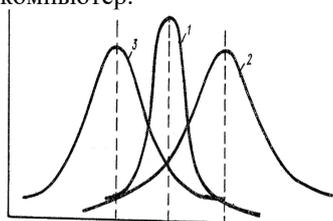


Рис. 1. Режимы увода от резонансных частот

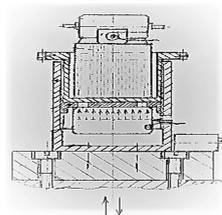


Рис. 2. Схема устройства активного демпфера

Устройство активно управляемого демпфера может быть использовано в виброзащитной и приборной технике, в нано и космических технологиях, где необходимо в автоматическом режиме контролировать и поддерживать минимальный уровень вибраций научных и технических объектов, используемых в различных областях техники. Например, в местах максимальных колебаний-пучностях 1-го, 2-го, 3-его тона изгибных колебаний крыла, фюзеляжа самолета, корпуса ракеты.

В качестве одного из примеров исследований на рис.3 показан образец испытуемого материала под действием вибрации, создаваемой дисбалансом неуравновешенного ротора электродвигателя на входе образца. Запись на компьютер передачи сигналов со входа на выход образца показана на рис.4.

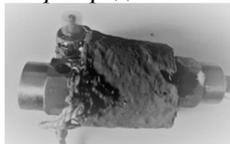


Рис. 3. Испытуемый образец с оснасткой

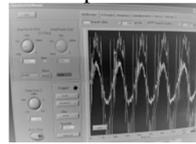


Рис. 4. Запись сигналов на входе и выходе образца

В ИМАШ ведется работа по созданию электро и магнито управляемых устройств с обратной связью с целью создания биомеханических полимерных «мышц» для использования в мягкой робототехнике.

Список литературы

1. Минаев А.Я., Коровкин Ю.В. Изучение динамических свойств магнитоактивных эластомеров и разработка демпфирующих опор // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. №1 С.10-12.
2. Yu. V. Kоровкин, A. Ya. Минаев, and G. V. Stepanov. Dynamic Properties of Magnetically Active Elastomer Composites in Laboratory Tests // Russian Engineering Research. 2014. Vol. 34, No. 5, pp. 299–302.

КРУТИЛЬНЫЕ И ОСЕВЫЕ АВТОКОЛЕБАНИЯ ПРИ СВЕРЛЕНИИ

Михеев А.В.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (alexmichdm@gmail.com).

Целью работы является анализ механизма возникновения автоколебаний при сверлении, разработка математической модели процесса сверления и вывод выражений для расчета амплитуды и частоты колебаний.

Образование стружки происходит путем последовательного сдвига тонких слоев материала. Каждый сдвиг начинается с упругопластического деформирования материала заготовки и закручивания инструмента. Накопленная деформация увеличивается, пока не достигнет деформации разрушения, что ведет к образованию трещины и падению силы резания.

Продольные и крутильные колебания описываются моделью с одной приведенной массой и моментом инерции, обладающей двумя степенями свободы – крутильной и осевой, рис.1.

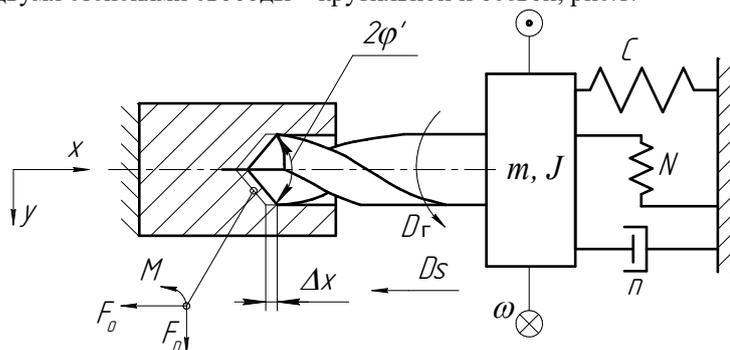


Рис 1. Одномассовая динамическая модель процесса сверления.

Деформация сверла связывает крутильные и осевые колебания. Момент резания приводит к деформации вдоль оси из-за закручивания. Осевая сила вызывает закручивание сверла. Что можно записать двумя уравнениями, связывающими продольное перемещение с осевой силой резания (1) и угловое перемещение с моментом главной силы резания (2).

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + n \frac{dx}{dt} + Cx = F_{\sigma d}(a, t) = \frac{\mu_p}{R} M(a, t) \quad (1)$$

$$J \frac{d^2\varphi}{dt^2} + N \cdot \varphi = M(a, t) \quad (2)$$

Амплитуда автоколебаний равна деформации под действием разности между силой, необходимой для пластической деформации, и силой сдвига перемычки (3). Частота автоколебаний определяется частотой вращения и углом закручивания сверла под действием максимального момента силы резания (4).

$$\varphi = \frac{ML}{JG} \quad (3)$$

$$f = 0.33 \frac{\pi D^4 n G}{M \cdot L} = 0.66 \frac{\pi D^3 n G}{P_{пл} \cdot L} \quad (4)$$

Модель процесса сверления позволяет произвести оценку устойчивости резания. Информация о параметрах колебаний может быть использована для выбора оптимального режима обработки.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТРУКТУРИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ «ПОДЛОЖКА-ПОКРЫТИЕ» В ПРОЦЕССЕ ОДНООСНОГО СЖАТИЯ

Морозов О.И.¹, Кокорин В.Н.¹, Сагитов Д.И.²

¹ФГБОУ ВО Ульяновский государственный технический университет, Россия, г. Ульяновск;
(olmogozov-rabota@yandex.ru);

²ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева», Россия, г. Ульяновск;

На современном этапе научно-технического прогресса востребованы наукоемкие технологии, позволяющие повысить прочность, вязкость и другие характеристики конструкционных материалов. Основные методы повышения стойкости штампового инструмента реализуются за счет следующих направлений поверхностной упрочняющей обработки: деформационное воздействие; термическое воздействие; поверхностное легирование; нанесение покрытий; комбинированная обработка.

В Ульяновском государственном техническом университете разработан способ повышения стойкости рабочих деталей штампов и пресс-форм на основе комплексного модифицирования, включающего в себя холодную пластическую деформацию, включающую в себя механическую активацию поверхностных слоев инструмента с последующим нанесением износостойких покрытий методом ионно-плазменного напыления [1]. Предложенная технология заключается в том, что рабочие поверхности штампов перед ионно-плазменным напылением подвергают механической активации, заключающейся в холодной пластической деформации, при которой наблюдается снижение теплопроводности штампа и, как следствие, уменьшение зоны температурного воздействия на подложку, снижение разупрочнения металла подложки и, как следствие, снижение износа рабочих частей штампа, повышение твердости системы покрытие-подложка и качества штампуемых деталей.

Для повышения эффективности процесса адсорбции в ряде публикаций зарубежных авторов предложено использовать механическую деформацию, заключающуюся в механической активации металла при реализации схемы одноосного сжатия заготовки [2]. На основании экспериментальных работ была предложена теоретическая модель, которая объединяет механическую деформацию с энергией связи между элементами рассматриваемой системы: подложка (выполняющая функции катализатора) и покрытие (выполняющая функцию реагента). Установлено, что для повышения эффективности адсорбции необходимо уменьшить энергию активации в продольном направлении кристаллической решетки (ее растяжение), что соответствует эффекту, создаваемому механической одноосной деформацией сжатия.

Разработана физическая модель структурирования системы «подложка-покрытие» (фрагмент кристаллической решетки подложки) при комплексном модифицировании (холодная пластическая деформация с последующим ионно-плазменным напылением), позволяющая иллюстрировать повышение эффективности процесса адсорбции частицами вещества покрытия (реагента) на подложку.

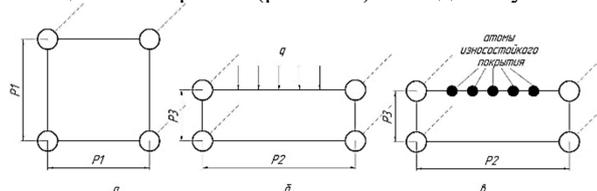


Рис. 1. Физическая модель структурирования системы «подложка-покрытие» при комплексном модифицировании поверхностного слоя:

а – исходная структура (период $P1$); б – продеформированная структура, – одноосное сжатие ($P2 > P1$, $P3 < P1$); в – модифицированная структура системы «подложка-покрытие».

Возникающее механическое напряжение увеличивает силу связи между элементами системы «подложка-покрытие», что является результатом «стягивания» атомов металла подложки при некоторой величине деформации поверхности подложки.

Результатами возможности применения технологии комплексной модификации поверхностного слоя являются: увеличение эксплуатационного ресурса стойкости и работоспособности наиболее нагруженных деталей штампов и пресс-форм (пуансоны, матрицы, знаки, вставки и др.); повышение качества изделий, изготавливаемых на инструменте с модифицированной поверхностью за счет снижения износа рабочих поверхностей штампа (повышение размерной точности, отсутствие заусенцев); снижение себестоимости продукции (интегральный критерий оценки эффективности технологии).

Список литературы

1. Повышение стойкости рабочих поверхностей деталей штампов и пресс-форм из теплостойких сталей. Морозов О.И., Табаков В.П., Кокорин В.Н., Титов Ю.А. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 11: в 3 ч. Ч1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. 64-68 с.
2. Хван А.Д., Хван Д.В., Осинцев А.Л. Повышение стойкости инструментальной стали X12M. Вестник Воронежского государственного технического университета, 2012. Т. 8. № 5. С. 131-134.

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ЧУГУНА С ШАРОВИДНЫМ ГРАФИТОМ В ЛЕДЕБУРИТНО-МАРТЕНСИТНОЙ ОБОЛОЧКЕ

Моторин В.А., Костылева Л.В., Гапич Д.С.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный аграрный университет», Волгоград; (E-mail: vmotorin001@yandex.ru).

Цель: Исследование структуры и свойств переходного слоя в отливках из чугуна ВЧШГ с глобулями графита, заключенными в оболочку ледобурита, а также в получении такой структуры в макрообъемах, позволяющих использовать ее преимущества для повышения надежности деталей машин, работающих в условиях абразивного износа, высоких контактных и динамических нагрузок.

Материалы для деталей машин, работающих в сложных условиях абразивного износа, значительных контактных давлений и ударных воздействий, должны обладать износостойкостью, высокими прочностными характеристиками и ударной вязкостью. Такой многофакторный комплекс свойств может быть обеспечен гетерофазными матричными микроструктурами в соответствии с принципом, сформулированным Ж. Шарпи.

В микроструктуре чугуна с шаровидным графитом после лазерной и ТВЧ закалки с оплавлением поверхности непосредственно к зоне, подвергавшейся полному расплавлению на стадии нагрева и имеющей по завершении термообработки структуру ледобурита, прилегает тонкий переходный слой, в котором происходило только контактное плавление на границе раздела графит – металлическая основа. Вследствие интенсивного теплоотвода на холодную массу образца расплавленный металл затвердевал с большим переохлаждением и образованием ледобурита [1,2].

В результате контактного плавления, растворения графита, интенсивно протекающего диффузионного насыщения металлической основы углеродом и последующего охлаждения с высокой скоростью вокруг графитовых включений образуются многослойные оболочки (рис. 1).

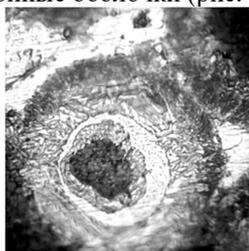


Рис. 1. Микрофотографии многослойных оболочек вокруг графитовых включений в чугуне ВЧ50, образовавшихся при лазерной (а, $\times 800$) и ТВЧ (б, $\times 800$) закалках.

Внутренний слой оболочки, полученной при лазерной закалке, представляет собой мелкоигльчатый мартенсит, затем следует слой ледобурита, за которым располагается аустенитно-мартенситный слой с более крупными иглами, далее мартенсит, троостит и остатки ферритной оболочки, которая была в исходной структуре. Основная структура металлической матрицы – троосто-мартенсит. После закалки ТВЧ оболочки вокруг графитовых включений имеют лишь два первых слоя, структура металлической основы аустенитно-мартенситная.

Общая схема объемной термической обработки для получения ледобуритной оболочки вокруг графитовых глобулей была разработана на основании анализа литературных сведений об условиях формирования таких структур в переходной зоне чугуна, закаленного лазером и ТВЧ с оплавлением, а также исходя из результатов собственных предварительных экспериментов. Микротвердость оболочек вокруг графитовых включений: ледобуритной оболочки – 9200 – 9900 МПа, мартенситно-аустенитного слоя – 6300 – 6700 МПа, троосто-мартенсита – 3300 – 3600 МПа.

Образование вокруг графитовых включений твердых оболочек в чугуне с аусферритной металлической основой почти вдвое повысило его износостойкость, сохраняя при этом высокий уровень прочности и ударной вязкости.

Формирование ледобуритных оболочек вокруг глобулей графита, во-первых, усиливает их эффективность как армирующих частиц, во-вторых, открывает возможность улучшения свойств чугуна за счет использования не только ферритной или перлитно-ферритной матрицы, но и более широкого спектра структур, включающего аусферрит, бейнит, мартенсит + аустенит.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований совместно с администрацией Волгоградской области (код проекта 18-48-342004)

Список литературы

1. Макаренко, К.В. Методы создания структурных оболочек вокруг графитовых включений в высокопрочном чугуне / К.В. Макаренко, А.А. Полторуха // Вестник Брянского государственного технического университета. 2013. № 2 (38). С. 64-68.
2. Макаров, А.В. Влияние лазерной обработки на структуру, износостойкость и усталостные свойства высокопрочного чугуна / А.В. Макаров, И.Ю. Малыгина, А.Л. Осинцева // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 4. С. 46-55.

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛОВЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ МЕТИЗНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Мышечкин А.А., Минин А.В.

Физико-технологический институт

МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия (Maleksys@rambler.ru).

Целью работы является разработка методики расчета силовых и деформационных параметров при заполнении металлом углов штампа в процессах холодной объемной штамповки метизных изделий.

Заполнение металлом углов штампов в процессах штамповки метизных изделий часто сопровождается образованием в штампуемом изделии поверхностных трещин. Возможность образования трещины зависит от напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя металла, состояния поверхности и марки штампуемого материала.

Для анализа формоизменения деформируемой заготовки и выбора модели течения металла в углы штампа на третьей стадии штамповки, когда металл заполняет углы и наиболее труднодоступные участки штампа, экспериментально исследовалось изменение угла наклона хорды, стягивающей дугу закругления металла в углу штампа.

Согласно полученным данным поверхность деформируемого металла в углу штампа стремится занять равнонаклонное положение, т.е. хорда, стягивающая дугу поверхности металла, наклонена к стенке матрицы под углом 45° , а зона интенсивного течения металла имеет крестообразную форму.

Зону наиболее интенсивного течения металла при заполнении им углов штампа предложено ограничить кривой второго порядка – гиперболой и асимптотой, выходящей из угла, являющегося началом координат. При этом считаем, что в очаге деформации имеет место плоское деформированное состояние.

На основе предложенной модели получены зависимости для определения интенсивности деформаций сдвига в очаге деформации, а также полного и относительного удельного усилия штамповки (p/σ_s) при заданной степени заполнения угла штампа (R/a_1).

Результаты расчетов относительного удельного усилия по изложенной методике приведены на рис. 1 (кривая 1). Анализ полученных результатов показывает, что они хорошо согласуются с результатами экспериментальных данных (рис. 1, кривая 2).

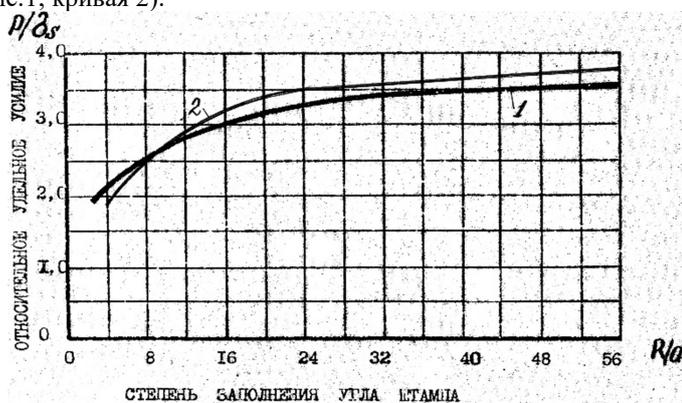


Рис. 1. Зависимость относительного удельного усилия штамповки от степени заполнения угла штампа

На основе принятой модели течения металла в углы штампа, основанной на экспериментальных данных, разработана методика расчета силовых и деформационных параметров процесса холодной объемной штамповки при заполнении металлом углов штампа с заданной точностью. Результаты расчетов хорошо сходятся с экспериментальными данными.

ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ

Назолин А.Л.^{1,2}

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (e-mail: nazolin72@mail.ru);

²ООО НТЦ «Ресурс», Москва, Россия.

Одной из основных причин повреждений турбогенераторов, определяющих их надежность и ресурс являются дефекты ослабления креплений элементов статора. Это дефекты ослабления узлов крепления сердечника в корпусе статора, обмотки в лобовых и пазовых частях статора, дефект распушения крайних пакетов активной стали. На работающем генераторе дефектные узлы представляют собой виброударные системы, возбуждающие виброакустические колебания конструкции статора, которые доходят до обшивки корпуса статора и могут быть зарегистрированы с помощью датчиков виброускорения.

Одним из эффективных методов on-line диагностики статоров является метод виброакустической диагностики, реализующий способ обнаружения, распознавания и управления развитием дефектов статора на работающем турбогенераторе, использующий зависимость мощности виброударных процессов в дефектных узлах крепления от режимных параметров работы генератора [1, 2, 3], рис. 1. Изменение режимных параметров приводит к изменениям амплитуды возбуждения и/или граничных условий закрепления ослабленных элементов статора, бифуркации виброударных режимов движения, изменению мощности виброударного процесса, вплоть до его полной блокировки.

Теоретико-экспериментальное обоснование метода построено на структурных динамических моделях дефектов статора, экспериментально определенных передаточных частотных характеристик механической подвижности конструкции статора от мест возникновения дефектов до обшивки корпуса и результатах имитационного моделирования. По результатам имитационного моделирования определены спектральные признаки дефектов, эффективные диапазоны частот их обнаружения, пороговые уровни значимости диагностических параметров.

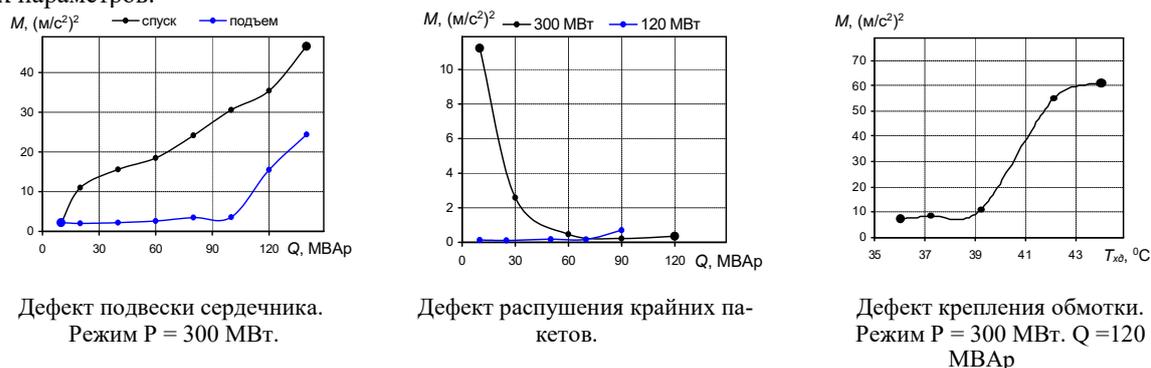


Рис. 1. Влияние режима работы турбогенератора ТВВ-320-2 на мощность виброакустического сигнала.

Виброакустические испытания более 60-ти статоров турбогенераторов серии ТВВ показали возможность эффективного управления развитием дефектов ослабления креплений посредством изменения параметров режима работы, не влияющих на выдачу активной мощности. Это подбор оптимальных значений реактивной мощности и температур охлаждающих сред в пределах установленных норм с опорой на результаты виброакустического мониторинга.

Для более полной реализации возможностей метода виброакустической диагностики статоров разработан и опробован программно-технический комплекс мониторинга дефектов статора (ПТК МоДеСт), осуществляющий непрерывный контроль за ударными процессами и интенсивностью износа элементов статора в ослабленных узлах крепления. Система позволяет вести оценку продолжительности ударных процессов и скорости развития дефектов, оценивать качество сборки и ремонтных работ.

По результатам работы предложена концепция ресурсосберегающей технологии эксплуатации турбогенераторов, заключающаяся в снижении интенсивности виброударных процессов в дефектных узлах крепления вплоть до их полной блокировки путем изменения режимных параметров работы генератора, не влияющих на выдачу активной мощности [4, 5]. Возможности метода диагностики, эффективность системы мониторинга и ресурсосберегающей технологии эксплуатации турбогенераторов подтверждены результатами работ на тепловых и атомных электростанциях.

Список литературы

1. Способ обнаружения дефектов статора на работающей электрической машине: Патент 2216841 (РФ) / А.Л. Назолин, В.И. Поляков – Заявл. 09.01.2002 // 2003. - Бюл. № 32.
2. Способ распознавания дефектов сердечника статора на работающей электрической машине с раздельным охлаждением сердечника и обмотки: Патент 2273085 (РФ) / А.Л. Назолин, В.И. Поляков – Заявл. 09.01.2002/2006. - Бюл. № 9.
3. Способ контроля технического состояния электрической машины: Патент 2304837 (РФ) / А.Л. Назолин, В.И. Поляков - Заявл. 15.07.2005//2007. - Бюл. № 23.
4. Способ снижения износа узла крепления элементов статора на работающей электрической машине: Патент 2510767 (РФ) / А.Л. Назолин, В.И. Поляков. Заявл. 28.07.2011 // 2014. Бюл. №10.
5. Назолин А.Л., Поляков В.И. Надежность электроэнергетики. Повышение живучести и продление срока службы турбогенераторов методами режимной оптимизации. Энергетик. 2013 -№10. - С.8-12.

ДИАГНОСТИКА МАШИН ПО КУРТИЛЬНЫМ КОЛЕБАНИЯМ

Назолин А.Л.^{1,2}

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Анализ причин аварий и катастроф роторных машин критически и стратегически важных объектов техно-сферы у нас в стране и за рубежом показывает, что наиболее опасным дефектом, который может привести к катастрофическим разрушениям роторной машины в целом, является дефект усталостной трещины вала и/или лопатки. Применяемые в настоящее время средства и методы эксплуатационного контроля и диагностики обнаруживают не все дефекты усталостных трещин, которые переводят техническое состояние машины из штатного в аварийные и катастрофические. Новые возможности в решении этой проблемы открывает временной метод измерения крутильных колебаний валов роторных машин.

Метод основан на измерении временных интервалов прохождения валом фиксированных угловых положений с помощью энкодеров. В процессе регистрации моментов прохождения валом фиксированных угловых положений формируется временная последовательность импульсов равной амплитуды, но различной скважности. Цепь импульсов имеет основную несущую частоту, равную произведению частоты вращения вала на число угловых приращений энкодера. Крутильная вибрация вала проявляет себя как фазовая модуляция этой несущей частоты.

В результате проведенной работы разработан алгоритм демодуляции сигнала крутильных колебаний в зависимости от времени. Применение алгоритма к данным, полученным с валопровода турбоагрегата 350 МВт, показали, что систематические ошибки углового положения меток энкодера формируют в спектре демодулированного сигнала паразитные, целочисленно кратные средней частоте вращения вала гармоники, совпадающие с гармониками вынужденных колебаний и маскирующие близко к ним расположенные собственные частоты крутильных колебаний. Устранение ошибок энкодера и периодических процессов, целочисленно кратных средней частоте вращения вала, позволяет регистрировать существенно больше собственных частот крутильных колебаний рис. 1(1) в наиболее трудных для регистрации стационарных режимах работы турбоагрегата.

Не плохой альтернативой процедуры демодуляции является измерение текущего периода вращения вала и расчет спектра вариаций периода по передискретизированным данным, рис. 1(2). В нем нет паразитных гармоник энкодера и частот вынужденных крутильных колебаний, теряется часть полезной информации о собственных частотах, расположенных около частот, целочисленно кратных средней частоте вращения вала. Вид спектра на рис. 1(2) характеризуется наличием "холмов" и нулей спектральной плотности в полном соответствии со спектральным окном преобразования в вариации текущего угла в вариации текущего периода [1]. При этом число регистрируемых собственных частот примерно в два раза меньше, чем в спектре демодулированного сигнала.

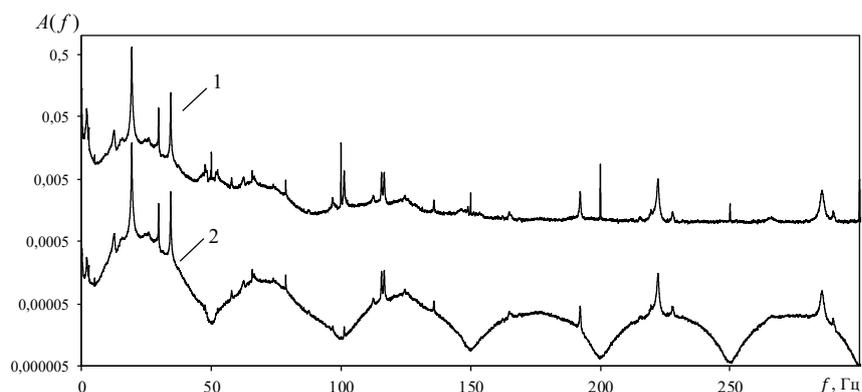


Рис. 1. Фрагмент амплитудного спектра демодулированного сигнала крутильных колебаний валопровода турбоагрегата 350 МВт (1) в угл.сек. и вариаций текущего периода вращения вала (2) в мкс.

Из проведенных исследований следует, что метод временных интервалов позволяет проводить модальный анализ валов вращающихся машин по крутильным колебаниям в процессе эксплуатации с точностью, достаточной для раннего обнаружения дефекта усталостной трещины, в том числе наиболее опасной кольцевой трещины усталости, и ослабления жесткости муфтовых соединений в различных сечениях вала [2].

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (Грант РНФ №14-19-00776-П).

Список литературы

1. Морозов А.Н., Назолин А.Л. Динамические системы с флуктуирующим временем. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 200 с.
2. Морозов А.Н., Назолин А.Л., Поляков В.И. Прецизионная оптико-электронная система мониторинга крутильных колебаний валопровода турбоагрегата // ДАН. -2017. -Т. 472. -№ 2. -С. 145-149.

ПОГРЕШНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АЧХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ УДАРНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Насонов Д.А.¹, Раевский В.А.², Леонтьев М.Ю.²

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия.

При исследовании динамических характеристик корпуса судового редуктора выявлены расхождения расчетных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и экспериментальных, полученных методом ударного возбуждения [1,2]. У авторов возникли сомнения в достоверности последних. Цель работы – анализ источников погрешностей возникающих при исследовании динамических характеристик механических систем методом ударного возбуждения.

В результате проведенных работ были выявлены основные источники погрешностей как при использовании метода конечных элементов, для расчетных АЧХ, так и при использовании метода ударного возбуждения. Проведена оценка влияния различных факторов на погрешность и достоверность получаемых результатов. Ниже приводятся результаты анализа влияния демпфирования и длительности выборки сигнала на точность получаемых характеристик. Отмечено, что влияние первого из указанных факторов может быть скомпенсировано расчетным путем, если величина демпфирования известна и не значительна (коэффициент механических потерь менее 0.005).

Для анализа влияния второго фактора исследовались АЧХ, построенные для эталонных сигналов, представляющих собой гармонические колебания заданной частоты длительностью от n до $n+1$ периодов с заданным шагом.

Показано, что для получения достаточной (условно) точности необходимо $2.2 \div 3n$ точек дискретизации сигнала, где n – число периодов колебаний сигнала. Дальнейшее увеличение числа точек практически не влияет на точность. На рисунке 1 продемонстрировано влияние демпфирования и длительности выборки исходного сигнала на точность получаемой АЧХ. По оси абсцисс отмечается длительность оцифрованного сигнала, выраженная в числе его периодов. По оси ординат – максимальная амплитуда колебаний полученного спектра в относительных величинах, где за единицу принята амплитуда исходного сигнала. Приведены зависимости для двух значений коэффициента механических потерь γ .

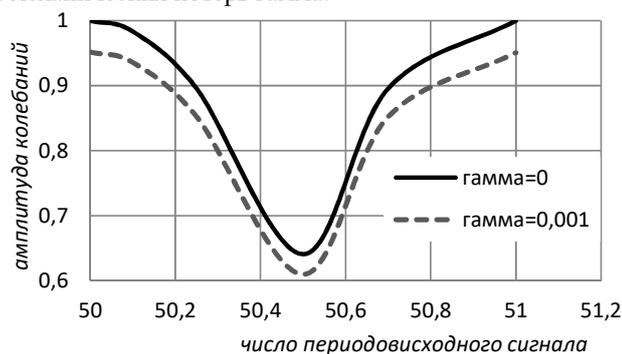


Рис. 1. Влияние демпфирования и длительности сигнала на точность расчета.

Из проведенных исследований следует, что вычисленная амплитуда спектральных составляющих сигнала может оказаться существенно заниженной по отношению к реальной амплитуде в зависимости от выбранного времени анализируемого сигнала и степени демпфирования исследуемой системы.

Список литературы

1. Насонов Д.А., Леонтьев М.Ю., Бедный И.А. О конечноэлементном расчете динамических характеристик корпусных конструкций // Научно-технические технологии в приборостроении и машиностроении и развитие инновационной деятельности в ВУЗе. Всероссийская научно-техническая конференция. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. Т.2. С. 114-115.
2. Пайчадзе Б.Б., Леонтьев М.Ю., Кириухин А.В., Косарев О.И., Бедный И.А. Опыт определения динамических характеристик судового редуктора // Научно-техническая библиотека АО Концерн «Моринформсистема-АГАТ», АО «Акустический институт академика Н.Н. Андреева»
3. Электронный ресурс, URL: <http://library.akin.ru/Rao/sess27/%D0%BF%D0%B0%D0%B9%D1%87%D0%B0%D0%B4%D0%B7%D0%B5.pdf>.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ДВУХ ЦИЛИНДРОВ В ПРЕДЕЛАХ ПЯТНА КОНТАКТА ПРИ ПЕРЕКОСЕ

Нахатакян Ф.Г.¹, Мамонова М.Г.¹, Пузакина А.К.¹, Нахатакян Д.Ф.²

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

²Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

При расчете нагруженности машин и механизмов, содержащих зубчатые передачи и роликовые опоры, возникает задача о контакте цилиндров с непараллельными осями, обусловленного как погрешностями изготовления и монтажа элементов, так и их упругими деформациями [1]. При этом актуален как вопрос об определении коэффициента концентрации изгибных напряжений зубьев вследствие перекоса [2], так и вопрос о распределении нагрузки в пределах площадки контакта [3] (рис.1).

Цель настоящей работы – определение геометрических параметров площадки контакта и распределение по ней контактных напряжений при взаимодействии упругих тел в условиях перекоса. Для решения задачи был использован метод, предложенный в работе [4], (упругое взаимодействие упругих тел конечных размеров на линейном контакте и цилиндров подробно рассмотрены в работах [5,6]).

Задача решена аналитически, и получены параметры контакта: определено распределение контактных напряжений в пределах площадки контакта при перекосе; закон его распределения по длине и ширине площадки контакта; определена также форма пятна контакта, его размеры- максимальная длина и ширина площадки.

Пространственная картина распределения напряжений по площадке контакта в безразмерном виде и размеры последней показаны на рис.2. Здесь очевидно, что распределение напряжений поперек оси цилиндра эллиптическое [7], т.е. $\bar{\sigma} = \sqrt{1 - \bar{y}^2}$, где безразмерное напряжение и координата поперек площадки контакта соответственно определяются $\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_{\max}}$ и $\bar{y} = \frac{y}{b_{\max}}$.

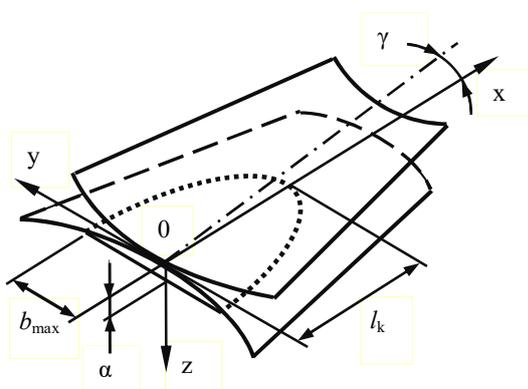


Рис.1. Пятно контакта у цилиндрических поверхностей при силовом взаимодействии в условиях перекоса

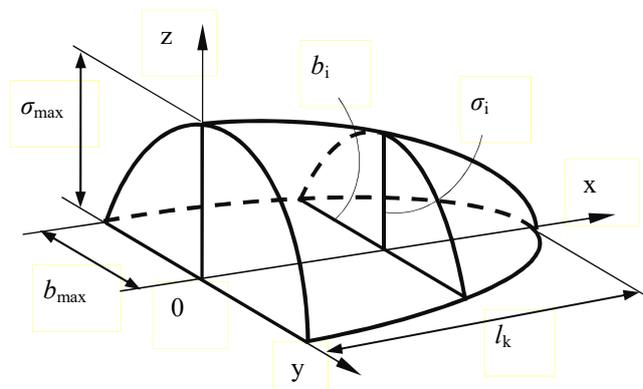


Рис.2. Распределение контактных напряжений по площадке пятна контакта

Список литературы

1. Айрапетов Э.Л., Нахатакян Ф.Г. Влияние изгибной деформации зубьев прямоугольных цилиндрических передач на параметры контакта зубьев. Вестник машиностроения, 1990, № 8, с.21-23.
2. Нахатакян Ф.Г., Косарев О.И., Леонтьев М.Ю., Пузакина А.К. Расчетное определение коэффициента изгибных напряжений на зубьях зубчатых колес при перекосе // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2010, № 2, с. 61- 69.
3. Нахатакян Ф.Г. Напряженно-деформированное состояние упругих элементов зубчатых механизмов и сооружений при их линейном и кромочном контакте. // Диссертация докт. техн. наук. М: ИМАШ РАН, 2014, 212с.
4. Нахатакян Ф.Г. Контактное взаимодействие цилиндров при наличии перекоса // Проблемы машиностроения и автоматизации, 2012. № 4. С. 91- 93.
5. Нахатакян Ф.Г. , Косарев О.И. Сближение упругих тел в контактной задаче Герца. // Проблемы машиностроения и автоматизации, 2010. № 1, с. 102- 106.
6. Нахатакян Ф.Г., Нахатакян Д.Ф. Расчетный метод определения суммарной контактной деформации упругих тел конечных размеров на линейном контакте // Приводы и компоненты машин. 2016. № 1-2. С. 17-20.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика, т.8. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 246 с.

РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ РОЛИКОВЫХ ПОДШИПНИКОВ ПРИ НАЛИЧИИ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА

Нахатакян Ф.Г.¹, Нахатакян Д.Ф.²

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

²Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

Величина зазора в подшипниках качения, как показали результаты исследований и опыт эксплуатации, оказывает большое влияние на их износ и работоспособность [1]. Недостаточный радиальный зазор ведет к тому, что при каждом совпадении максимальных овальностей колец и тел качения происходит их жесткое заклинивание и резкое увеличение местных деформаций. Большой зазор исключает возможность защемления, но увеличивает напряжение в зоне максимального нагружения и ухудшает динамику подшипника, что также снижает его работоспособность.

Поэтому, при расчете нагруженности и прочности опор качения необходимы сведения максимальной нагрузки на одном из ее элементов и жесткость подшипника, а также распределение нагрузки по телам качения [2, 3]. Для решения задачи достаточно рассмотреть два характерных случая расположения тел качения относительно линии действия внешней радиальной нагрузки на подшипник - когда внешняя сила проходит по центру максимально нагруженного ролика, и когда она проходит между двумя максимально нагруженными роликами. Очевидно, что жесткость подшипников этих схем разные, и этот факт является источником, в том числе колебаний в роторных системах. Поэтому определение параметров нагруженности подшипника является весьма актуальной задачей.

Точное решение задачи сводится к системе двух уравнений - совместности деформаций, зазоров и перемещений, и уравнения равновесия. Проблема заключается в том, что неизвестные параметры - количество воспринимающих нагрузку роликов, распределение внешней нагрузки по телам качения и смещение колец входят в исходные уравнения в неявном виде.

С использованием предложенного метода задача решена аналитически, получены параметры нагруженности подшипника. На рис.1 показаны зависимости относительных величин: максимальной нагрузки на ролик; жесткости и перемещения от радиального зазора при $F_r, \delta = 0,03261$, мм и $Z = 18$, где F_r - внешняя радиальная сила, δ - податливость системы с одним (рис.2) элементом [4], Z - количество роликов в подшипнике.

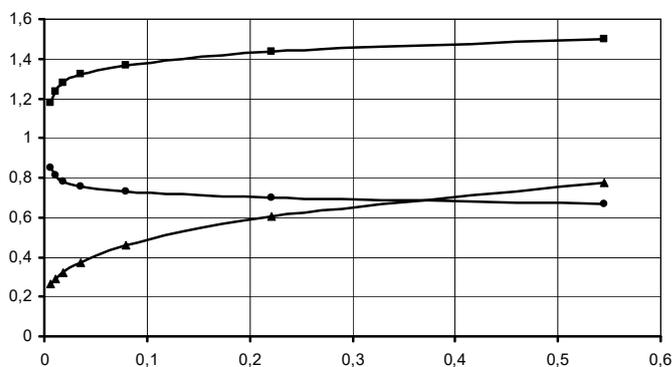


Рис.1. Зависимости относительных величин: максимальной нагрузки на ролик (\bar{P}_r - ▲); жесткости (\bar{C} - ●) подшипника и перемещения ($\bar{\alpha}_r$ - ■) от радиального зазора e , мм

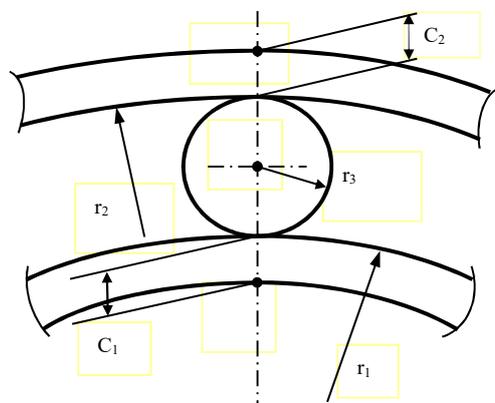


Рис.2 Ролик между кольцами подшипника

Список литературы

1. Пальмгрен А. Шариковые и роликовые подшипники. М.: Машиностроение, 1969, 632 с.
2. Орлов А.В. Влияние износа на работоспособность подшипников опор качения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 5. С. 71-79.
3. Нахатакян Ф.Г. Напряженно-деформированное состояние упругих элементов зубчатых механизмов и сооружений при их линейном и кромочном контакте. //Дисс... докт. техн. наук. М: ИМАШ РАН, 2014.
4. Нахатакян Ф.Г. Расчетное определение упругой податливости роликовых подшипников на основе теории Герца. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 1. с. 28- 32.

К РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЖЕННОСТИ КОСОЗУБЫХ ПЕРЕДАЧ В УСЛОВИЯХ ПЕРЕКОСА

Нахатакян Ф.Г.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

Нагрузка в зубчатом зацеплении распределяется равномерно по ширине зубчатого венца только в прямозубых передачах при идеально точном изготовлении и при абсолютно жестких валах и опорах [1]. В действительности, вследствие упругих деформаций валов, упругих смещений и износа подшипников, а также погрешностей изготовления и монтажа, сопряженные зубчатые колеса перекашиваются одно относительно другого, и вместо идеального имеет место кромочный контакт.

При таком контакте зубьев вследствие неполного прилегания, коэффициент угла перекоса K_γ (коэффициент концентрации контактных деформаций [2]) для прямозубых колес определяется из решения задачи о контакте двух цилиндров в условиях перекоса γ_T [3]. При этом важно отметить, что при определении контактных и изгибных напряжений учитывается также деформативный угол γ_d [4]

$$\gamma_d / \gamma_T = 0,506 \beta_0^{0,11} (1/\chi)^{0,296},$$

где β_0 - безразмерный параметр длины зуба-балки на упругом основании [5]; χ - нагрузочный параметр [4].

Для учета особенности деформации зубьев с углом наклона β косозубых передач в условиях перекоса, сначала определяем деформации и напряжения прямозубого колеса, при наличии перекоса между боковыми поверхностями зубьев. Далее, для рассматриваемого косозубого колеса находим параметры эквивалентного прямозубого колеса [6] и с помощью полученных зависимостей определяем параметры контакта косозубого колеса.

В результате исследования получены формулы для определения напряженно-деформированного состояния косозубых передач при перекосе: максимальная контактная деформация в зацеплении α_v ; коэффициенты концентрации контактных и изгибных напряжений - $K_{\sigma H}$ и $K_{\sigma F}$, а также длина пятна контакта l_k .

Для подтверждения полученных зависимостей, на рис. 1 приведены результаты сопоставления расчетных (линия) и экспериментальных [7] данных (точки) зависимостей в безразмерном виде - длины пятна контакта от нагрузки. Удовлетворительное соответствие данных говорит о правильности предложенного метода.

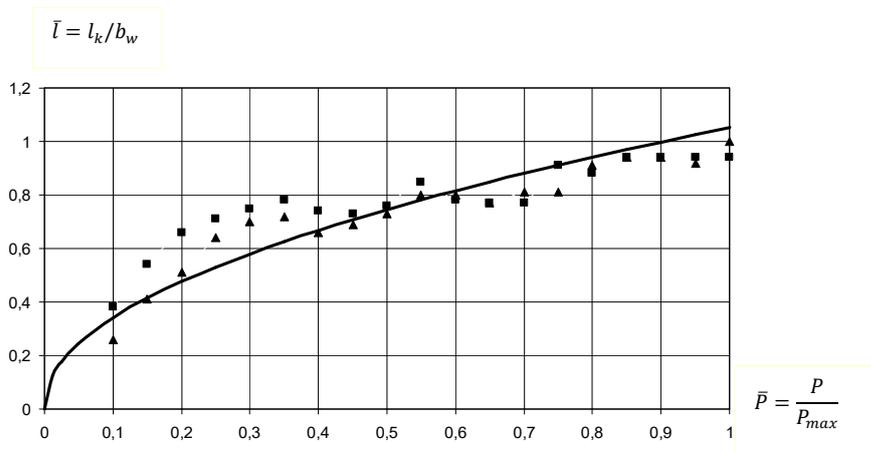


Рис. 1. Сопоставление расчетных (линия) и экспериментальных (точки) зависимостей длины пятна контакта от нагрузки в безразмерном виде; ■ - правый п/шеvron; ▲ - левый п/шеvron.

Список литературы

1. Решетов Д.Н. Детали машин. М.: Машиностроение, 1989. 496 с.
2. Айрапетов Э.Л., Нахатакян Ф.Г. Влияние изгибной деформации зубьев прямозубых цилиндрических передач на параметры контакта зубьев. Вестник машиностроения, 1990, № 8, с.21-23.
3. Нахатакян Ф.Г. Контактные напряжения и деформации цилиндров при наличии перекоса // Вестник машиностроения. 2011. № 10. с. 45- 48.
4. Нахатакян Ф.Г. Напряженно-деформированное состояние упругих элементов зубчатых механизмов и сооружений при их линейном и кромочном контакте. Диссертация ... доктора технических наук. ИМАШ РАН, М. 2014.
5. Айрапетов Э.Л., Генкин М.Д., Ряснов Ю.А. Статика зубчатых передач. М.: Наука, 1983. 142 с.
6. Иосилевич Г.Б., Лебедев П.А., Стреляев В.С. Прикладная механика. М.: Машиностроение, 1985. 576 с.
7. Айрапетов Э.Л., Генкин М.Д. Статика планетарных механизмов. М.: Наука, 1976, 263 с.

МОБИЛЬНЫЙ РОБОТ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

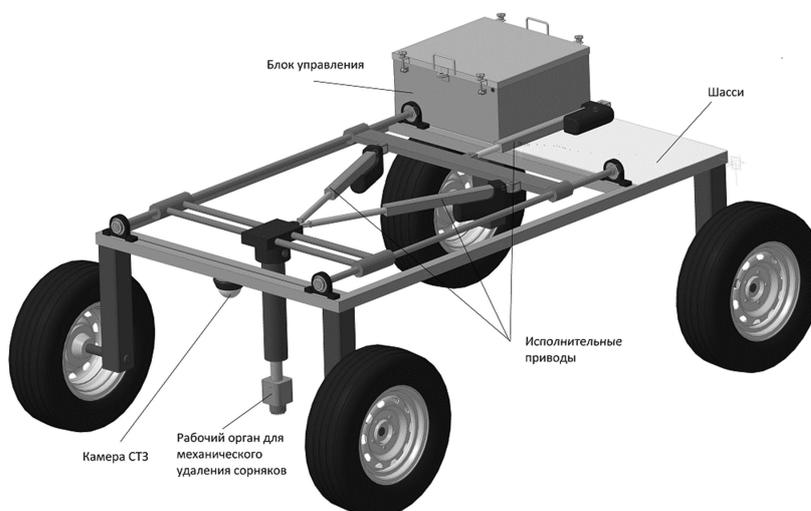
Несмиянов И.А., Воробьева Н.С., Бочарников В.С., Иванов А.Г.

Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград, Россия; (ivan_nesmiyanov@mail.ru)

Эффективность механической борьбы с сорняками во многом зависит от качества проведенных работ по прополке. Следует отметить, что при возделывании овощей в закрытом грунте (в теплицах) в подавляющем большинстве используется ручной труд. Ручная прополка до сих пор практикуется и при возделывании овощных и бахчевых культур на открытом грунте. Это обосновано еще и тем, что при механическом уничтожении сорняков рабочие органы культиватора (лапы) обрабатывают только междурядья. К тому же, чем больше возделываемое растение, тем больше вероятность его повреждения при сплошной культивации междурядий.

Для решения проблемы полной прополки сорняков как в междурядьях, так и в рядах разработана конструкция мобильного робота пропольщика для механического точечного удаления сорняков (рис.1). Перемещение рабочего органа пропольщика осуществляется за счет плоского механизма, представляющего сочетание механизмов параллельной и последовательной структуры, обеспечивающих три степени подвижности в плоскости поверхности поля.

Рис.1. Мобильный робот-пропольщик



Так как перемещение рабочего органа точечного воздействия на объекты происходит по заранее неизвестным, динамически формируемым траекториям, то планируется задачу формирования траекторий перемещения рабочего органа решать на основе комбинаторной оптимизации с последующей параметризацией с помощью кубических сплайнов с целью обеспечения непрерывности движения и постоянства скорости мобильной платформы робота-пропольщика. Задачу синтеза оптимальных законов перемещением рабочего органа манипулятора, предполагается решать из условия комплексного критерия качества с учетом динамических свойств исполнительных механизмов и электроприводов [1, 2, 3, 4].

Применение разработанных методов расчета и проектирования позволит обоснованно выбирать конструктивные параметры манипуляторов на этапе проектирования и режимы программных движений при выполнении технологических операций.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 18-41-342002 р_мк).

Список литературы

1. V. Zhoga. Walking Mobile Robot with Manipulator-Tripod / V. Zhoga, A. Gavrilov, V. Gerasun, I. Nesmiyanov, V. Pavlovsky, V. Skakunov, V. Bogatyrev, D. Golubev, V. Dyashkin-Titov, N. Vorob'eva // Proceedings of Romansy 2014 XX CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators.- Series: Mechanisms and Machine Science.- Springer International Publishing Switzerland, 2014, Vol. 22, pp. 463-471.
2. I. Nesmiyanov. Synthesis of Control Algorithm and Computer Simulation of Robotic Manipulator-Tripod / I. Nesmiyanov, V. Zhoga, V. Skakunov, S. Terekhov, V. Egunov, N. Vorob'eva, V. Dyashkin-Titov, Fares Ali Hussein Al-hadsha // Communications in Computer and Information Science.- Springer International Publishing Switzerland 2015: CIT&DS 2015, CCIS 535, pp. 392-404, 2015.
3. Dyashkin-Titov V.V., Zhoga V.V., Nesmiyanov I.A., Vorob'eva N.S. (2018) Dynamics of the Manipulator Parallel-Serial Structure. In: Evgrafov A. (eds) Advances in Mechanical Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp. 33-43.
4. Skakunov V., Belikov V., Zhoga V., Nesmiyanov I. Processing of Data from the Camera of Structured Light for Algorithms of Image Analysis in Control Systems of Mobile Robots // Advances in Mechanical Engineering: Selected Contributions from the Conference «Modern Engineering: Science and Education» (Saint Petersburg, Russia, June, 2014) / ed. by A. Evgrafov. – [Switzerland]: Springer International Publishing, 2016. – P. 149-158. – (Book Series: Lecture Notes in Mechanical Engineering).

ПОГРУЗОЧНЫЕ МАНИПУЛЯТОРЫ И РОБОТЫ НА ОСНОВЕ ТРИПОДА

Несмиянов И.А., Жога В.В., Воробьева Н.С., Дяшкин-Титов В.В.

Волгоградский государственный аграрный университет, Волгоград, Россия; (ivan_nesmiyanov@mail.ru)

Манипуляторы параллельной структуры находят применение в различных технологических процессах сортировки и упаковки продукции, при выполнении которых требуются высокие точность, скорость и ускорение рабочего органа. Одно из основных требований, определяющих работоспособность манипуляторов, является обеспечение подхода рабочего органа манипулятора к требуемым точкам объекта обслуживания с заданной ориентацией рабочего органа. В настоящее время проводятся исследования манипуляторов параллельно-последовательной структуры на основе трипода с шестью и семью степенями свободы «рис.1» [1, 2]. Механизм захватного устройства состоит из трех звеньев, последовательно соединенных друг с другом вращательными кинематическими парами пятого класса с рабочим органом (кистью).



Рис.1. Манипуляторы параллельно-последовательной структуры на основе трипода.

Для разработанных схем манипуляторов решена задача позиционирования управляемого захватного устройства с тремя степенями свободы. Аналитическое решение получено для двух вариантов конструкций захватного устройства. Результаты решения показали, что такой манипулятор характеризуется высокими показателями манипулятивности, проведена проверка реализуемости полученных решений на опытных образцах.

К наиболее важным задачам при разработке манипуляторов параллельно-последовательной структуры относится создание методов синтеза алгоритмов программных перемещений исполнительных механизмов, обеспечивающих реализацию требуемых траекторий и законов движения рабочего органа манипулятора, и позиционирование объекта манипулирования в трехмерном пространстве. В настоящее время решаются задачи кинематического и динамического синтеза программных ориентирующих перемещений исполнительных звеньев манипулятора с избыточными координатами, обеспечивающих выполнение конкретного технологического процесса с использованием оптимальных алгоритмов позиционирования рабочего органа манипуляционного захватного устройства, по минимальности критерия обобщенной энергии и минимума максимальных значений изменения длин исполнительных звеньев.

Динамический метод синтеза программных перемещений исполнительных звеньев манипулятора предлагается осуществить решением обратной задачи динамики манипулятора. Для разработки уравнений динамики манипуляционной системы предполагается использовать уравнения Лагранжа второго рода с неопределенными множителями, записанные в явной форме. Уравнения динамики записываются для каждого вида программного движения рабочего органа. На основе этих моделей синтезируются законы изменения управляющих сил и моментов.

Анализ и классификация технологических процессов показывает, что большинство операций, выполняемых манипуляторами, может быть выполнено ограниченным набором простых перемещений рабочего органа: по прямолинейной траектории, по окружности и т. п. Для этих траекторий частные производные, формирующие символы Кристоффеля первого рода, вычисляются с помощью программы символьной математики. Таким образом, формируется база динамических моделей перемещения манипулятора для частных видов движения рабочего органа. На основе этих моделей синтезируются алгоритмы управления и значения коэффициентов регулятора обратных связей в соответствии с технологическими движениями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-48-340395 p_a).

Список литературы

1. Жога, В.В. Задача позиционирования манипулятора параллельно-последовательной структуры с управляемым захватным устройством / В.В. Жога, В.В. Дяшкин-Титов, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева. // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – т. 17 - №8. – с.525-530.
2. Жога, В.В. Динамический синтез оптимальных программных движений манипулятора-трипода. / В.В. Жога, В.М. Герасун, И.А. Несмиянов, Н.С. Воробьева, В.В. Дяшкин-Титов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2015. - №2. – с.85-92.

МЕТОД ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ СТВОЛА СКВАЖИНЫ В ПРОЦЕССЕ ЦЕМЕНТИРОВАНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЗАТВОРЕНИЯ ТАМПОНАЖНОГО РАСТВОРА

Овчинников П.В.

ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», Москва, Россия; (Pavel.V.Ovchinnikov@lukoil.com)

Известный и используемый при вскрытии проницаемых пластов метод струйной кольматации предполагает прокачивание бурового раствора, т.е. создание кольматационного экрана из глинистых частиц. Образованный в этом случае кольматационный экран позволяет решать задачу снижения степени загрязненности продуктивного горизонта фильтратом бурового и тампонажного растворов и в меньшей мере решать задачу обеспечения герметичности контактной зоны «цементный камень – горная порода». Это обусловлено, в основном, отсутствием связи между твердеющими цементом камнем и глинистыми частицами.

Перспективным в этом отношении, с нашей точки зрения является способ волновой обработки, при котором формирование кольматационного экрана в приствольной части проницаемого пласта осуществляется из частиц, родственных тампонажному раствору и в последующем участвующих в структурообразовании контактной зоны» К таким материалам следует отнести кремнеземсодержащие, известь содержащие вещества и сам цемент.

Предложено при подготовке ствола скважины осуществлять формирование в приствольной части кольматационного экрана из цементных частиц путем прокачивания цементно-водной суспензии через кольматационное устройство, основанного на принципе кавитационных явлений.

При прокачивании через него раствора с определенной скоростью в зависимости от глубины (на глубине 500 м – 90-95 м/с; 3000 м – 240-255 м/с) в потоке формируются кавитационные волновые процессы, которые вызывают кольматацию участка и диспергирование цементных частиц. Указанные процессы способствуют повышению изоляционных свойств формирующегося цементного камня за счет снижения водоотделения, повышения удельной поверхности цементных частиц, ускорения сроков схватывания, повышения степени сцепления цементного камня с горной породой.

В предлагаемом способе в качестве цементного раствора для обработки стенок скважины применяют цементно-водную суспензию.

Границы состава суспензии выбираются из условия недопущения преждевременного загустевания и обеспечения содержания твердой фазы достаточного для снижения проницаемости приствольной части скважины. Водотвердое отношение цементно-водной суспензии, исходя из изложенного, должно составлять 10-15. Это позволяет с запасом времени осуществить спуск обсадной колонны и качественно закольматировать приствольный участок. Для предупреждения седиментационного расслаивания допускается введение полимерных добавок.

Технология работ в этом случае предполагает осуществление процесса кольматации как в процессе бурения, так и непосредственно при цементировании. В этом случае после завершения бурения под обсадную колонну, в компоновку бурильного инструмента над долотом включается устройство, генерирующее кавитационные колебания. Производится спуск инструмента до предполагаемого объекта обработки, подсоединяется ведущая труба, включаются насосы и осуществляется обработка ствола скважины на длину ведущей трубы, заранее приготовленной цементно-водной суспензией. Далее наращивается инструмент, и аналогично прорабатываются следующие интервалы. Объем цементно-водной суспензии принимается равным 2-3 объемам прорабатываемого интервала. После проработки осуществляется спуск обсадной колонны и ее цементирование. Во втором случае гидровихревая насадка встраивается в тело башмака обсадной колонны.

Использование предлагаемого способа цементирования скважины обеспечивает, по сравнению с существующими способами, следующие преимущества:

- снижение проницаемости приствольной части скважины;
- повышение прочности породы к гидродинамическому разрыву, что позволяет осуществить подъем цемента на необходимую высоту, уменьшить интенсивность процесса водоотделения из цементного раствора, а, следовательно, повысить качество тампонажного камня;
- отсутствие глинистой корки на стенках скважины и средство тампонажного цемента с материалом, заполняющим поровое пространство пород, и, тем самым, обеспечивая высокую степень сцепления тампонажного камня с горной породой.

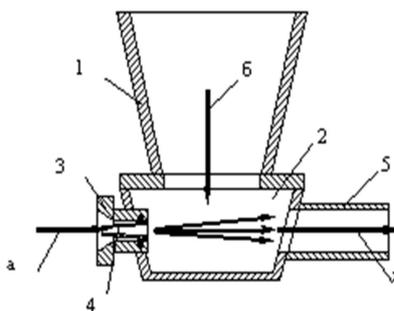
Анализ существующих технологий приготовления цементных растворов показывает необходимость использования технологической схемы, при которой не только исключались бы потери раствора из приемного танка (использование "закрытой" схемы обвязки тампонажной техники), но и обеспечивалось бы рациональное использование специальной тампонажной техники (то есть сокращение количества насосных установок при выполнении одной операции за счет максимально эффективного использования тампонажной спецтехники).

С учетом этого предложена новая конструкция приемной емкости смешения цементной смеси с жидко-

стью затворения. Она представляет из себя гидросмесительную воронку. В нижней части корпуса воронки приварен узел со специальной насадкой необходимого диаметра. В воронку одновременно подают тампонажную смесь с помощью разгрузочных шнеков серийно выпускаемых цементно-смесительных установок и жидкость затворения цементировочным насосом через насадку. За счет высокого давления, создаваемого цементировочным насосом, создаваемого им скоростного напора и эжекционного эффекта жидкость затворения интенсивно смешивается с цементом и получаемый при этом раствор выбрасывается по напорному трубопроводу в резервуар осреднительной установки, где он дополнительно перемешивается мешалками, при этом исключается потери раствора, и обеспечивается высокая производительность при приготовлении (возможна подача цемента шнеками на 3-4 передаче со скоростью более 1т/мин).

Этот метод является применимым как для приготовления облегченных, утяжеленных, так и цементных растворов нормальной плотности. Высокая эффективность работы гидросмесительных установок достигнута и при приготовлении полимерцементных растворов.

Схема конструкции смесительного устройства представлена на рис. 1.



*Рис. 1. Схема смесительного устройства для приготовления цементных растворов
1- корпус; 2 - смесительная камера; 3 - гнездо штуцера; 4 - штуцер; 5 - отводной ствол;
Направления потоков: а - подача жидкости затворения; б - подача цемента непосредственно из разгрузочного люка СМН-20;
в - отвод цементного раствора в осреднительную емкость.*

Предлагаемая технология затворения позволяет готовить растворы из многокомпонентных вяжущих непосредственно в момент цементирования, что значительно сокращает затраты времени на цементирование; готовить растворы с различным соотношением вяжущего материала и наполнителя, регулируя скорость разгрузки бункеров; сократить время затворения; добиваться стабильных физико-механических свойств раствора; исключить переливы раствора в окружающую территорию, улучшить экологическую обстановку в районе ведения работ.

Возможен вариант монтажа в смесительном устройстве вместо штуцера (долотной насадки) волнового прямооточного генератора или волнового генератора с телами обтекания. В этом случае представленная схема затворения позволит не только повысить качество смешения многокомпонентных тампонажных растворов, но и значительно повысить физико-механические характеристики формирующегося тампонажного камня (прочность, герметичность).

В докладе приводятся некоторые результаты испытаний предлагаемой технологии затворения тампонажных растворов различного назначения.

Таким образом, обеспечивается герметичность заколонного пространства, как по цементному камню, так и по контакту «цементный камень – горная порода», исключаются потери продукта и межпластовые перетоки, что способствует охране окружающей среды и недр.

МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНЫМ РЕЖИМОМ В УСТАНОВКАХ С ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

Панин С.С., Брызгалов Е.А., Довбненко М.С.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия

Одна из основных идей волнового перемешивания основывается на возможности организации сложных квазиоднонаправленных течений жидкой среды за счет взаимодействия ее с твердыми телами (рабочими органами смесителя), погруженными в перемешиваемую среду и совершающими колебания относительно нее. Иными словами, возможна организация переноса массы перемешиваемого состава по всему объему за счет исключительно колебательного воздействия. При этом данный способ организации течения позволяет реализовывать в одном объеме сложные разнонаправленные течения (вплоть до встречных) со значительным относительным сдвигом жидкой среды, отсутствием застойных зон и распространением в объеме сдвиговых волн. Такой режим движения среды позволяет обеспечить интенсивное перемешивание в сочетании с волновым воздействием, которое, в свою очередь, позволяет добиваться качественно новых результатов, связанных с изменением физических и реологических свойств перемешиваемой среды. В данной работе ставится эксперимент по возможности реализации системы управления резонансным режимом волнового смесителя с применением технологии нейронных сетей, основанного на электродинамическом возбуждении. Проводится исследование возможности применения подобной технологии в качестве системы контроля режимов работы установки для повышения качества перемешивания [1-3].

Существуют стандартные подходы к построению систем управления. Они являются достаточно общими и применимыми в большинстве случаев. Одним из таких подходов является построение систем управления на различного типа регуляторах, самым популярным из которых является PID (пропорционально-интегрально-дифференциальный) регулятор. Общая теория построения известна и доступна. Подобный подход теоретически применим и в случае управления колебательной системой, но на практике были выявлены ситуации, когда система теряет стабильность [4]. Следует отметить, что задача управления не сводится только к поддержанию заданной амплитуды, она так же распространяется и на удержание резонансного режима, т. к. работа именно в нем снижает энергозатраты на эксплуатацию установки. При малых заданиях амплитуды система может поддерживать ее, не находясь при этом на резонансе. Изменения параметров вязкости и присоединенной массы влияют на собственную частоту. Такие изменения очень сложно предсказать и учесть в математической модели в силу их стохастической природы. Для решения данной проблемы был поставлен эксперимент с внедрением в управляющий контур системы классификатора режимов работы.

Для построения классификатора была применена трехслойная нейронная сеть прямого распространения. На рисунке 1 представлены значения пары нормированных амплитуда-фаза для различных режимов работы.

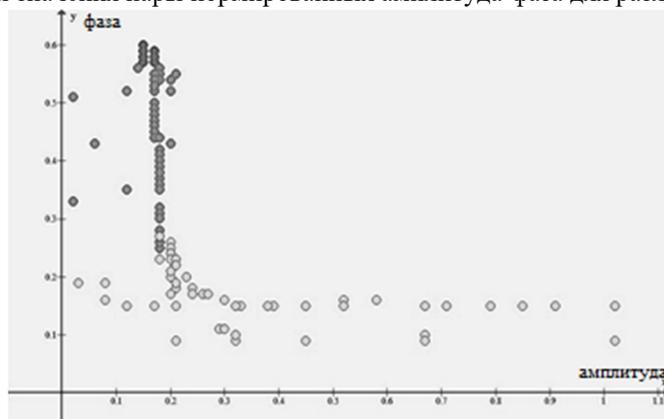


Рис. 1. Отображение обучающих данных (фаза-амплитуда) на плоскости.

Для тестирования полученной системы была искусственно смоделирована ситуация с резкой загрузкой рабочей области. В этом случае происходит резкий спад амплитуды и соответствующий уход с резонансного режима работы. На рисунке 2 спады соответствуют моменту загрузки вязкой среды.



Рис. 2. Результаты испытания системы управления с классификатором (нижняя линия) и без (верхняя линия).

В связи с тем, что невозможно однозначно воспроизвести процесс загрузки для проверки обоих случаев, величины спадов могут отличаться. Видно, что в работе без системы классификации возврат на нормальный режим занимает больше времени. Делая выводы, можно сказать, что полученная система является перспективной, но требует доработок и более детальной формализации задачи. В процессе испытаний помимо положительных результатов, также были получены режимы, при которых нарушалась стабильность работы.

Список литературы

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. Волновые и колебательные явления в основе волновых технологий. – Изд. 2-е, дополн. – Москва: Институт компьютерных исследований; Научно-исследовательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. – 780с.
2. Панин С.С. Разработка волнового смесителя для перемешивания высоковязких неньютоновских жидкостей. – «Проблемы машиностроения и надежности машин», Москва: Наука, 2012, №2, с.61-70.
3. Панин С.С., Брызгалов Е.А., Курмиев Д.В., Яковенко Н.И. Исследование воздействия волновых воздействий на процессы измельчения твердых сыпучих сред. – Международная конференция «Колебания и волны в механических системах». Материалы конференции. Москва. 27-29 ноября 2012г., с.34.
4. Компьютерное моделирование процессов управления аппаратом волнового перемешивания с электродинамическим приводом. – Международная научная конференция «Колебания и волны в механических системах». Материалы конференции. Москва. 21-23 ноября 2017г. с.39.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ СФЕРОПЛАСТИКОВ С ПРЕДЕЛЬНО МАЛЫМ КОЛИЧЕСТВОМ СВЯЗУЮЩЕГО МЕТОДОМ ВОЛНОВОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Панин С.С., Брызгалов Е.А., Яковенко Н.И.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. г. Москва. Россия

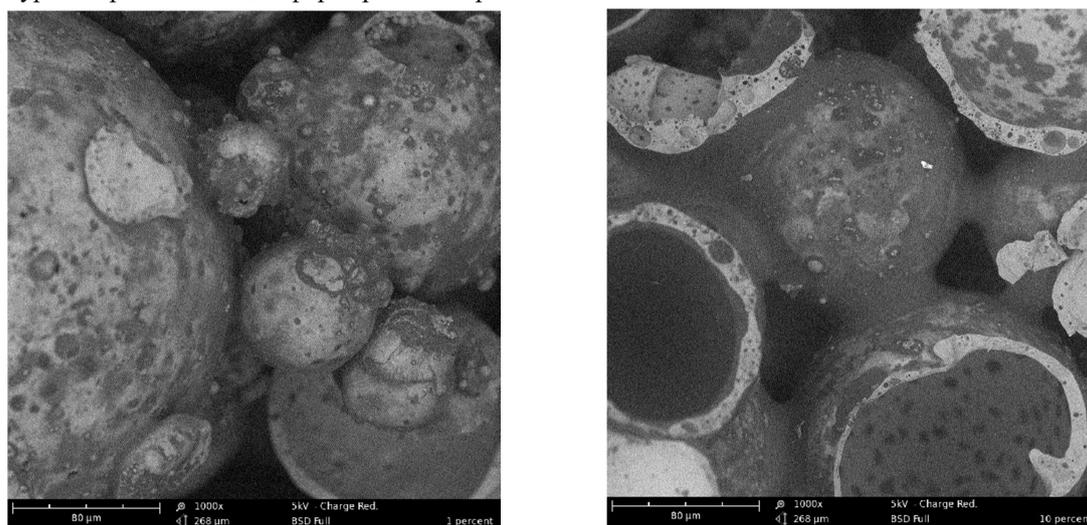
Целью работы является изучение возможностей получения сферопластиков с предельно низким содержанием эпоксидного связующего с помощью волновых методов перемешивания [1-5].

Сферопластики – композиционные материалы с низкой плотностью на основе полимерных связующих, основным наполнителем которых являются полые микросферы. Сферопластики применяются для местного упрочнения панелей сотовых конструкций с целью повышения их прочности и жесткости в зонах установки крепежа, для заделки торцевых участков, заполнения различных полостей, фиксации трубопроводов, закрепления электротехнических кабелей и т.п.

В качестве связующего использовался состав на основе эпоксидной смолы ЭД-20 (100м.ч.) с пластификатором ДЭГ-1 (9,5м.ч.) и отвердителем ИМТГФА (86м.ч.), в качестве наполнителя - микросферы алюмосиликата.

Процесс волнового перемешивания осуществлялся в замкнутом объеме лабораторного волнового смесителя СВ-3, представляющего из себя волновой аппарат, принцип действия которого состоит в возбуждении в обрабатываемой среде эффектов волнового массопереноса за счет колеблющегося рабочего органа [5] при температуре 60°C. Отверждение образцов осуществлялось в печи при атмосферном давлении.

В ходе проведения исследований получен ряд образцов, с различным содержанием связующего (от 1% до 10% по насыпному объему наполнителя), отличающихся по плотности. Образцы с содержанием смолы 1% и 10% показаны на рис. 1а,б. Образцы с содержанием связующего менее 1% не обладали достаточной структурной прочностью для формирования проб.



а) 1% связующего

б) 10% связующего

Рис. 1.

Из представленных микрофотографий видно, что одного процента связующего недостаточно для полного покрытия поверхности микросфер в отличие от 10%-го образца, где связующее уже практически полностью обволакивает микросферы алюмосиликата. Несмотря на это, волновое перемешивание обеспечило равномерное по объему распределение связующего, которое, как предполагается, при участии капиллярных сил, позволило связать все частицы наполнителя множеством мостиков связующего.

Проведены испытания предела прочности на сжатие и влагопоглощения спустя 2-е суток нахождения в воде для кубиков проб с размерами 2х2х2 см. Результаты испытаний представлены в таблице 1:

Содержание смолы, %	1	2	5	10
Средняя плотность, г/см ³	0.403	0.427	0.459	0.507
Влагопоглощение, %	34.98	11.47	5	3.43
Предел прочности, МПа	3.4	5.1	7.5	9.3

Таблица 1

Если сравнивать полученные показатели со строительными ячеистыми бетонами то при плотности 0,4–0,5 г/см³, соответствующей газо- и пенобетонам марок D400 и D500, прочность полученных образцов сферопластиков находится в пределах 3÷9 МПа, что соответствует нормам ГОСТ 21520–89 уже для марок ячеистых бетонов D900 и D1200. По влагопоглощению, согласно ГОСТ 23732–79, только образец с содержанием смолы 1% и по плотности соответствующий марке D400, может быть сравним с пенобетоном марки D600. Остальные образцы находятся вне сравнительного диапазона из-за значительно меньшего процента влагопоглощения.

По результатам проведенных исследований можно говорить о высокой эффективности применения волнового метода перемешивания при получении сферопластиков с предельно низким содержанием связующего. Следует отметить, что данные эксперименты представляют собой первые пробные результаты. Дальнейшие исследования в определении оптимальных композиций и режимов волновых воздействий в перспективе дополнительно позволят повысить потребительские характеристики получаемых волновыми методами сферопластиков. Отдельно следует упомянуть потенциальную возможность получения подобных композиций в непрерывном (поточном) режиме.

Список литературы

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. Волновые и колебательные явления в основе волновых технологий. – Изд. 2-е, дополн. – Москва: Институт компьютерных исследований; Научно-исследовательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. – 780с.
2. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Сухарев Т.Ю., Украинский Л.Е. Волновое перемешивание в установках колебательного типа // проблемы машиностроения и надежности машин, 2017, №3, с 5-10.
3. Панин С.С., Брызгалов Е.А., Курменев Д.В., Яковенко Н.И. Волновые технологии создания композиционных материалов на примере получения стеклонаполненных пресскомпозиатов. – Международная научная конференция «Колебания и волны в механических системах», 21-23 ноября 2017г. Москва. Материалы конференции. с.53-55.
4. Панин С.С., Брызгалов Е.А., Курменев Д.В., Яковенко Н.И. Интенсификация получения высоко- и сверхвязких смесей путем применения волновых методов перемешивания. – Международная научная конференция «Колебания и волны в механических системах», 21-23 ноября 2017г. Москва. Материалы конференции. с.50-51.
5. Панин С.С. Разработка волнового смесителя для перемешивания высоковязких неньютоновских жидкостей. – «Проблемы машиностроения и надежности машин», Москва: Наука, 2012, №2, с.61-70.

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ САМОСИНХРОНИЗАЦИИ ВБЛИЗИ РЕЗОНАНСА ДВУХ ДЕБАЛАНСНЫХ ВИБРОВЗБУДИТЕЛЕЙ

Пановко Г.Я., Шохин А.Е.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия (shohinsn@mail.ru)

Задачи синхронизации нескольких дебалансных вибровозбудителей имеют важное прикладное значение в современной вибрационной технике. При этом обеспечение синхронного вращения дебалансов с заданными фазовыми соотношениями представляет собой одну из принципиальных задач при разработке вибрационных машин.

Вопросам разработки технологических вибрационных машин с самосинхронизирующимися вибровозбудителями посвящена обширная литература (см. например, обзор работ по самосинхронизации динамических систем, приведенный в [1]). Отметим, что в большинстве случаев основное внимание уделяется анализу самосинхронизации в зарезонансных режимах, как наименее чувствительных к возможной флуктуации параметров системы и технологической нагрузки. Вместе с тем, в связи с тенденцией на повышение энергоэффективности машин, все большее внимание уделяется использованию резонансных режимов колебаний, особенностью которых оказывается необходимость работать вблизи границ их устойчивости. В работах [2,3] были исследованы особенности применения систем управления для обеспечения стабильной резонансной настройки вибрационных машин в условиях переменной массы технологической нагрузки. При экспериментальной отработке алгоритмов управления было установлено, что эффективность их работы существенно зависит от синхронизации вращения дебалансов вблизи резонанса.

В настоящей работе описываются результаты экспериментального исследования эффекта самосинхронизации двух дебалансных вибровозбудителей асинхронного типа, установленных на одно-массовой и двух-массовой механических колебательных системах, возбуждаемых вблизи резонансных частот. Проанализированы амплитудно-частотные характеристики системы, а так же скорости и фазы вращения дебалансов в зависимости от частоты напряжения, питающего электродвигателя. Результаты измерения взаимного сдвига фаз дебалансов $\Delta\varphi$ в зависимости от частоты питания f_e представлены на рис. 1. Высота столбца точек на каждой частоте соответствует разбросу разности фаз за время измерения. Видно, что при приближении ко второму резонансу $\Delta\varphi$ стремится к значению вблизи 0° , однако в непосредственной близости к частоте срыва в зарезонансную область наблюдается повышение его неустойчивости и рост отклонения от 0° . Аналогичный характер поведения сдвига фаз наблюдается также вблизи других резонансных частот. Анализ изменения частоты вращения электродвигателей во времени показал, что в непосредственной близости резонансных частот возникает неустойчивость средних угловых скоростей вращения дебалансов вплоть до резкой смены типа синхронизации и формы колебаний системы при проходе через резонанс.

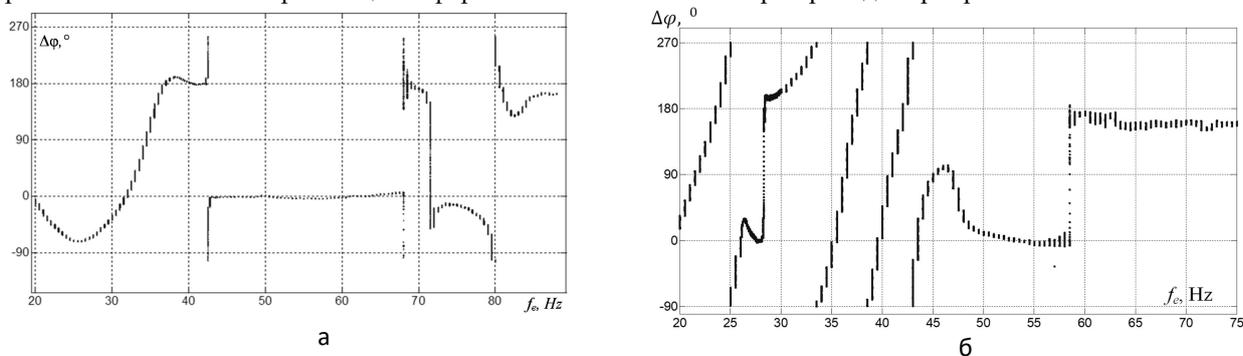


Рис. 1 Взаимный сдвиг фазы между дебалансами: а – в одно-массовой системе, б – в двух-массовой системе

Выявленные особенности самосинхронизации дебалансных вибровозбудителей необходимо учитывать при разработке резонансных вибромашин.

Работа выполнена за счет средств гранта РФФИ, проект № 18-19-00708

Список литературы

1. Blekhnman I.I. Vibrational Mechanics (Nonlinear Dynamic Effects, General Approach, Applications). World Scientific, Singapore, 2000.
2. Panovko, G.Y., Shokhin, A.E., Ereimeikin, S.A. Experimental analysis of the oscillations of a mechanical system with self-synchronized inertial vibration exciters. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, Volume 44, Issue 6, November 2015, p. 492-496.
3. Panovko G., Shokhin A., Ereimeikin S., Gorbunov A. Comparative analysis of two control algorithms of resonant oscillations of the vibration machine driven by an asynchronous AC motor. Journal of Vibroengineering, Vol.17, Issue 4, 2015, p. 1903-1911.

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО УПРУГОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КОНТАКТА С УЧЕТОМ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕКТОРА СКОРОСТИ КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Пановко М.Я.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (mpanovko@yandex.ru)

В винтовых, спиральных, гипоидных зубчатых передачах вектор средней скорости смазанных контактирующих поверхностей может занимать промежуточное положение по отношению к одной из осей эллипса контакта. Ранее этот случай рассматривался в [1-3]. Настоящая работа посвящена изучению влияния произвольного направления вектора средней скорости качения смазанных контактирующих поверхностей на параметры тяжело нагруженного эллиптического упругогидро-динамического (УГД) контакта.

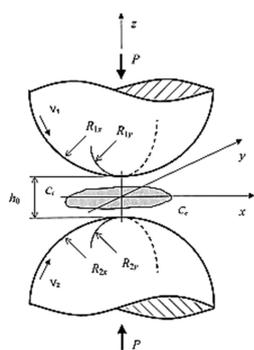


Схема контактирующих тел показана на рис. 1. Рассматривается стационарная изотермическая задача. Смазочный материал в зоне контакта обладает свойствами несжимаемой вязкой жидкости. Математическая модель задачи (в безразмерной форме) сводится к системе нелинейных интегродифференциальных уравнений и неравенств с граничными условиями. Вычислительный алгоритм основан на методе Ньютона и условиях дополненности для определения выходной (свободной) границы, которая отделяет зону смазки от кавитационной зоны.

Показано, что по мере изменения направления вектора скорости качения (угла α между вектором скорости и малой осью эллипса контакта) перестраиваются распределения давления и толщины смазочной пленки в зоне контакта, местоположение выходной границы (см. рис. 2 и рис. 3). С увеличением угла α монотонно

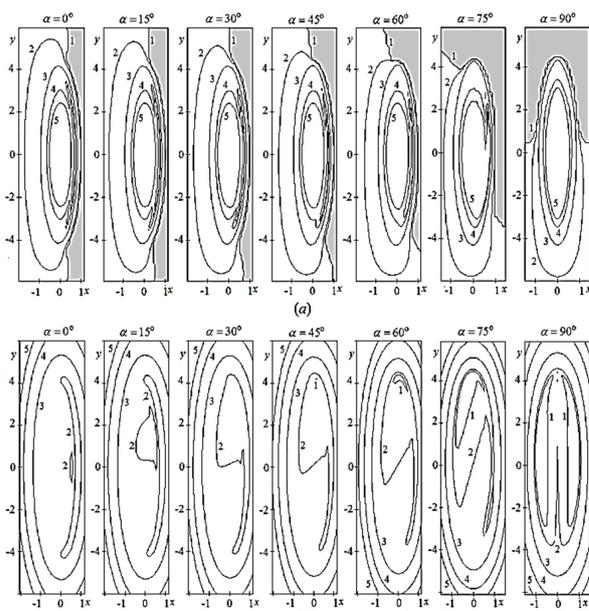


Рис. 2. Изолинии давления (а) и толщины смазочной пленки (б) для различных значений угла α .

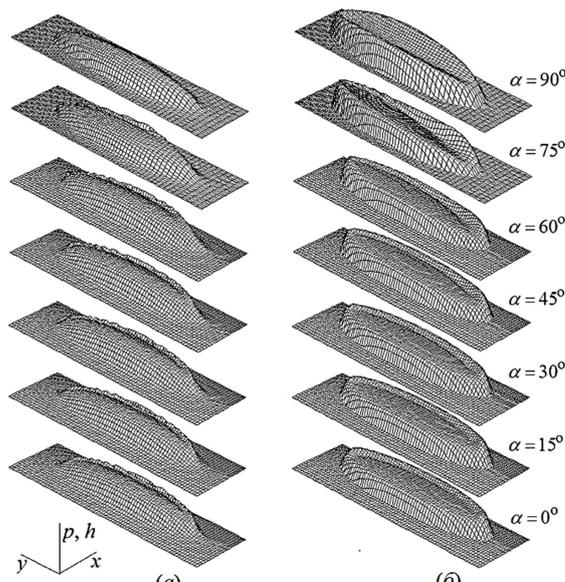


Рис. 3. Распределения давления (а) и толщины смазочной пленки (б) для различных значений угла α .

но уменьшается минимальная толщина пленки. Толщина пленки в центре контакта изменяется немонотонным образом: снижается с ростом α , при $\alpha > 75^\circ$ возрастает. Из расчетов определялась упругая характеристика (в размерном виде) эллиптического УГД контакта. По характеру зависимости нагрузки от сближения контактирующих упруго-деформируемых смазанных тел относится к жестким характеристикам. Показано, что эта характеристика практически совпадает с упругой характеристикой несмазанного эллиптического контакта. Полученные расчетные данные позволяют в дальнейшем провести расчетный анализ трения в контакте и поля тензора напряжений в подповерхностном слое.

Список литературы

1. Chittenden R.J., Dowson D., Dunn J.F., Taylor C.M. A theoretical analysis of the isothermal elastohydrodynamic lubrication of concentrated contacts. II. General case, with lubricant entrainment along either principal axis of the Hertzian contact ellipse or at some intermediate angle // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. 1985. V. 397. № 1813. P. 271-294.
2. Пановко М.Я. Влияние ориентации вектора средней скорости контактирующих поверхностей на параметры эллиптического упруго-гидродинамического контакта // Изв. АН. Механика твердого тела. 2000. № 5. С. 159-165.
3. Пановко М.Я. Численное моделирование упругогидро-динамической смазки эллиптического контакта // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 4. С. 54-65.

ВАРИАБЕЛЬНОСТЬ ОЦЕНЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗНОСА РАБОЧИХ ОРГАНОВ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Папич Л.¹, Гадolina И.В.², Побегайло П.А.², Крицкий Д.Ю.³

¹ Центр надежности и качества, Сербия;

² Институт машиноведения РАН, Москва, Россия, gadolina@mail.ru;

³ ОАО "Сибирская угольная энергетическая компания", Красноярск, Россия

На основе моделирования Монте-Карло предложен метод оценки варибельности коэффициента пропорциональности в формуле для расчета скорости абразивного износа зубьев экскаватора. Метод основан на предположении о нормальном распределении показателей.

Предложенная более 40 лет назад формула Рейша [1] до настоящего времени не потеряла своей актуальности. Это связано с ее универсальным характером (предложены варианты оценки износа для разных машин), а также с детальным описанием входящих в формулу коэффициентов, полученных на основе опытных и полевых данных. Использование формулы затрудняет два фактора: 1) отсутствие сведений о величине коэффициента пропорциональности A ; 2) невозможность учесть варибельность параметров. В переработанном для более удобного для использования виде формула Рейша для оценки скорости износа зубьев экскаватора γ :

$$\gamma = A \cdot K_1 \cdot K_2, (1)$$

где K_1 и K_2 - произведения коэффициентов по [1], K_1 - независящих от режима; K_2 - зависящих от режима.

В качестве материала для уточнения формулы (1) использовались данные по эксплуатационной надежности экскаватора - вскрышного комплекса непрерывного действия SRs(k)-4000 (ГДР) работающего уже много лет в Красноярском крае. Для оценки A использовалась формула [1], связывающая предельную величину износа U_D (принято равной половине длины зуба), скорость износа γ и время t_H (наблюдалось экспериментально):

$$t_H = \frac{U_D}{\gamma}, (2)$$

При известном из эксплуатационного эксперимента времени t_H , коэффициент пропорциональности A определяется из (1) и (2). Оценка в среднем составила $A = 8 \times 10^{-8} [1/(\text{Па} \cdot \text{ч}^2)]$ при условии, что γ имеет размерность [м/ч].

Тем не менее, как нас учит теория надежности [2], лишь точечной оценки недостаточно.

Для оценки доверительных интервалов для A воспользуемся методом Монте-Карло [3] (пример применения в [4]) с привлечением предварительных данных по рассеиванию входящих в (1) и (2) параметров:

Таблица

Показатель	Размерность	Среднее значение	Интервалы варьирования
Скорость, γ	мкм/час	160	120...180
Давление на рабочей поверхности, P	Мпа	135	40...230
K_{PO}	б/р	1.8	0.6 3
Коэффициент трения f	б/р	0.525	0.25 0.8
K_{abr}	б/р	3.65	0.7 6.6
$K_{изн}$	б/р	1.5	1 ... 2

90% доверительные интервалы для A в предположении о нормальном распределении величин, представленных в Таблице, по предварительному расчету составили $[6 \times 10^{-8} \dots 10 \times 10^{-8}]$.

Хотя исследование проводилось на основе данных определенного экскаватора, эксплуатировавшего в конкретных условиях, не будет потеряна общность получаемых результатов, т.к. условия Назаровского разреза и Красноярского края в целом достаточно типичны для эксплуатации таких машин в РФ. Условия Украины или Казахстана (и т.д.), возможно, потребуют уточнения полученных в настоящем исследовании данных.

Уточнение формулы расчета времени до наступления предельного износа, совместно с оцененными доверительными интервалами, может в дальнейшем быть использовано при сравнении технологических и эксплуатационных вариантов.

Работы по уточнению инженерной формулы оценки абразивного износа зубьев экскаватора планируется продолжить.

Список литературы

1. Рейш А.К. Повышение износостойкости строительных и дорожных машин. М.: Машиностроение, 1986. 184 с.
2. Беляев Ю.К., Гнеденко Б.Г., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М. Наука. 1965. 524с.
3. Соболев И. М. Метод Монте-Карло. — М.: Наука, 1968. — 64 с.
4. Papich L., Gadolina I.V., Zainetdinov R.I. INTERVAL ESTIMATION OF THE AVAILABILITY FACTOR OF THE BUCKET-WHEEL EXCAVATOR BASED ON BOOTSTRAP MODELING//Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2016. T. 45. № 6. С. 531-537.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОЙ ВЫНОСЛИВОСТИ ШЕСТЕРЕН ИЗ СТАЛИ 25X13H2

Пахомова С.А., Гресс М.А.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия, (vladisl-2013@yandex.ru).

При проектировании, изготовлении и ремонте шестерен и зубчатых колес, необходимо не только знание свойств материалов, но и методов их обработки для достижения заданных эксплуатационных характеристик. Технология изготовления зубчатых колес требует решения ряда конструктивных и материаловедческих проблем. Недостаточная контактная выносливость приводит к усталостному выкрашиванию поверхностных слоев зубьев, которое является самым распространенным видом повреждений для большинства закрытых передач.

Цель данной работы – исследование возможности повышения контактной выносливости зубчатых колес из коррозионно-стойкой стали 25X13H2 путем проведения закалки ТВЧ.

В работе проведены классические исследования макро- и микроструктуры и испытания твердости. Испытания на контактную выносливость проводили при контактных напряжениях $\sigma_{Zmax} = 4000$ МПа на модернизированной установке для исследования малоциклового усталости МКВ-К. Скорость обкатки — 7,94 м/с. В каждой партии испытывали 11 образцов.

Для повышения контактной выносливости поверхность зубчатых колес необходимо упрочнить. Это можно сделать несколькими способами: химико-термической обработкой (цементацией [1] или обработкой в коронном разряде [2]), пластической деформацией [1] либо с помощью токов высокой частоты. В работе исследован последний вариант, имеющий множество преимуществ.

Режим поверхностной закалки ТВЧ: Температура закалки 900 °С, время нагрева 8 с. В результате такой обработки была получена толщина закаленного слоя около 3 мм и твердость поверхности HRC50. Результаты исследования влияния температуры отпуска на контактную выносливость стали представлены в таблице 1.

Температура отпуска, °С	Долговечность N_{50} , млн.цикл.
150±5	93...94,5
175±5	105...107
200±5	133...135
225±5	98...101

Таблица 1. Результаты испытаний образцов из стали 25X13H2 на контактную выносливость N_{50} после закалки ТВЧ (900±5 °С) и отпуска (1 ч).

Заключение. Для повышения контактной выносливости зубьев необходимо провести закалку ТВЧ с температуры 900±5 °С с последующим низким отпуском при температуре 200±5 °С, 1 ч.

Список литературы

1. Pakhomova S. A., Manayev O. I. Effect of Heat Shotblast Treatment Exerted on the Contact Fatigue of Carburised Heat-Resistant Steel C0.12Cr2NiWV // Inorganic Materials: Applied Research. July 2018, Volume 9, Issue 4, pp 732–735. DOI: 10.1134/S2075113318040251
2. Помельникова А.С., Фетисов Г.П., Пахомова С.А. К вопросу упрочнения различно легированных сталей обработкой в коронном разряде // Технология металлов, 2017, № 2. С.20–24.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ О ПОЛОЖЕНИЯХ МЕХАНИЗМА СОВМЕСТНОГО ОТНОСИТЕЛЬНОГО МАНИПУЛИРОВАНИЯ С ПЯТЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Пашенко В.Н.¹, Мясоедов К.Р.¹, Рашоян Г.В.²

¹Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (pashenkovn@inbox.ru)

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва

Система управления механизмом совместного манипулирования является многоуровневой, иерархически организованной системой. Работа посвящена актуальной задаче исследования методов кинематики механизмов совместного относительного манипулирования поскольку кинематический уровень важная составляющая, обеспечивающая реализацию программных движений сочленений механизмов [1].

Поскольку управление такими механизмами, как правило, осуществляется в пространстве обобщенных координат, а координаты объектов манипулирования задаются в базовой системе, то одними из основных задач кинематического анализа являются задачи о положениях [2,3] Целью работы является решение прямой и обратной задачи о положениях одного из представителей широкого класса мало изученных механизмов совместного относительного манипулирования.

Кинематическая схема рассматриваемого механизма представлена на рисунке 1.

Механизм включает в себя два модуля. Первый модуль – шестизвенный механизм, обладающий тремя степенями свободы (обобщенные координаты $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$). Механизм способен осуществлять поступательное

перемещение вдоль осей OY , OZ и вращательное перемещение вокруг оси OX . Второй модуль – поворотный механизм, обладающий двумя степенями свободы (обобщенные координаты θ_5, θ_6). Механизм способен осуществлять вращательные движения вокруг оси OZ и поступательное перемещение вдоль оси OX . Базовой системой координат всего механизма является система координат выходного звена поворотного механизма $P_1X_1Y_1Z_1$.

Положение и ориентация – совмещение инструмента и заданной точки поверхности под определенным углом определяется координатами x, y, z (координаты y, z соответствуют положению инструмента, определяемые шестизвенным механизмом и координата x , задаваемые поворотным механизмом) и двумя углами α, β (рис.2).

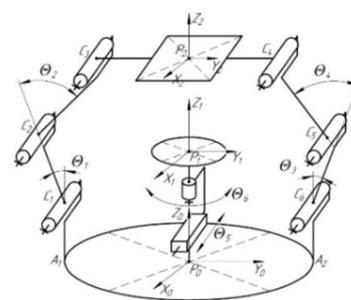


Рис. 1. Структура механизма.

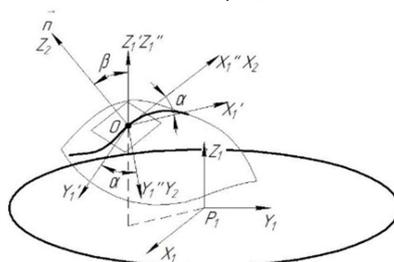


Рис.2. Точка на поверхности.

В работе сформулированы задачи, которые необходимо решить при синтезе механизмов совместного относительного манипулирования. Решены прямая и обратная задачи о положениях. Для проверки достоверности полученного решения был проведен эксперимент. Полученные расчетные и экспериментальные данные подтвердили корректность полученного решения.

Список литературы

1. В.А. Глазунов, А.Б. Ласточкин, К.А. Шалюхин, П.О. Данилин. К анализу и классификации устройств относительного манипулирования // Проблемы машиностроения и надежности машин, –2009. –№ 4.– С. 81-85.
2. V. N. Pashchenkoa, I. V. Sharapov, G. V. Rashoyan, A. I. Bykov. Construction of a Working Area for the Manipulation Mechanism of Simultaneous Relative Manipulation // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2017, Vol. 46, No. 3, pp. 225–231. © Allerton Press, Inc., 2017.
3. Glazunov V.A., Chunichin A.Yu. Development of mechanisms of parallel structure. Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin, 2014, no. 3, pp. 37-43. (English version of journal: Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2014, vol. 43, iss. 3, pp. 211-216.

ПОСТРОЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МЕХАНИЗМА СОВМЕСТНОГО ОТНОСИТЕЛЬНОГО МАНИПУЛИРОВАНИЯ

Пашенко В.Н.

Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана (pashenkovn@inbox.ru)

Работа посвящена актуальной задаче исследования методов динамического управления механизмами совместного относительного манипулирования. Формирование управляющих сигналов с учетом динамики манипуляционного механизма позволяет повысить качество процесса управления, обеспечить его устойчивость независимо от конкретной траектории [1,2].

При синтезе систем управления механизмами совместного относительного манипулирования необходима точная динамическая модель. Анализ методов вывода динамической модели подобных механизмов весьма затруднителен вследствие замкнутости кинематической структуры, нелинейности кинематических и динамических ограничений и взаимовлияния параметров [3,4].

Целью работы является разработка математического описания динамической модели механизма в форме Лагранжа второго рода:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} - \frac{\partial K}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} = Q_j,$$

где K – кинетическая энергия системы, Π – потенциальная энергия, Q_j – обобщенная сила.

Кинематическая схема рассматриваемого механизма представлена на рисунке 1.

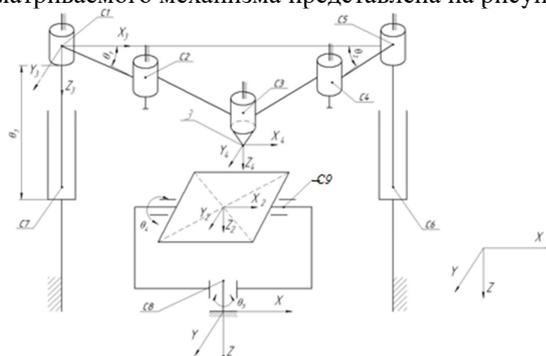


Рис. 1. Структура механизма.

Механизм включает в себя два модуля. Первый модуль – пятизвенный механизм, обладающий тремя степенями свободы (обобщенные координаты $\theta_1, \theta_2, \theta_3$). Механизм способен осуществлять поступательное перемещение вдоль осей OX , OY и OZ . Второй модуль – поворотный механизм, обладающий двумя степенями свободы (обобщенные координаты θ_4, θ_5). Механизм способен осуществлять вращательные движения вокруг оси OX и оси OZ . Базовой системой координат всего механизма является система координат выходного звена поворотного механизма $X_2Y_2Z_2$.

Для реализации поставленной задачи была получена кинетическая энергия i -го звена механизма в виде:

$K_i = \frac{1}{2} \text{tr}(\dot{T}_i^T H_i \dot{T}_i)$, где \dot{T}_i – производная от матрицы перехода от базовой системы координат к системе координат звеньев, H_i – матрица инерции звена.

Потенциальная энергия i -го звена механизма в виде: $\Pi_i = -m_i G^T T_i R_i^*$,

где R_i^* – матрица-столбец, первые три элемента которой – декартовы координаты центра тяжести звена i ;

$G^T = [0, 0, -g, 0]$, где g – ускорение свободного падения.

На основе заданных геометрических параметров механизма и законов изменения обобщенных координат была разработана динамическая модель механизма совместного относительного манипулирования с пятью степенями свободы, были определены законы изменения обобщенных сил в приводных парах.

Список литературы

1. Glazunov V.A., Chunichin A.Yu. Development of mechanisms of parallel structure. Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin, 2014, no. 3, pp. 37-43. (English version of journal: Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2014, vol. 43, iss. 3, pp. 211-216.)
2. Зенкевич С.Л., Ющенко А.С. Основы управления манипуляционными роботами: Учебник для вузов.- 2-е изд., испр. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.-480 с.: ил.
3. Wang J., Gosselin C.M. A new approach for the dynamic analysis of parallel manipulators. Multibody System Dynamics. 1998, vol. 2, no. 3, pp. 317-334.
4. Tsai L.-W. Solving the inverse dynamics of a Stewart-Gough manipulator by the principle of virtual work. ASME Journal of Mechanical Design, 2000, vol. 122, no. 1, pp. 3-9. DOI:

ВЕРОЯТНОСТЬ ОТКАЗА ЭЛЕМЕНТОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЗАЗОРОВ

Петрова И.М.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (impetr@mail.ru)

При проектировании машины в ее подвижных соединениях допускаются зазоры, которые обеспечивают собираемость звеньев и их перемещение относительно друг друга. Несмотря на малую величину зазоров по сравнению с номинальными размерами звеньев, они оказывают существенное влияние на динамику механизма. В процессе работы механизма с зазорами из-за наличия износа происходит увеличение реакций и появление виброударных режимов нагружения, что может существенно увеличить нагрузки, действующие на элементы механической системы. В работе [1] была исследована динамика многоступенчатого крейцкопфного вертикального поршневого компрессора и предложена модель оценки влияния величины зазоров в подвижных соединениях на характер изменения динамических параметров элементов механизма движения, основанная на применении уравнений движения в бесконечно малых перемещениях. С помощью разработанной модели были исследованы кинематические и динамические параметры трехрядных вертикальных поршневых компрессоров. Адекватность предложенной модели была подтверждена экспериментальными исследованиями виброакустических характеристик компрессора при различных степенях износа узлов трения.

Основные подходы к математическому моделированию динамики кривошипно-шатунного механизма с учетом зазоров в узлах трения приведены в [2]. В этом случае дискретные состояния узла рассматриваются через определенный интервал, называемый шагом износа. Закономерности изнашивания материалов из которых изготовлен узел в зависимости от наиболее влияющих факторов определяются экспериментально или принимаются на основе известных справочных материалов. Переход от одного состояния по критерию износа к другому осуществляется скачкообразно. В пределах шага износа параметры состояния и свойства системы принимаются неизменными, что позволяет развитие процессов, протекающих при изнашивании, заменить квазистатической расчетной моделью. Чем меньше выбранный шаг, тем более корректно расчетная модель описывает протекающие процессы. С использованием данной модели была определена величина износа механизма двигателя [2]. Экспериментальные исследования виброакустических характеристик механизма при различных состояниях узлов показал их удовлетворительное соответствие расчетным характеристикам. Предложенная модель оценки динамики и износа элементов механических систем позволяет проводить уточненные расчеты на долговечность по критериям динамического нагружения и износа. В этом случае оценку вероятности разрушения целесообразно проводить по методике, основанной на учете постепенного снижения предела выносливости вследствие циклических перегрузок, алгоритм которой изложен в [3]. Результаты расчета вероятности разрушения в зависимости от зазора в сопряжении и для различных рабочих нагрузок представлены в таблице 1.

Нагрузка кН	Зазор в со- пряжении, мм	σ_a МПа	u_p
	0,06	63,0	-1,98
300	0,10	72,0	-1,08
	0,15	78,5	-0,48
	0,06	53,3	-3,18
250	0,10	60,0	-2,33
	0,15	66,5	-1,83
	0,06	40,0	-4,73
180	0,10	45,5	-4,19
	0,15	50,7	-3,55

Таблица 1. Результаты расчета вероятности разрушения шатунов.

Список литературы

1. В.В.Гриб, Б.П.Сафонов, Р.В.Жуков Динамика механизма движения поршневого компрессора с учетом зазоров в подвижных соединениях //Вестник машиностроения. 2002, №4, с.3-7
2. Гриб В.В., Петрова И.М., Жуков Р.В. Компьютерное моделирование изменения технического состояния механизма ДВС в процессе эксплуатации. // Вестник МАДИ(ГТУ), вып. 2, 2004, с. 17-24
3. МУ. Расчеты деталей машин на выносливость в вероятностном аспекте. Ред. Гусенков А.П., Петрова И.М., Гадолina И.В. М.: МЦНТИ, 1991, с. 85.

ГЕНЕТИЧЕСКАЯ БИОМЕХАНИКА, ГЕНЕТИЧЕСКИЕ СИММЕТРИИ И МОДЕЛИ КВАНТОВО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ ГЕНЕТИКИ

Петухов С.В., Петухова Е.С., Свирин В.И.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (spetoukhov@gmail.com).

Работа посвящена раскрытию биоинформационных патентов живой природы для использования в различных областях техники, включая системы искусственного интеллекта, робототехнику и квантовый компьютер. При этом специальное внимание уделяется связи наследуемых биомеханических феноменов с общебиологическими структурами генетической информатики на базе молекул наследственности ДНК и РНК.

Достижения науки привели к новому пониманию самой жизни: «Жизнь есть партнерство между генами и математикой» [1]. Наше исследование основано на построении математических моделей обеспечения помехоустойчивости генетической информации и выявления скрытых взаимосвязей между различными уровнями организации генетической информации в живых организмах. Оно показывает адекватность и перспективность моделирования структур и феноменов генетического кодирования информации на базе матричного анализа, формализмов квантового компьютеринга и теории резонансов колебательных систем со многими степенями свободы [2-5]. Речь идет, прежде всего, о симметриях и матричных представлениях в системе множества взаимно связанных алфавитов ДНК и аминокислот, а также выявлении скрытых симметрий в длинных ДНК текстах.

На этом пути открыты неизвестные ранее феномены структуризации длинных ДНК-текстов; построена система представления алфавитов n -плетов ДНК в виде единого тензорного семейства квадратных матриц порядка 2^n ; обнаружена глубокая связь генетических алфавитов и текстов квантовых информационных молекул ДНК с логической операцией сложения по модулю 2, булевой алгеброй, а также операцией тензорного умножения. Как известно, тензорное умножение играет фундаментальную роль в квантовой механике и квантовой информатике: квантовые состояния многокомпонентных систем в квантовой механике определяются через тензорное произведение квантовых состояний составляющих частей; эта же операция используется в квантовом компьютеринге для описания многокубитных систем. С точки зрения развиваемых нами математических моделей генетической системы и уже полученных результатов, живые организмы являются квантово-информационными сущностями.

Одновременно нами развиваются приложения теории резонансов колебательных систем со многими степенями свободы к моделированию молекулярно-генетических структур и генетически наследуемых биомеханических образований. Наши результаты [3] неожиданно продолжают идеи Нобелевского лауреата Лайнуса Полинга о важности резонансов в организации живых систем. Любой организм представляет из себя огромный хор координированных колебательных процессов. С формальной точки зрения биологический организм является колебательной системой со множеством степеней свободы. Структурная организация системы молекулярно-генетического кодирования соответствует матричным представлениям резонансных свойств колебательных систем с двумя и более степенями свободы [3].

В ходе анализа матричных представлений ансамблей элементов системы генетического кодирования предложено обобщение комплексных и гиперкомплексных чисел в виде соединенно-гиперкомплексных (united-hypercomplex) числовых систем [4]. Эти новые для науки числовые системы могут использоваться для моделирования многопараметрических систем с частично или полностью независимым поведением их составных частей. Учитывая важную роль комплексных и гиперкомплексных чисел во многих областях науки и технологий, мы ожидаем, что эти новые числовые системы также окажутся востребованными, в том числе в биомеханике и системах искусственного интеллекта.

Нами развивается направление «генетической биомеханики», которое анализирует связь наследуемых биомеханических структур со структурными особенностями молекулярной системы генетического кодирования. Вплоть до последнего времени эта связь вовсе не рассматривалась в учебниках по биомеханике.

Настоящий цикл исследований выполняется в рамках международных Соглашений ИМАШ РАН о многолетнем научном сотрудничестве с организациями Венгрии, Германии и Китая.

Список литературы

1. Stewart I. Life's other secret: The new mathematics of the living world. Penguin: New-York, USA, 1999.
2. Петухов С.В. Матричная генетика, алгебры генетического кода, помехоустойчивость. М., Регулярная и хаотическая динамика, 2008, 316 стр.
3. Petoukhov S.V. The system-resonance approach in modeling genetic structures. - Biosystems, January 2016, v. 139, p. 1-11.
4. Petoukhov S.V. Genetic coding and united-hypercomplex systems in the models of algebraic biology. Biosystems, v. 158, August 2017, p. 31-46.
5. Petoukhov S.V., Petukhova E.S., Svirin V.I. New Symmetries and Fractal-Like Structures in the Genetic Coding System. In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEE 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 754. Springer, Cham, 2018, p. 588-600.

РАЗРУШЕНИЕ ДЕФОРМИРУЕМОЙ СРЕДЫ В ПОТОКЕ КАВИТИРУЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

Петушков В.А.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

Кавитационные процессы, происходящие в жидкости, превращают ее в двухфазную среду с дисперсной фазой в виде пузырьков, наполненных газом и/или паром. Наличие в жидкости подобной фазы даже малой концентрации меняет характер распространения в ней ударных волн и волновые процессы в целом, приводит к возникновению дополнительных, локальных механизмов нагружения и разрушения взаимодействующих с ней деформируемых сред (конструкций).

Структура деформируемых сред также не однородна, включает в себя как исходные, так и появляющиеся в процессе распространения ударных волн микродефекты, рост и объединение которых приводит к катастрофическому разрушению. Эти микродефекты, наблюдаемые микроскопией на мезо уровне структуры в виде пор и трещин, по существу также можно рассматривать в виде дисперсной фазы в нелинейно деформируемой среде подобно двухфазной жидкости с очень вязкой несущей фазой.

Анализ взаимодействия рассматриваемых сред оказывается достаточно сложной задачей из-за необходимости учета реального состояния и взаимодействия фаз, фазовых превращений, истории волнового нагружения и особенностей течения. Разработка методов решения подобных задач до сих пор остается актуальной проблемой современной механики.

В инженерных приложениях представляют интерес два основных аспекта этой проблемы. Традиционно это защита от кавитации сооружений и объектов техники, взаимодействующих с жидкостью, которая приводит к ухудшению их работы, генерации нежелательных шумов, вибрациям и разрушению. Другим сравнительно новым аспектом проблемы, обусловленным разработкой современных технологий, является не просто защита, а управление кавитацией для уменьшения сопротивления движущихся в жидкости объектов и ультразвуковой очистки поверхностей, их упрочнения, для интенсификации процессов в химии или удаления камней в почках, создания мощных акустических импульсных лазеров (сазеров) и др.

Особенности распространения ударных волн во взаимодействующих средах определяются многими факторами – теплофизическими и механическими свойствами самих сред, содержанием и распределением пузырьков (кавитационного облака), вязкостью жидкости и наличием поверхностного натяжения, так же как гидродинамическими параметрами их течения, включая характеристики потока, уровни турбулентности и др.

Происходящие при этом внутри фазовые и межфазовые явления и процессы являются чрезвычайно сложными для изучения, поскольку весьма локализованы, имеют различную физическую природу и различные пространственно-временные масштабы [1]. Известные экспериментальные исследования, выполненные в этом направлении, отличаются невысокой достоверностью и ограниченной применимостью полученных результатов. Во многих случаях прямые измерения параметров физического поля оказываются пока недоступными. В математическом моделировании необходимо располагать соответствующими моделями сред, позволяющими описать локальные внутри фазовые и межфазовые процессы, возникающие в результате эволюции отдельной дисперсной частицы под действием ударной волны и связать их с волновыми процессами в сжимаемых средах. Из-за отсутствия последовательного экспериментального изучения всех этих явлений и процессов, сопровождающих течения, в настоящее время нет надлежащего обоснования предлагаемых для их описания теоретических моделей.

На практике к традиционно используемым в механике сплошных сред подходам, обычно добавляется аппроксимация многофазной среды ее составляющими в однофазном состоянии с известными физическими, термодинамическими и механическими параметрами. Поведение жидкости и пузырьков в ней, деформируемых сред и микроповреждений описывается далее раздельно на основе решения соответствующих краевых задач, а взаимодействие между ними - уравнениями связи, реально отражающими процессы, происходящие на границах раздела фаз и сред и обеспечивающих требуемую точность моделирования. Возникающие здесь краевые задачи с математической точки зрения оказываются нелинейными, относятся к классу так называемых задач Стефана с подвижной границей, и требуют для своего решения разработки соответствующих методов.

В работе предлагается единый подход для моделирования динамики взаимодействующих между собой двухфазных жидкостей с парогазовыми пузырьками и деформируемой среды с микроповреждениями при распространении в них ударных волн. Разрушение деформируемой среды рассматривается при этом как эволюция микроповреждений - пор сферической формы, принимаемых по аналогии с кавитирующей жидкостью в виде пузырьков газа, объединение которых в процессе вязкопластического течения ведет к образованию макротрещины [2]. Для ее описания используются соотношения теории вязкопластического течения с конечными деформациями и континуальной механики повреждений.

Решение сформулированной нелинейной краевой задачи динамики многофазной среды, включающей в себя уравнения взаимодействия фаз и фазовых превращений, строится на основе методов конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ).

Представлены математическая модель и результаты численного моделирования распространения ударных волн в нелинейно деформируемой повреждаемой среде и взаимодействующей с ней кавитирующей сжимаемой жидкости. Показано, что в результате разрушения образующихся в жидкости кавитационных пузырьков возникают ударные волновые процессы с уровнями давления на фронте волны порядка 1.0 ГПа, скоростями движения частиц жидкости до 1300 м/с, сопровождающиеся повышением температуры до 1500 К. Пространственно-временные масштабы этих процессов соответствуют предельному размеру кавитационного пузырька и времени его эволюции. Один из результатов взаимодействия подобных волн с деформируемым телом показан на рис. 1.

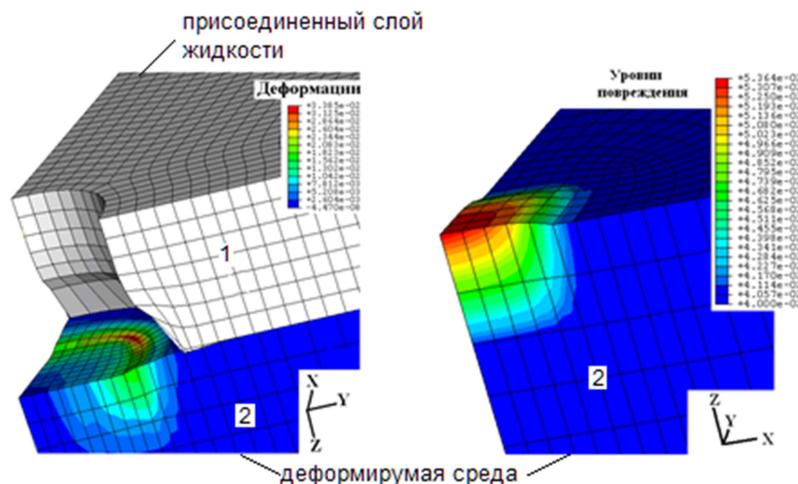


Рис. 1. Выявлена роль дисперсной фазы в жидкости в виде паровых пузырьков как защитного экрана для конструкций, подвергаемых воздействию интенсивных ударных волн (взрывам) в жидкости.

Список литературы

1. Petushkov V.A. *Phase Interaction in a Vapor-Liquid Medium in Transient Flow Regimes*// Fluid Dynamics 2005, 40, pp. 413–425.
2. Petushkov V.A. *Numerical Simulation of High-Speed Dynamics of the Nonlinear Deformation and Failure of Damaged Medium*// Mathematical Models and Computer Simulations, 2010, Vol. 2, No. 1, pp. 76–89.

БЕЗОПАСНОСТЬ И ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Полилов А.Н.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия (polilovan@mail.ru)

Проанализированы основные, нетрадиционные эффекты применения полимерных волокнистых композитов, связанные с механическими и физическими свойствами, особенностями технологии и с возможностью использовать принципы оптимального проектирования, наблюдаемые в живой Природе.

В последние десятилетия стало заметным возрастание интереса к секретам строения и функционирования живых систем, и это относится не только к робототехнике, биоинформатике, бионике, но и к изучению структуры прочных биологических материалов типа древесины, костной ткани, дентина зуба. Этот интерес во многом связан с появлением композитов – искусственно созданных материалов с управляемыми структурой и свойствами. С помощью укладки волокон по рациональным траекториям можно, как и в живой природе, создавать материалы, неоднородные и направленные свойства которых согласуются с внешними полями нагрузок. Подобным образом ведет себя и древесина. При отсутствии ветровых нагрузок ствол по мере роста остается гладким (мачтовые сосны), а при воздействии ветра, могущего привести к скручиванию и расщеплению, на стволе остается система сучков, создающая свилеватую структуру, отлично сопротивляющуюся расщеплению. Да и сами древесные волокна располагаются не строго параллельно стволу, а по незаметной спирали, совершая полный оборот вокруг ствола на шести – десяти метрах, что соответствует оптимальной малой разориентации в $3 - 5^0$, практически не снижающей продольной прочности, но резко увеличивающей сопротивление расщеплению.

С этих позиций вызывает интерес структура сучка – самого прочного места крепления в биокомпозитной конструкции: соединение оказывается прочнее, чем соединяемые элементы. Ветку можно сломать, но нельзя оторвать от ствола. Такой показатель – недостижимая мечта создателей композитных конструкций, в которых коэффициент реализации прочности, например, заклепочных соединений редко превышает 0.3...0.4. Компьютерным моделированием можно построить равнопрочные криволинейные траектории волокон, «обтекающих» отверстие, заклепку или другой узел крепления. Реализация прочности равнонапряженных волокон при подобной структуре армирования возрастает многократно.

Очень интересны и микро-, и макроструктура прочной травы под названием бамбук. Что заставляет Природу создавать упрочняющие диафрагмы на определенных расстояниях вдоль ствола? Необходимость предотвратить возможность расщепления с выпучиванием (по форме «китайского фонарика») при сжатии и изгибе и возможность расщепления при кручении с превращением трубы в стержень открытого профиля. В этом случае диафрагмы стесняют деформацию сечения и переводят опасные касательные напряжения в менее опасные продольные, существенно повышая сопротивление скручиванию.

Подобным приемам повышения прочности и надежности материалов-конструкций можно и нужно учиться у Природы. Тем более что технологические возможности создания композитных конструкций позволяют при низкой энергоемкости производства создавать изделия любой формы и произвольной структуры. Как и при росте древесины, для которого достаточно лишь световой энергии солнца, при создании изделий из полимерных композитов не требуются ни высокие температуры, ни значительные усилия формования. Широко применяемое сейчас понятие «bio-inspired method» означает – «метод подсказанный, вдохновленный Природой». Будущее изделий из волокнистых композитов – это создание био-подобных структур на основе изучения и использования природных принципов оптимизации прочных «материалов-конструкций». Последний термин традиционно применяется и к композитам, учитывая, что материал и конструкция создаются одновременно.

Основные проблемы создания композитных конструкций связаны с отработкой новых аддитивных технологий, и необходимость одновременного создания материала-конструкции обуславливает роль механики, методов проектного расчета и оптимизации. Отсюда – принятый международный термин «CAIO – computer-aided internal optimization» - компьютерное проектирование оптимальных формы и структуры армирования детали. К этому термину примыкает «CAM - computer aided manufacturing» - изготовление композитной детали на основе компьютерного моделирования. Вообще, сравнительно новое научное направление «технологическая механика» связано с проблемами механики твердого тела в проектировании и технологии.

Основной вывод для конструктора, сформулированный С. Цаем (S. Tsai), – «Think composites – думай композитами»: нельзя разделять материал и деталь. Процесс проектирования и создания материала-конструкции с заданными свойствами включает в себя неразрывно связанные: проектный расчет, технологию и механику композитов – как основу изучения зависимостей свойств материала от структуры армирования.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА КОНТАКТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И КИНЕТИКУ ФОРМИРОВАНИЯ АДАПТИВНОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОПРЯЖЕНИЙ СКОЛЬЖЕНИЯ

Поляков С.А.^{1,2}, Куксенова Л.И.², Кулешова Е.А.¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия (serpol50z@rambler.ru)

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

Рост несущей способности сопряжений скольжения может происходить по причине расширения внутренних резервов материалов, в первую очередь, их способности адаптироваться к более тяжелым условиям.

Основной проблемой для этого направления является выработка оптимальных способов достижения необходимых структурных характеристик. Поскольку достижение указанных характеристик зачастую упирается в состав смазочного материала (СМ), стимулирующего структурную перестройку приповерхностных слоев материала, логично использовать для данной перестройки составы СМ, подвергнутых наноструктурной модификации [1,2]. Однако, как показывает эксперимент, формирование несущей способности при использовании подобных СМ представляет собой сложный кинетический процесс.

Это иллюстрируется рядом экспериментальных результатов [1,2], к которым добавились испытания пары «червяк – зуб червячного колеса». По итогам испытаний на износостойкость редукторов типа 5ЧР-80 с применением в качестве добавки к маслу ТМ-5-18 наномодифицированной смазочной композиции «Стрибойл» была выявлена закономерность, отраженная на рис.1.

Полученная зависимость является достаточно характерной для случаев использования пленкообразующих смазочных материалов, известных в литературе [1,2] и др. Подобная зависимость на графике может быть упрощенно представлена параболой со смещенным относительно начала координат минимумом, причем величина смещения по оси давления (P) указывает на область давления P_0 , в окрестностях которого пленкообразование проходит критическое значение давления, выше которого по мере роста давления процесс пленкообразования оказывается все более затрудненным.

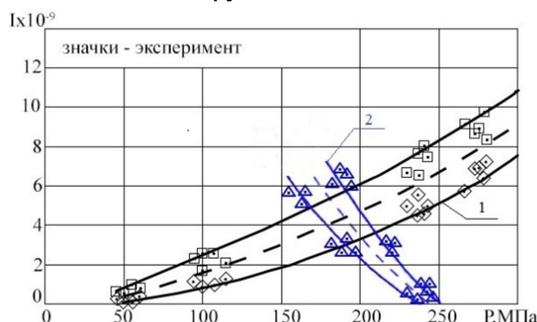


Рис.1 - Зависимость интенсивности изнашивания от давления в контакте червячной пары. 1 – диапазон значений, получаемый при использовании штатного масла ТМ-18-5; 2 – диапазон значений, получаемый при использовании того же масла с добавкой «Стрибойл».

Предложенная упрощенная зависимость имеет вид

$$I = k(P - P_0)^m$$

где величина P_0 имеет смысл критического давления пленкообразования, а рост значения этой величины за счет повышения адаптивной способности материалов расширяет зону изнашивания с высокой износостойкостью.

Интерпретация величины P_0 может быть предложена на основе представления о «втором минимуме» коэффициента трения, данном в этой работе и работе [2].

Показано, что процесс пленкообразования невозможен без активационных процессов, которые требуют притока свободной энергии, что объясняет возникновение на графике зависимости J от нагрузки нелинейной особенности типа «второго» минимума.

Полученные результаты показывают, что процесс пленкообразования позволяет получить новое свойство для сопряжений скольжения – адаптивность к эксплуатационным воздействиям, расширяющей их несущую способность.

Список литературы

1. Поляков С.А., Черторыйский И.С., Куксенова Л.И. Влияние модифицирования смазочных материалов на триботехнические характеристики сопряжений. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012, № 4, с. 78-81.
2. Поляков С.А. Самоорганизация при трении и эффект безызносности. Монография. М.: Изд-во РГАУ-МСХА.2009. 108с.

ОПИСАНИЕ СХЕМЫ ДЕФОРМАЦИИ ПЛАСТИНЫ ФУНКЦИЕЙ КОМПЛЕКСНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

Попов А.М.

Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, г. Москва

Одной из главных целей при решении задач пластического течения материала конструкции под действием высокоимпульсной кратковременной нагрузки является определение остаточных деформаций. Ее решение связано с определенными трудностями, связанными, в основном, с нелинейностью соотношений между деформациями σ и напряжениями ϵ , возникающими в рассматриваемой конструкции.

Рассматривается тонкая пластина, которая движется, деформируясь, в идеальной несжимаемой жидкости, течение которой является баротропным и происходит в отсутствие поля внешних сил. Течение описывается комплексной функцией $W(x, y)$, состоящей из двух взаимно ортогональных функций $\varphi(x, y)$ и $\psi(x, y)$

$W(x, y) = \varphi(x, y) + i\psi(x, y)$, которую необходимо определить

Задача решалась методом конформных отображений. Решение в виде гармонической функции имеет вид

$F(\varphi, \psi) = [p_0 \operatorname{Im} W(\varphi, \psi)]/\pi$.

Решение позволяет рассчитать семейство кривых $F(x, y) = \text{const}$.

При выполнении равенства $F(x, y)$ функции сопротивления P_c

$F(x, y) = P_c$

деформация заканчивается.

В последнем равенстве $P_c = \sigma_T \{ (A/R) \sqrt[3]{m/\rho} + (B/R^2) (\sqrt[3]{m/\rho})^2 + Cm/(R^3 \rho) \}$, где A, B и C – постоянные коэффициенты, определяемые на основе обработки экспериментальных данных; σ_T, ρ, m, R – характеристики пластины.

Учет пластических деформаций тонкостенных конструкций под действием кратковременной интенсивной нагрузки позволяет вскрыть значительный резерв сопротивляемости конструкции кратковременным динамическим нагрузкам, поскольку большая часть подводимой к конструкции внешней энергии может перейти в работу пластических деформаций прежде, чем конструкция разрушится или получит остаточные деформации.

РАЗРАБОТКА СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ ДЕЙСТВИЕМ ВЗРЫВА СКВАЖИННОГО ЗАРЯДА С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ФРОНТОМ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ

Попов Д.А.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

Разработка способа взрывного разрушения горных пород с регулируемым фронтом развития ударной волны в скважине.

Формирование фронта ударной волны за счет одновременного подрыва высокоточных электрических детонаторов, размещенных в скважине с учетом геологических свойств разрушаемой породы.

На сегодняшний день вскрышные работы и подготовка скальных пород к выемке осуществляется буровзрывным способом [1]. Однако существует ряд проблем, связанных с приостановкой работы горнодобывающих предприятий, какими являются неравномерное разрушение массива горных пород, большой выход негабаритных кусков после взрыва, случайное срабатывание одного или нескольких патронов-боевиков в скважинах, а так же ликвидация отказавших зарядов. Все это приводит к большим экономическим потерям предприятия. В связи с этим необходимо разработать эффективный способ разрушения, позволяющий минимизировать время приостановки предприятия и обладающий высокой надежностью.

В настоящее время наиболее производительным, надежным и безопасным способом инициирования скважинных зарядов взрывчатого вещества является электрический способ. В качестве средства инициирования широко применяются электродетонаторы с пиротехническими замедлителями [1-3]. Практика показывает, что они обладают высокой стабильностью горения, высокой экологичностью и низкой стоимостью. Однако они не подходят для формирования фронта детонационной волны, так как обладают высокой разновременностью срабатывания - 10-60 мс. Минимальной разновременностью – около 5 мкс обладают специальные высоковольтные электродетонаторы мгновенного действия АТЭД-15, но они не выдерживают динамические воздействия – до 50 Дж и могут быть причиной преждевременного срабатывания от механического воздействия [1]. Известен специальный электродетонатор, обладающий высокой точностью срабатывания и высокой устойчивостью к механическим воздействиям – до 500 Дж, однако его внедрение в производство еще не было осуществлено [4,5]. Для отработки данного детонатора необходимо выбрать наиболее эффективные режимы подачи энергии и формы импульса к инициирующим мостикам, в зависимости от их конструктивных особенностей для определения допустимых минимальных разбросов их срабатывания, а так же определить наиболее рациональное расположение детонаторов в скважине (рис. 1). Результаты данных исследований будут детально представлены автором в последующих работах.

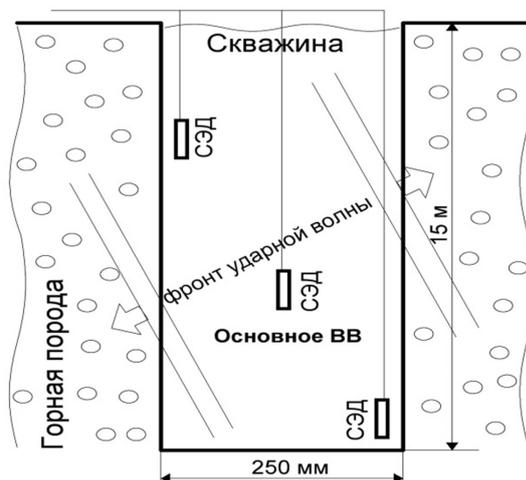


Рис. 1. Схема расположения специальных электрических детонаторов в скважине.

Список литературы

1. Граевский М.М., Справочник по электрическому взрыванию зарядов ВВ. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Рандеву-АМ, - 2000. – 448 с.
2. Соловьев В.О., Капсоль-детонатор // МКИ: 6 F 42 В 3/10, Патент №2070708, РФ, приоритет от 17.08.1994 г. Оpubл. в Официальном бюллетене. «Изобретения. Полезные модели» №35 от 20.12.1996 г., ФИПС РОСПАТЕНТ.
3. Соловьев В.О., Замедляющие пиротехнические составы // МКИ: 7 С 06 В 33/00, 33/12, Патент №2230053, РФ, приоритет от 14.12.1999 г. Оpubл. в Официальном бюллетене. «Изобретения. Полезные модели» №16 от 10.06.2004 г., ФИПС РОСПАТЕНТ.
4. Соловьев В.О., Думенко В.И., Электродетонатор и электровоспламенитель для него // МКИ: 6 F 42 В 3/13, Патент №2056034, РФ, приоритет от 30.03.1992 г. Оpubл. в Официальном бюллетене. «Изобретения. Полезные модели» №7 от 10.03.1996 г., ФИПС РОСПАТЕНТ.
5. Соловьев В.О., Овчинников Н.М., Пащок В.В., Лавров В.В., Специальные электрические детонаторы нового поколения // Проблемы машиностроения и автоматизации. Международный журнал. М., №1, 2015, с. 88-99.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТОКА В ПРОВОДНИКЕ ПРИ ПРОПУСКАНИИ ТОКОВОГО ИМПУЛЬСА

Правоторова Е.А.¹, Скворцов О.Б.², Троицкий О.А.¹

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (pravotorova@bk.ru)

²Научно-технический центр «Завод Балансировочных машин», Москва, Россия.

Вопрос динамического перераспределения тока в проводнике имеет важное практическое значение при передаче энергии и информации по проводным сетям. Такие вопросы также важны для понимания физической природы взаимодействия электромагнитного поля импульсного тока и материала проводника. Данный вопрос затрагивается в ряде работ [1, 2]. Предложен ряд гипотез, описывающих данные процессы с учетом магнитогидродинамических подходов, эффектов Холла, скин- и пинч-эффекта, температурных явлений. Динамический характер происходящих при этом явлений достаточно сложен и не позволяет остановиться на одной из гипотез как общепризнанной. Даже при рассмотрении статического случая распределения постоянного тока в простом одиночном проводнике круглого сечения есть неоднозначные подходы к этому вопросу. В [3] высказано предположение о неравномерном распределении плотности тока по сечению с учетом действия пинч-эффекта, хотя при таких условиях в большинстве случаев, считают, что распределение плотности тока является равномерным. Авторы ряда работ рассматривают случай воздействия импульсных токов, приводящих к перегреву и электрическому взрыву, и упругие динамические деформации [2, 4], наблюдаемые при существенно меньшей величине токов. В таких условиях можно пренебречь механическими эффектами от температурного воздействия тока, когда изменения температуры проводника незначительны. При теоретическом анализе динамики перераспределения тока, основанном на решении уравнений Максвелла авторы исходя из различных ограничений на начальные, а также граничные условия и предположения могут получать различные решения. При учете таких явлений как, например, скин-эффект [5-7] получены отличающиеся решения задачи о распределении тока по сечению цилиндрического проводника. Некоторые получаемые результаты, например, проявление обратного скин-эффекта достаточно сложно согласовать с результатами, получаемыми при экспериментальных исследованиях. Анализ виброакустического отклика на действие импульсного тока показывает, что механическое действие импульса тока проявляется как ударный механический процесс от суперпозиции симметричных кратковременных всплесков ускорения в моменты начала переднего и заднего фронтов импульса тока. Практическое совпадение амплитуды противоположных по знаку всплесков ускорения и существенно меньшая их длительность по сравнению с характерными временами проявления скин-эффекта говорит о взаимосвязи между этими явлениями. При этом механический отклик на пропускание импульсного тока не может рассматриваться как прямое следствие процессов в поверхностном слое, связанных со скин-эффектом. Полученные в опубликованных источниках соотношения, характеризующие распределение тока по сечению проводников, как показывает их моделирование должно сопровождаться некоторыми интересными явлениями, которые было бы интересно обнаружить экспериментально. Это касается как перераспределения тока по сечению проводника в течение действия пропускаемого через него импульса тока, так и временных зависимостей изменений собственного магнитного поля проводника во время такого процесса. Такие исследования позволят аргументированно понять некоторые явления связанные с протеканием больших токов через проводники, например, изменения их сопротивления в зависимости от величины тока, не связанные с температурными изменениями [8].

По затронутым вопросам выполнено сравнение имеющихся моделей распределения плотности тока по сечению проводников, проведены эксперименты по моделированию эквивалентных схем моделей динамического перераспределения тока в проводниках при воздействии импульсного и переменного тока, а также предложены методы экспериментального определения характеристик динамического перераспределения тока в проводниках.

Список литературы

1. Батаронов Игорь Леонидович. Механизмы влияния электрического поля и электрического тока на пластическую деформацию металлов // диссертация на соискание степени доктора физико-математических наук, Воронеж. 2000. – 280 с.
2. Суркаев А.Л. Исследование высокоэнергетических импульсных процессов в конденсированных средах на основе электрического взрыва проводников // диссертация на соискание степени доктора технических наук: Самара, 2018. – 279 с.
3. Харисов А.А.. Исследования реального статистического распределения плотности постоянного электрического тока в уединенных прямых цилиндрических проводниках при установившихся токовых и температурных режимах // Научно-технический сборник «Коммунальное хозяйство городов». № 51. 2003. – С.154–161.
4. Баранов М.И. Квантово-волновая природа электрического тока в металлическом проводнике и ее некоторые электрофизические макропроявления // *Электротехника и Электромеханика*. №4. 2014. – С.25–33.
5. Аронов Л.В. Метод расчета активного сопротивления цилиндрического провода с учетом поверхностного эффекта // «Молодой ученый». №12(116). 2016. – С.202–205.
6. Котельников И.А., Черкасский В.С. Скин-эффект в задачах // НГУ. Новосибирск. 2013. – 82 с.
7. Кускова Н.И. Обратный скин-эффект // *Письма в ЖТФ*. Т.39. №21. 2004. – С.59-64.
8. Терентьев Д.Е. Высокочастотные свойства заземляющих проводников // *Электросвязь*. №11. 2004. – С.24–25.

ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА СПЛАВА НА ГЕОМЕТРИЮ СВАРНОГО ШВА ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ

Привезенцев В.И., Минаева Н.И., Кудрявцев И.В., Белоусов И.В.
МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия. Россия
(privezentsev-1077@yandex.ru).

Одной из важных характеристик качества соединения является геометрия сварного шва, которая характеризуется глубиной проплавления, шириной шва, величиной усиления, формой границы плавления и др. Целью работы являлось исследование влияния химического состава сварочной ванны на формирование геометрии сварного соединения в условиях импульсной лазерной сварки. Анализ изменения формы сварного шва проводился на основе математической модели, описывающей скорость движения фронта плавления [1]. Учитывая важную роль процессов испарения при лазерной сварке, для исследования применяли сплавы на основе меди, в состав которых вводили элементы с существенно различной температурой кипения – никелем (3005 К) и цинком (1179,2 К).

Выполненный в работе [1] анализ механизма проплавления учитывает испарение облучаемого металла и основной характеристикой взаимодействия излучения с металлом принята скорость движения фронта плавления (V):

$$V = \frac{h}{\tau} = q * \beta_v; \beta_v = \frac{\alpha}{\rho * L_v}; L_v = L_{пл} + cT_c G, \quad (1)$$

где V – скорость движения фронта плавления,
h - глубина проплавления,
 τ - время движения фронта плавления,
q - плотность мощности источника энергии,
 α - коэффициент поглощения излучения,
 ρ – плотность материала,
 $L_{пл}$ – удельная теплота плавления,
c – теплоемкость,
 T_c – температура кипения,
G – коэффициент перегрева металла.

В отличие от приведенной в [2] схеме расчета формы проплавления при лазерной сварке, в принятой в настоящей работе модели проплавления учитывается коэффициент перегрева металла выше температуры плавления (G), т.е. чем выше температура перегрева, тем выше скорость движения фронта плавления.

Температура кипения свариваемого металла зависит от его химического состава, при этом введение легирующих элементов с низкой температурой кипения снижает температуру кипения сварочной ванны. Как правило в справочных материалах отсутствуют сведения о температуре кипения сплавов, однако эта величина может быть оценена с помощью известного закона Рауля, в соответствии с которым для выбранных сплавов:

$$P_{Cu}^0 [Cu] + P_{Ni}^0 [Ni] + P_{Zn}^0 [Zn] = 1, \quad (2)$$

где [Cu], [Ni], [Zn] – молярная концентрация меди, никеля, цинка в сплаве соответственно;
 $P_{Cu}^0, P_{Ni}^0, P_{Zn}^0$ – парциальное давление меди, никеля, цинка.

В результате расчетов по формуле (2) для сплавов МНЦ-20-15, МНЦ-15-20, МНЦ-10-25 была определена температура кипения, которая составляет 1420К, 1380К, 1350К соответственно.

Расчетная скорость движения фронта плавления в данных сплавах увеличивается по мере снижения температуры кипения и составляет для МНЦ-20-15 – 40,22 см/с, МНЦ-15-20 – 41,36 см/с, МНЦ-10-25- 45,04 см/с.

Экспериментальные исследования предусматривали определение глубины проплавления на образцах из сплава МНЦ-15-20 при облучении на установке LRS-50 в диапазоне плотностей мощности от 100 кВт/см² до 400кВт/см².

Плотность мощности кВт/см ²	Скорость проплавления мм/мс	Расчетная глубина проплавления, мм	Экспериментальная глубина проплавления, мм
400	0,4	1,6	1,6
235	0,24	0,96	0,75
176	0,18	0,72	0,5
100	0,1	0,4	0,1

Таблица 1. Влияние плотности мощности на скорость плавления.

Экспериментально установлено интенсивное кипение сплава при облучении с образованием факела паров над сварочной ванной. Сравнение расчетных и экспериментальных значений глубины проплавления при плотностях мощности выше 200 кВт/см² показывает их удовлетворительное совпадение.

Кроме того, на формирование сварного шва существенное влияние оказывает тепловой эффект, получаемый благодаря химической реакции, протекающей между основным металлом и материалом, используемым

в качестве присадочного. Данный эффект был проверен с применением в качестве добавления к основному материалу термитного состава $Al + CuO$. Основным материалом в данной работе выступило серебро. В ходе проведенных экспериментов было установлено следующее: ввод присадки многократно увеличивает эффективность проплавления, однако способ с вводом присадки в стык неэффективен из-за слишком большого минимального зазора, который технически невозможно сделать меньше, в результате чего сложно активировать взаимодействие присадочного материала и основного металла. Из-за этого энергия, направленная в сварную точку, распределяется только по поверхности свариваемых пластин. Сварные точки получаются с большим диаметром, но с малой глубиной проплавления. В случае с присадочным материалом на поверхности сварного соединения энергия распределяется наиболее эффективным образом, в результате чего получается глубокое проплавление с оптимальным диаметром.

Список литературы

1. М.С. Баранов, Б.А. Вершок, И.Н. Гейнрихс. Экспериментальная проверка моделей углубления кратера при воздействии на металл лазерного излучения. Физика и химия обработки материалов. №5. М 1976.
2. А.В. Масленников, Ю.Ю. Левин, В.А. Ерофеев. Моделирование нестационарного формирования шва при импульсной лазерной ND:YAG-сварке. Известия ТулГУ. Технические науки. 2010. Вып. 4. Ч. 1.

РАЗРАБОТКА ПЛАНЕТАРНОЙ ПЕРЕДАЧИ С НЕКРУГЛЫМИ ЗУБЧАТЫМИ КОЛЕСАМИ С ВНУТРЕННИМ ЗАЦЕПЛЕНИЕМ

Приходько А.А.

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия;
(E-mail: sannic92@gmail.com);

Зубчатые передачи с некруглыми колесами известны давно и вызывают широкий интерес ученых и изобретателей [1]. Такие передачи нашли применение в текстильных и полиграфических машинах, прессах, цепных и инерционных транспортерах, упаковочных машинах и т.д. [2]. Большинство исследователей ограничивают сферу применения некруглых колес, используя их только для передачи вращательного движения между параллельными осями с переменным отношением угловых скоростей. В [3] показано, что планетарные передачи с некруглыми колесами будут более перспективными и компактными по сравнению с многоступенчатыми, однако не высказывается идея о возможности изменения знака передаточной функции механизма.

Ранее был проведен структурный синтез планетарного механизма с внешним зацеплением, который позволяет реализовать возвратно-вращательное движение выходного вала при равномерном вращательном движении входного вала благодаря переменному передаточному отношению эллиптических зубчатых колес [4-6]. Так как планетарные передачи с внутренним зацеплением обладают повышенной несущей способностью и плавностью хода, а также меньшими габаритами по сравнению с механизмами с внешним зацеплением, предложена схема планетарной передачи с некруглыми зубчатыми колесами с внутренним зацеплением (рис. 1).

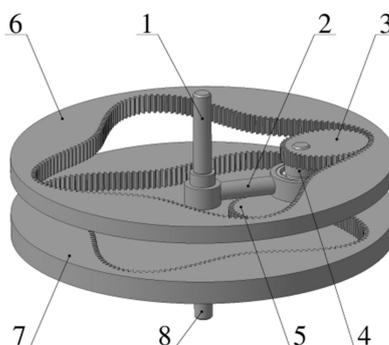


Рис. 1. Планетарный механизм с внутренним зацеплением.

Входному валу 1 сообщается вращательное движение, которое передается водилу 2, благодаря этому эллиптическое зубчатое колесо 3 обкатывается по неподвижному колесу 6 с внутренними зубьями. Движение колес 3 через вал 4 и эллиптическую шестерню 5 передается зубчатому колесу 7 и выходному валу 8. За счет переменного передаточного отношения некруглых зубчатых колес обеспечивается возвратно-вращательное движение выходного вала 8 при равномерном вращательном движении входного вала 1.

Предложенный преобразователь движения можно широко применять в машинах и механизмах различного технологического назначения [6]: качающихся конвейерах и камнедробилках; полиграфических и текстильных машинах; механизмах нефтяных станков-качалок; цикловых технологических машинах-автоматах, манипуляторах, мобильных роботах с шагающими движителями; а также во многих других приборах и машинах. Одним из перспективных направлений для практического применения является использование механизма в системе привода перемешивающего устройства [7].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-31-00256.

Список литературы

1. Тарабарин В.Б., Тарабарина З.И. Модели зубчатых передач с переменным передаточным отношением в коллекции МГТУ им. Н.Э. Баумана. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2014. № 12, с. 84-91.
2. Литвин Ф.Л. Некруглые зубчатые колеса. М.-Л.: Машгиз, 1956. 312 с.
3. Mundo D. Geometric design of a planetary gear train with non-circular gears. Mechanism and machine theory, 2006. Т. 41, N 4, p. 456-472.
4. Приходько А.А., Смелягин А.И., Герасименко Е.О., Сонин С.А. Перемешивающее устройство с возвратно-вращательным движением рабочего органа. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология, 2017. № 4, с. 84-87.
5. Приходько А.А., Смелягин А.И. Кинематический анализ планетарного зубчатого механизма преобразования вращательного движения в возвратно-вращательное. Известия высших учебных заведений. Машиностроение, 2016. № 12, с. 21-27.
6. Пат. 2616457 Российская Федерация, МПК⁷ F16H 19/08. Планетарный механизм преобразования вращательного движения в возвратно-вращательное / А. А. Приходько, А. И. Смелягин; заявитель и патентообладатель Кубанский гос. тех. ун-т. – № 2016111033; заявл. 24.03.2016; опубл. 17.04.2017, Бюл. № 11. – 10 с.
7. Смелягин А.И., Приходько А.А. Структурный синтез сложного исполнительного механизма возвратно-вращательного перемешивающего устройства. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология, 2014. № 5-6, с. 85-88.

ОЦЕНКА УСИЛИЙ ЗАТЯЖКИ АВИАЦИОННЫХ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Пучков В.Н.¹, Дунаев В.В.²

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (puckov.v.n@bk.ru).

²Московский Государственный Технический Университет им. Баумана, Москва, Россия.

Описаны технические средства и методика экспериментального исследования релаксации сил затяжки болтовых соединений, выполненных из разнородных материалов. Оценено влияние на процессы релаксации материалов соединения и величины начальной силы затяжки. Получены графики изменения сил затяжки при различных состояниях соединения — затяжка, нагрев, выдержка при повышенной температуре, охлаждение и отвинчивание гайки.

В настоящее время в нашей стране исследуются пути создания сверхзвукового пассажирского самолета второго поколения (СПС-2). При проектировании конструктивно-силовой схемы СПС-2 проблема правильного выбора конструкционного материала для пассажирских самолетов становится все более острой. Это обусловлено необходимостью учета релаксационной стойкости материалов болтовых соединений.

В затянутом болтовом соединении уравнение совместности относительных деформаций элементов соединения имеет вид:

$$\varepsilon_l + \varepsilon_p + \varepsilon_{2b} + \varepsilon_{ш} = \varepsilon_2, \quad (1)$$

где ε_l , ε_p , ε_{2b} , $\varepsilon_{ш}$ и ε_2 , - соответственно, осевые относительные деформации стержня болта, резьбы, головки болта, шайбы и соединяемых деталей.

Сущность процесса релаксации напряжений состоит в том, что в болте при высокой температуре возрастает пластическая деформация (ползучесть) и напряжение затяжки в соединении при неизменной общей деформации уменьшается. Общая деформация болта складывается из упругой и пластической составляющих: $\varepsilon_0 = \varepsilon_y + \varepsilon_{nl} = Const$.

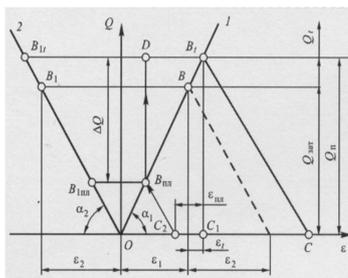


Рис.1. Диаграмма сил в болтовом соединении при учете температурной деформации

Начальные усилия затяжки болтов из 16ХСА и ВТ-16 задавались одинаковыми и равнялись $Q_{зам.0} = 10,7; 21,4$ и $28,6$ кН, что соответствует $0,3; 0,6$ и $0,8 P_{pp}$. Выбор рабочей точки для затяжки болтов производилось по результатам предварительной тарировки серии болтов на механической разрывной машине с использованием мерительного приспособления.

В измерителе для замера удлинения болтов использовался многооборотный индикатор 1МИГ ГОСТ 9696-75 с ценой деления $0,001$ мм. При тарировке болтов и определении усилия использовалась механическая разрывная машина УМЭ-10Тн с максимальной погрешностью не более $\pm 1\%$ от максимальной нагрузки по шкале, что для шкалы 50000 Н составляет ± 500 Н.

Максимальная погрешность при определении усилия по удлинению в домкратном болте зависела только от измерителя и составляла при усилии 20 кН $\pm 2,1\%$ для стальных болтов и $\pm 1,2\%$ для титановых болтов. Статистический анализ экспериментальных результатов показал, что величины доверительных интервалов средних значений остаточных усилий затяжки позволяли сравнивать релаксацию усилий затяжки в различных вариантах соединений при разных температурах с высокой степенью надежности.

Было испытано 53 серии соединений по 10 образцов. Варьировались следующие факторы: материал болта, гайки, шайбы и втулки, температура, усилие затяжки болта и некоторые факторы, связанные с геометрической неправильностью опорных поверхностей головки болта, гайки и шайбы.

Список литературы

1. Бирюк В.И., Кутынов В.Ф. Проблемы проектирования конструкции самолета второго поколения (СПС-2)//Труды ЦАГИ, 1996. Вып.2623. С.41-45.
2. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести .М.: Машиностроение, 1975, 400 с.
3. Горьнин И.В., Чечулин Б.Б. Титан в машиностроении. Машиностроение, 1990.400 с.
4. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 368 с.
5. Иосилевич Г.Б., Строганов Г.Б., Шарловский Ю.В. Затяжка и стопорение резьбовых соединений .М.: Машиностроение, 1985.224 с.
6. Ильина А.Д., Ильин Ю.С. Экспериментальное исследование релаксации усилий в болтовых соединениях при повышенных температурах// Труды ЦАГИ, 1977. Вып. 1882. С. 3-20.

АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ УСТРОЙСТВ БЕЗОПАСНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ МАШИН

Раевский В.А.¹, Насонов Н.А.², Леонтьев М.Ю.¹, Крылов К.Ю.³

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал

²Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

³ООО «РИТЦ», Калуга

В настоящее время в РФ наблюдается ситуация, когда потребителям приходится работать с парком физически изношенных и морально устаревших грузоподъемных машин [1] с устаревшими приборами безопасной эксплуатации. С другой стороны, во многих отраслях на стадии строительства и ввода в эксплуатацию находится сравнительно большое количество объектов, где будут использоваться ГПМ с обязательной реализацией функций контроля параметров системы [2 и др.]. Важным условием является применение аппаратного и программного обеспечения отечественного производства.

Авторами разработан аппаратный комплекс измерения медленно меняющихся сигналов, который может являться частью системы регистрации параметров грузоподъемных машин, в том числе и мостовых кранов, упомянутых выше (рис. 1).

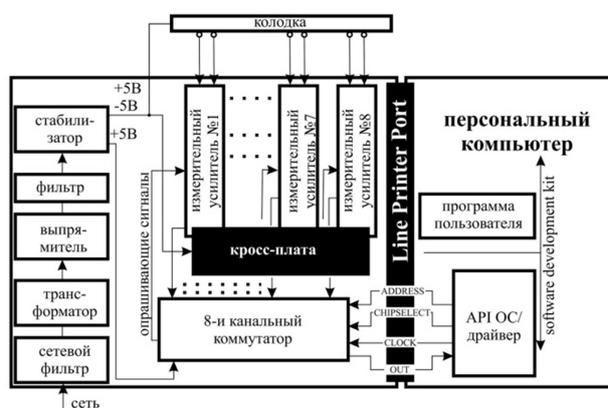


Рис. 1. Блок-схема аппаратного комплекса.

К восьми платам измерительных усилителей подключаются соответствующие витые пары, идущие от колодки. Измерительные усилители одновременно усиливают сигнал и ослабляют входящую помеху. Далее усиленный сигнал поступает на входы аналогового мультиплексора, являющегося частью восьмиканального коммутатора, последовательно опрашивающего измерительные усилители и передающего сигнал на вход аналого-цифрового преобразователя, так же являющегося частью коммутатора. Аппаратный комплекс взаимодействует посредством стандартного порта LPT как с персональным компьютером, так и с программируемыми логическими контроллерами, включенными в системы управления (т.е. может являться частью полноценного программно-аппаратного блока регистрации параметров). В данный момент для семейства ОС Windows 7 x86 разработан драйвер, который передает управляющие сигналы ADDRESS на вход мультиплексора, CHIPSELECT и CLOCK на входы аналого-цифрового преобразователя; принимает сигнал OUT с выхода АЦП. Также разработана программа пользователя, показания записываются в формате модельных файлов, что позволяет существенно упростить их дальнейший анализ.

Источник питания выполнен на микросхемах KP142EH5A, KP142EH6 и TL431. Основой измерительного усилителя является инструментальный усилитель AD623. Восьмиканальный коммутатор объединяет в себе аналоговый мультиплексор, построенный на базе микросхемы последовательного доступа ADG608, и аналого-цифровой преобразователь на базе комплементарной металл-окисел-полупроводниковой логики TLC549.

Для проверки комплекса в режиме измерения нагрузок применялся тензодатчик силы БП-05-200. По результатам обработки экспериментальных данных аппаратный комплекс адекватно описывает измерение нагрузок на 5% уровне значимости. Для проверки интегральных характеристик производилась ручная дуговая наплавка круговых валиков на пластину из стали Ст3. Сравнивались результаты измерения термических циклов лазерным пирометрированием и с помощью разработанного комплекса. По результатам обработки экспериментальных данных аппаратный комплекс адекватно описывает измерение температур на 10% уровне значимости.

Список литературы

1. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2016 году. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2017. 397 с.
2. Марцинкевич Б. АЭС в России до 2030 года // Газоэнергетика.ру. Аналитический онлайн-журнал [Электронный ресурс]. URL: <http://geoenergetics.ru/2016/08/12/aes-v-rossii-do-2030-goda/> (дата обращения: 02.02.2018).

РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Разумовский И.А., Матвиенко Ю.Г., Чернятин А.С.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (E-mail: murza45@gmail.com)

В докладе содержатся некоторые результаты научных разработок и исследований, проведенных специалистами отдела «Прочность, живучесть и безопасность машин» в области развития новых методов анализа напряженно-деформированного состояния в зонах трещин, основанных на совместном применении современных оптико-интерференционных цифровых методов регистрации полей перемещений с расчетным анализом с использованием МКЭ.

Одним из наиболее перспективных направлений развития механики разрушения является использование двухпараметрических моделей и критериев, в которых дополнительно к сингулярным составляющим поля напряжений у вершины трещины (коэффициентам интенсивности напряжений - *KIH*) вводят в рассмотрение также и несингулярные *T*-напряжения [1]. В докладе приведены результаты разработки методического подхода, алгоритмов и специализированной программы (с графическим интерфейсом) для определения сингулярных и несингулярных членов асимптотического представления поля напряжений в зоне трещины на основе математической обработки полей тангенциальных перемещений, полученных методами электронной цифровой спекл-интерферометрии (ЭЦСИ) и корреляции цифровых изображений (КЦИ) [2,3].

Методы и программы для математической обработки экспериментальной информации обеспечили возможность решения задачи об оценке размеров так называемой «зоны повреждения», под которой понимается область, где НДС вследствие возникновения пластических деформаций или накопления повреждения отлично от упругого. В этом случае НДС в окрестности вершины трещины зоны не может быть описано известным асимптотическим решением Вильямса; соответственно, при возникновении в этой области пластических деформаций и других «повреждений» эта процедура станет неустойчивой. Это обстоятельство использовано при разработке методики и программы для оценки размера «поврежденной» зоны, изложенной в работе [2].

При практическом применении методов ЭЦСИ и КЦИ возникает необходимость корректировки результатов регистрации полученных полей перемещений, связанных со смещениями исследуемого объекта как жесткого. Методика математической обработки, алгоритм и программы для численной корректировки экспериментально зарегистрированных полей перемещений, позволяющие исключить влияние указанных факторов на точность результатов, а также пример практической реализации подхода в сочетании с методом КЦИ, содержатся в работе [3].

Предложенный в работе [4] методический подход к оценке нагруженности и дефектности элементов конструкций на основе обработки зарегистрированных на поверхности исследуемого объекта значительных массивов экспериментальной информации в сочетании с разработками специалистов ИМАШ РАН в области создания специализированной аппаратуры для регистрации полей перемещений в лабораторных и натуральных условиях открывают новые возможности решения задач оценки прочности, живучести и остаточного ресурса элементов машин конструкций.

Пример такого комплексного подхода рассмотрен в работе [5], где с учетом результатов оценки исходных размеров подповерхностной трещины, а также неоднородного по глубине распределения ОН, выполнен расчет процесса развития пространственной трещины в зоне сварного соединения в типовом магистральном трубопроводе Ду-850. При этом для расчета конфигурации фронта трещины разработана специализированная программа в среде ANSYS.

Список литературы

1. Матвиенко Ю.Г. Модели и критерии хрупкого разрушения. М.: Физматлит. 2006. 328 с.
2. Оценка размеров зоны неупругого деформирования у вершины трещины на основе анализа полей перемещений//Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 12. С. 45-51.
3. Чернятин А.С., Матвиенко Ю.Г., Lopez-Crespo P. Определение параметров двухпараметрической механики разрушения вдоль фронта трещины по данным метода корреляции цифровых изображений// Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 11. С. 46-53.
4. Chernyatin A.S., Razumovskii I.A. Methodology and software package for assessment of SSS parameters of full-scale structures and its application to a study of loading level, defect rate and residual stress level in elements of NPP equipment. Strength of Materials. 2013. V. 45. №4. P. 506-511.
5. Чернятин А.С., Разумовский И.А., Матвиенко Ю.Г. Кинетика краевой трещины в поле остаточных напряжений//Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 6. С. 25-34.

ЗАДАЧА РАСПОЗНАВАНИЯ - ФОКУСНАЯ МОДЕЛЬ

Ракчеева Т.А.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (rta_ra@list.ru).

Цель. Традиционные решения являются чисто технологическими, мало учитывающими специфику задачи распознавания. Для описания границ классов распознаваемых объектов используется, как правило, процедура дихотомии - в результате границы получают кусочное описание гиперплоскостями, растущее экспоненциально с ростом размерности. Трудоемкость традиционного решения, приводящего к фрагментарному описанию границ классов, компенсируется высоким уровнем ИТ-технологий. Целью данного исследования является разработка метода, основанного на математической модели, адекватной задаче распознавания, проявлением которой явилась бы органичность и простота решения.

Принципиальные особенности фокусной модели дают преимущества ее применению и для формирования границ классов на этапе обучения, и для принятия решения на этапе идентификации. Граница класса в пространстве признаков описывается единой аналитической кривой или поверхностью. Фокусный метод не критичен к выпуклости описываемых областей, а также к их связности: многосвязные области одного класса описываются одной общей границей. В результате многомерная задача классификации сводится к оптимизации и принятию решения в одномерном пространстве.

Классическая лемниската L – гладкая замкнутая кривая на плоскости, определяемая своим инвариантом через систему m точек-фокусов $\{f_j\}$ внутри и параметр R как геометрическое место точек, в котором произведение расстояний r_j от произвольной точки до каждого j -го фокуса ($j=1, \dots, m$) постоянно и равно ее фокусному радиусу R^m [1]. Инвариант и уравнение многофокусной лемнискаты имеют вид:

$$r_1 \cdot r_2 \cdot \dots \cdot r_m = R^m, \quad (1)$$

где левая часть определяется в данной модели как фокусное *расстояние* от произвольной точки x до фокусной mf -системы. Данное классическое определение лемнискаты на плоскости автоматически обобщается на N -мерное пространство обобщением на многомерное пространство евклидова расстояния r_j [2, 3].

Согласно фокусной модели, каждая из точек, представляющих образцы обучающей выборки, принимается за фокус, а *вся обучающая выборка формирует mf -систему данного класса* (рис.1). Обучающие выборки k классов, состоящие из m_k образцов каждый, формируют в пространстве признаков k фокусных mf_k -систем с семействами софокусных потенциально граничных mf_k -лемнискат. Область класса идентификации с инвариантом (1), состоящая из mf_k -системы и свободного пространства, представляющего остальные элементы данного класса, ограничивается одной лемнискатой выбором фокусного радиуса $R(mf_k)$ в соответствии со статистическими характеристиками выборки (рис.1, внешний контур).

Описание границ оптимизируется за счет устранения избыточности фокусной системы («аннигиляция» фокусов), представляющей обучающие выборки (рис.2, слева), при условии сохранения эквивалентности формы граничной лемнискаты с точки зрения идентификации (рис.2, справа).

Принятие решения для вновь предъявленного объекта, в случае отсутствия пересечений классовых областей, представляет собой элементарную операцию вычисления фокусного расстояния ρ_0 и сравнения его значения с граничным параметром каждого класса: $\rho_0(mf_k) \leq R_L(mf_k)$.

В случае пересечений классов формируются границы, разделяющие пространство на «сферы влияния» в соответствии с функцией принадлежности Fp , определенной в каждой точке пространства как минимальное фокусное расстояние ρ_0 для полного набора классов данной задачи распознавания.

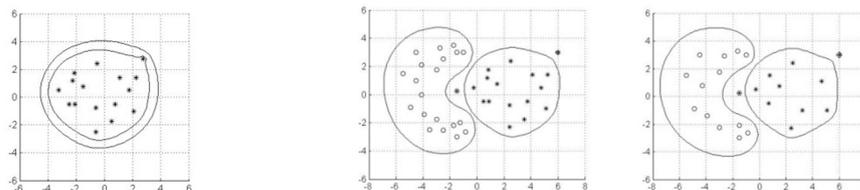


Рис.1. Фокусное представление класса. Рис. 2. Формирования областей классов с оптимизацией выборок.

Существенным отличием фокусной модели от традиционных подходов распознавания является то, что решающее правило строится на интегральном восприятии обучающей выборки, при котором учитывается влияние всех элементов выборки, а не только граничных. Многомерная задача классификации в фокусной парадигме в целом сводится к формированию классификационного пространства в виде фокусных систем, ассоциированных с обучающими выборками, и построению непрерывных классовых границ в виде лемнискат, обеспечивая простоту процедуры принятия решения. Фокусное полицентрическое пространство идентификации, факторизованное лемнискатами по радиусу, формирует также непрерывную функцию принадлежности, свидетельствующую не только о принадлежности или непринадлежности предъявленного объекта к данному классу, но и о степени идентификационной близости в количественном выражении. Простота принятия решения в фокусной парадигме сохраняется и в случае многозначности распознаваемого образа.

Список литературы

1. Hilbert D. Gessamelte Abhandlungen, Berlin: Springer, 1935. Bd. 3, 435 s.
2. Ракчеева Т.А. Многофокусные лемнискаты: приближение кривых. //ЖВММФ. 2010. Т. 50. №11. С. 2060-2072.
3. Ракчеева Т.А. Фокусная аппроксимация на комплексной плоскости. // ЖВММФ. 2011. Т. 51. № 11. С. 1963-1972.

МЕТРИЧЕСКИЕ ИНВАРИАНТЫ ИЛЛЮЗИИ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ

Ракчеева Т.А.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (rta_ra@list.ru).

Развитие автоматизации, необходимость быстрых оценок ситуации по тем или иным показаниям многочисленных приборов заставляют обратить внимание на возможную опасность, связанную с точностью зрительных оценок. Целью данной работы является экспериментальное исследование метрических факторов зрительной иллюзии пересечения (Поггендорфа), достаточно убедительные объяснения природы которой, несмотря на множество гипотез, на сегодняшний день отсутствуют. При прохождении наклонной линии за непрозрачной полосой систематическая ошибка зрительного восприятия состоит, как известно, в том, что линия до пересечения с полосой («входной» фрагмент) и ее продолжение за полосой («выходной» фрагмент) не составляют единой прямой линии (рис. 1). Задача состояла в определении характера функциональной зависимости иллюзии пересечения от параметров таких факторов, как ширина экранирующей полосы S и угол наклона линии α . Исследовались: смещение выходного фрагмента вдоль полосы, а также угол его направления относительно полосы.

Для выполнения этой работы написано компьютерное программное обеспечение, позволяющее экспериментально исследовать количественные оценки указанных метрических факторов, влияющих на проявление иллюзии Поггендорфа [1,2]. По предъявленному входному фрагменту испытуемый должен был продолжить «мышью» выходной фрагмент, начало которого «закреплено» на выходной стороне полосы. Каждый эксперимент состоял из серии тестов, параметризующей исследуемый фактор в диапазоне.

Полученные результаты показали, что иллюзия Поггендорфа в виде систематической ошибки смещения линии вдоль полосы статистически достоверно регистрируется у всех испытуемых в разных экспериментальных конфигурациях. Существование иллюзии значимо не зависит ни от горизонтально-вертикальной ориентации полосы, ни от вертикальной инверсии линии, ни от цвета теста, а зависит только от ширины полосы и наклона линии. Таким образом, в качественном отношении иллюзия пересечения Поггендорфа ориентационно инвариантна и симметрична относительно вертикальной инверсии линии. В количественном отношении величина иллюзии смещения *линейно* зависит от ширины полосы S , коэффициент линейности зависит от направления линии α_0 , и *нелинейно* зависит от угла наклона линии α , «степень нелинейности» зависит от ширины полосы S_0 . Иллюзия направления не зависит от ширины полосы, а круговой диапазон ориентации полосы демонстрирует периодические свойства величины иллюзии смещения и направления. Регрессионные модели дают функциональные зависимости величины иллюзии от исследуемых факторов. Дополнительные эксперименты показали, что иллюзия Поггендорфа обладает свойством аддитивности – она накапливается при пересечении нескольких полос, сохраняя характер зависимости для каждой из них.

Полученные результаты свидетельствуют также о *направлении иллюзии смещения*: систематическая ошибка «выходного» фрагмента во всех проведенных экспериментах направлена в сторону «входного» фрагмента линии. Этот эффект иллюстрирует рис. 2, где вместе представлены объективные и визуально воспринимаемые «выходные» точки линии для факторов ширины полосы (рис.2, слева) и угла наклона линии (рис.2, справа). На этих рисунках совмещены графики для классической конфигурации теста (рис.1, слева) и для конфигурации с вертикальной инверсией прямой (рис.1, справа). Внешние линии на рис. 2 представляют реальные данные, а внутренние – визуально воспринимаемые. Из этих графиков видно, что иллюзия смещения во всех экспериментах направлена внутрь.

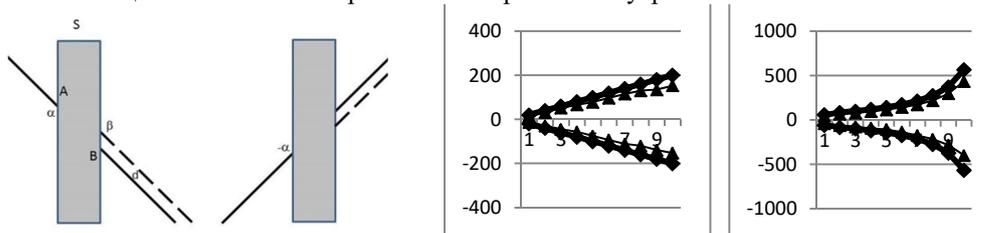


Рис.1. Иллюзия пересечения.

Рис.2. Иллюзия смещения от ширины полосы и направления линии.

Выявленный эффект направления иллюзии подтвердил гипотезу автора о том, что иллюзия Поггендорфа характеризуется инвариантным свойством сокращать расстояние между «входной» и «выходной» точками пересечения линии с полосой. Тенденция устойчиво сохраняется при всех параметрах ширины полосы и наклона линии, независимо от ориентации полосы, инверсии прямой, композиции полос и цвета.

Общий вывод: «Человек ментально стремится сблизить точки «входа» и «выхода» линии, он хорошо держит направление, но деформирует метрические оценки».

Важным приложением результатов исследования метрических свойств иллюзии пересечения представляется корректировка метрических оценок в работе человека-оператора.

Список литературы

1. Ракчеева Т.А., «Метрические факторы оптико-геометрической иллюзии пересечения». Десятые юбилейные Курдюмовские чтения: Синергетика в общественных и естественных науках. Труды междунар. междисцип. конференции, сс.142-146, 2015.
2. Ракчеева Т.А., Жолудев Е.П. 'Исследование факторов зрительной иллюзии пересечения', Математика Компьютер Образование, XXII международная конференция (МКО), т.22, с.100, 2015.

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ И НОРМИРОВАНИЮ РИСКОВ, СВЯЗАННЫХ С ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Резников Д.О.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (email:mibsts@mail.ru).

Успешное функционирование критически важного объекта (КВО) представляет собой последовательный процесс изменения его состояний от начального состояния (HC) - создания объекта, до заданного конечного состояния (KC_0) - планового вывода из эксплуатации. В случае осуществления этого процесса можно говорить о реализации сценария успеха S_0 . Вследствие наличия высокого уровня неопределенностей, обусловленных естественной вариативностью параметров критически важного объекта и внешней среды (разбросом механических свойств материалов, геометрических размеров, режимов нагружения, в том числе возможностью реализации экстремальных нагрузок), с одной стороны, а также недостатком знаний о системе, с другой, эволюция системы является многовариантной и должна описываться в вероятностной постановке с помощью разветвленных сценарных деревьев, в структуру которых должны обязательно включаться аварийные и катастрофические сценарии (S_c). При этом каждому из сценариев S_i будут соответствовать вероятность его реализации $P(S_i)$ и ущерб $C(S_i)$. Таким образом, функционирование КВО неизбежно связано с риском [1-3].

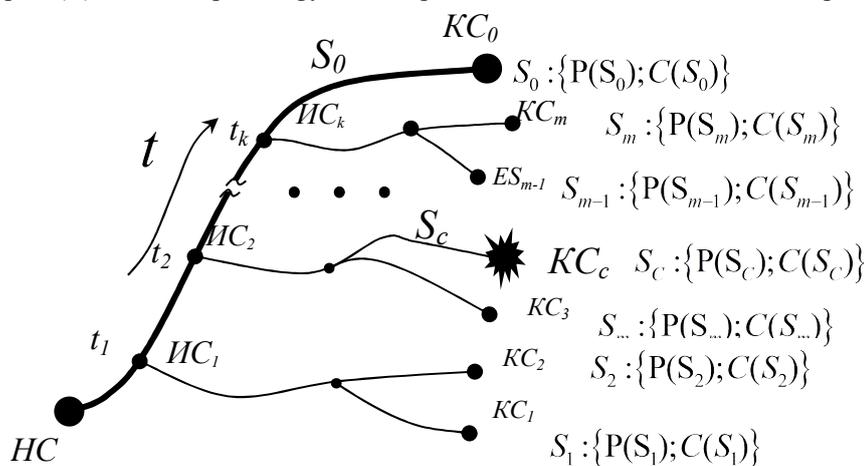


Рис. 1. Сценарное дерево критически важного объекта.

В докладе будут представлены принципы оценки, нормирования и управления риском, принятые в различных странах мира; сформирована система индексов риска, которые могут быть использованы для сопоставления уровня безопасности при различных вариантах системы, рассмотрено применение принципа практической целесообразности (принципа ALARP) при реализации защитных мероприятий, направленных на снижение индивидуальных и социальных рисков, связанных с функционированием критически важных объектов, до тех уровней, с которыми общество готово смириться ради благ, которые оно получает в связи с функционированием критически важных объектов [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант РФФИ 16-29-09575)

Список литературы

1. Махутов Н.А., Резников Д.О. Оценка и нормирование рисков при эксплуатации сложных технических систем//Безопасность в техносфере. 2012. № 5. С. 3-9.
2. Махутов Н.А., Резников Д.О. Анализ и обеспечение защищенности объектов критических с учетом рисков и предельных состояний// Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2012. № 5. С. 14-36.
3. Dmitry O. Reznikov, Nikolay A. Makhutov, Rasim S. Akhmetkhanov. Analysis of Terrorist Attack Scenarios and Measures for Countering Terrorist Threats. In Probabilistic Modeling in System Engineering (ed. Andrey Kostogryzov). IntechOpen publ. 2018. pp. 257-278
4. Махутов Н.А., Резников Д.О., Петров В.П. Принцип практической целесообразности при нормировании индивидуального риска//Безопасность в техносфере. 2012. № 6. С. 7-12.

ПРОГРЕССИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ С ВНУТРЕННИМ ВЫСТУПОМ

Решиков Е.О.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия (mt13@bmstu.ru).

Как известно трубные изделия с цилиндрическим или коническим выступом в полости широко используются в машиностроении, автомобилестроении, авиастроении и оборонной промышленности. Такие изделия нужны для производства корпусов выключателей подачи топлива дизеля, корпусов механических клапанов для автоматических установок распыления смазочно-охлаждающих жидкостей, дроссельных крышек распределительных клапанов гидросистем высокого давления, гидравлических фильтров маслопроводов с дросселем и обратным клапаном, пневмодросселей и современных гидродросселей. В технологиях изготовления таких деталей важнейшими задачами являются не только повышение их прочностных характеристик, но и максимальное снижение энергетических затрат и расхода металла, а также повышение производительности. Такие задачи могут быть решены путем применения внутреннего радиального выдавливания трубной заготовки (рис. 1), которое ранее не изучалось.

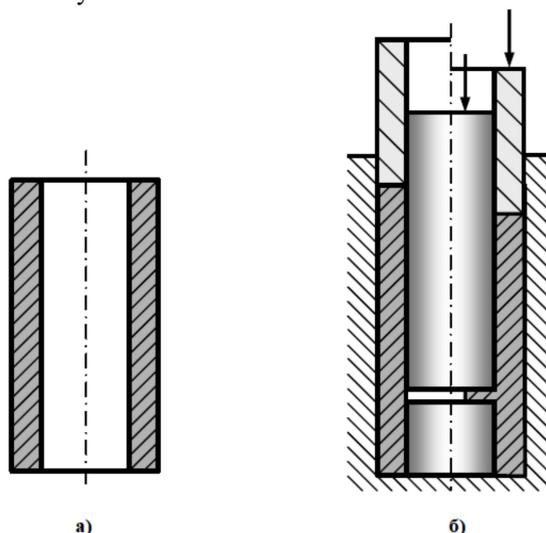


Рис. 1. Предлагаемая технология радиального выдавливания трубных изделий с внутренним выступом: а) исходная заготовка; б) радиальное выдавливание.

Следует указать, что геометрические возможности радиального выдавливания внутреннего выступа не ограничиваются наиболее простой схемой, показанной на рис. 1. Таким выдавливанием, варьируя форму и диаметры матрицы и оправок, без особых затруднений можно производить и более сложные изделия.

Автором получены все необходимые формулы для надежного определения требуемой силы прессы, расчета матрицы на прочность по максимальному давлению, а также для выбора материалов нужной прочности для изготовления инструмента. Корректность полученных формул была подтверждена экспериментально на изделиях разных типоразмеров, изготовленных из алюминиевого сплава АД1, латуни Л63 и стали 12Х18Н9Т. Эксперименты также показали возможность существенного повышения как физико-механических характеристик полученных изделий, так и заметное повышение качества отштампованных поверхностей (рис. 2).



Рис. 2. Срез выдавленного образца из стали 12Х18Н9Т.

НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ С УЧЕТОМ СТРУКТУРНОЙ И ДЕФОРМАЦИОННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ

Романов А.Н., Филимонова Н.И.

Институт машиноведения РАН, (e-mail: alrom37@mail.ru).

Структурная неоднородность конструкционных металлических материалов обуславливает деформационную неоднородность при циклическом упругопластическом деформировании с образованием на определенных стадиях рассредоточенного трещинообразования.

Выполнено исследование особенностей развития деформаций в локальных участках рабочей базы образцов на двухфазной стали 45, в которой феррит и цементит находятся частично в связанном состоянии, образуя структуру, состоящую из перлита и феррита.

Средние значения деформаций (циклических и односторонне накопленных), полученные суммированием по отдельным участкам, равными 30, 100 и 200 мкм.

Коэффициенты неоднородности циклической пластической деформации $K_{\mu\epsilon_p}$ и односторонне накопленной пластической деформации $K_{\mu\epsilon}$, определяемые в виде

$$K_{\mu\epsilon_p} = \epsilon_{pk} / \epsilon_{pm} \text{ и } K_{\mu\epsilon} = \epsilon_k / \epsilon_m, \quad (1)$$

где ϵ_k – местная пластическая деформация в цикле; ϵ_{pm} – средняя величина ширины петли гистерезиса в цикле, измеренная на всей рабочей базе; ϵ_k – местная односторонне накопленная деформация в рассматриваемом цикле нагружения; ϵ_m – средняя односторонне накопленная к данному циклу деформация на большой базе измерения.

Статистическое распределение локальных деформаций в стали 45 в полуциклах растяжения после нагружения подобно распределению характеристик структурной неоднородности, оцениваемой статистическими параметрами значений микротвердости.

Развитие деформационной неоднородности с ростом числа циклов нагружения приводит к накоплению повреждений в локальных зонах и возникновению в них предельных состояний (образование микротрещин).

Для описания уровня накопленных повреждений η при циклическом упругопластическом деформировании использовался деформационно-кинетический критерий в виде:

$$\int_0^{N_p} \frac{\delta^2}{\epsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon} dN = 1, \quad (2)$$

где δ – пластическая деформация (ширина петли гистерезиса) в полуцикле растяжения, $\Delta\epsilon$ – односторонне накопленная деформация в рассматриваемом цикле, ϵ – пластичность материала при однократном разрушении образца, обуславливающая несущую способность материала, N_p – число циклов до разрушения.

С учетом неоднородности пластической деформации в циклах нагружения условие разрушения (появление микротрещин в локальных участках при $N_p < 10^5$ циклов), когда повреждение от упругой деформации невелико, может быть записано следующим образом:

$$\int_0^{N_p} \frac{(K_{\mu\delta} \delta_k)^2}{\epsilon^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{K_{\mu\epsilon} \epsilon_k}{\epsilon} dN = 1, \quad (3)$$

где $K_{\mu\delta}$ и $K_{\mu\epsilon}$ – коэффициенты неоднородности циклической и односторонне накопленной деформаций.

Первый член в зависимостях (2) и (3) определяет усталостное повреждение, второй – квазистатическое.

Наличие деформационной неоднородности при малоцикловом нагружении приводит к неравномерному накоплению повреждений в отдельных участках рабочей базы образца. В результате в местах максимальных деформаций наблюдается более раннее возникновение предельных состояний с образованием микротрещин.

Характер распределения повреждений во всех циклах нагружения остается одинаковым и сосредоточен в ферритной составляющей. При этом очаги неоднородности закрепляются и сохраняются во всех циклах нагружения.

Таким образом, проведенные исследования показали, что характер развития деформационных процессов и в соответствии с ними и характер накопления повреждений определяется структурным состоянием деформируемого материала и его фазовым составом.

Как было отмечено ранее, в зонах с высокими локальными деформациями с ростом числа циклов нагружения образуются микротрещины и к моменту образования магистральной трещины поверхность материала покрывается многочисленными микротрещинами (рассредоточенное трещинообразование).

В двухфазных материалах таких, как сталь 45, микротрещины образуются преимущественно в ферритных зонах. В процессе технологической обработки, например, прокатки, ферритные и перлитные зоны приобретают форму полос, и микротрещины, располагаясь в этих зонах.

При достижении микротрещинами определенных размеров и плотности путем слияния и взаимодействия образуется магистральная трещина, развитие которой в поврежденном материале протекает ускоренными темпами.

ЕДИНАЯ КРИВАЯ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Романов А.Н.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, (alrom37@mail.ru).

Ранее было показано, что накопление повреждений на стадии развития трещин описывается зависимостями в виде:

$$\eta = \int_0^N \frac{v_{yn} v_p}{v_c^2} dN + \int_0^N \frac{\Delta v}{v_c} dN. \quad (1)$$

В предельном случае (разрушение) зависимость (1):

$$\int_0^{N_p} \frac{v_{yn} v_p}{v_c^2} dN + \int_0^{N_p} \frac{\Delta v}{v_c} dN = 1, \quad (2)$$

где v_p - пластическое (остаточное) раскрытие (перемещение берегов) трещины, v_{yn} - упругопластическое раскрытие трещины в полцикле растяжения, Δv - односторонне накопленное раскрытие берегов трещины в цикле, v_c - предельное раскрытие трещины (перемещение берегов), соответствующее максимальной нагрузке при однократном разрыве образца (детали) с трещиной, N и N_p - текущее и разрушающее число циклов соответственно.

Обработка экспериментальных данных показывает, что скорость развития трещины линейно зависит от скорости накопления повреждений:

$$\frac{dl}{dN} = \Delta l_c \frac{d\eta}{dN}, \quad (3)$$

где Δl_c - приращение трещины от исходного значения l_0 до критического l_c .

Это означает, что накопление повреждений с ростом числа циклов нагружения может быть описано через приращение длины трещины в виде:

$$\eta_l = \frac{\Delta l_n}{\Delta l_c}, \quad (4)$$

где Δl_n - приращение трещины за «n» циклов нагружения, а скорость накопления повреждений будет равна:

$$\frac{d\eta}{dN} = \frac{1}{\Delta l_c} \cdot \frac{dl}{dN}. \quad (5)$$

Установлено, что накопленное повреждение, рассчитанное по зависимости (1), хорошо описывается по относительному изменению длины трещины (4) и коэффициента интенсивности напряжений:

$$\eta_{KI} = \frac{\Delta K_{In}}{\Delta K_{If}}, \quad (6)$$

где ΔK_{If} - приращение коэффициента интенсивности напряжений от нулевого значения K_{I0} до критического значения K_{If} :

$$\Delta K_{If} = K_{If} - K_{I0}. \quad (7)$$

Тогда по аналогии с зависимостями (3) и (5) скорость накопления повреждений может быть определена в виде:

$$\frac{d\eta}{dN} = \frac{1}{K_{If}} \cdot \frac{dK_I}{dN}, \quad (8)$$

где $\frac{dK_I}{dN}$ - скорость изменения коэффициента интенсивности напряжений на заданном этапе нагружения.

Важно, что если фиксируется скорость развития трещины и параметры раскрытия в процессе эксплуатации конструкции (или задается на стадии проектирования) и рассчитывается в соответствии с критерием (1) скорость накопления повреждения, то в этом случае может быть определено критическое (предельное) приращение трещины в виде:

$$\Delta l_c = \frac{dl}{dN} \Big/ \frac{d\eta}{dN}. \quad (9)$$

Таким образом, получаем единую (обобщенную) кривую циклической трещиностойкости для любых конструкционных материалов и любых условий нагружения.

УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАБОТЫ В ПАРАХ ТРЕНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Рошин М.Н.

Институт машиноведения им. А.А. Благодрава РАН, Москва, Россия; (roschin50@yandex.ru).

Работоспособность органов управления авиационной и космической техники на этапе проектирования обеспечивается учетом внешних факторов в процессе работы. Одним из таких факторов космического пространства является высокотемпературное воздействие. Задача узлов трения для работы в условиях высоких температур очень актуальна практически во всем машиностроительном комплексе, она обусловлена низкой надежностью и большими затратами на восстановительный ремонт высокотемпературных узлов трения, для которых невозможно применение смазочных масел.

Для работы в узлах трения при этих условиях особый интерес представляют керамические материалы и прежде всего: наноструктурированные кристаллы частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСЦ) и углерод-углеродные материалы.

При создании узлов трения для работы в условиях высоких температур представляют интерес углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), содержащие углеродный армирующий элемент в виде дискретных волокон. Уникальной особенностью УУКМ является увеличение прочности в 1,5-2,0 раза и модуля упругости при повышении температуры [1].

Применение УУКМ в узлах трения как замена графитовых материалов, является перспективной задачей, поскольку в условиях пуска и останова оборудования, когда возможен значительный перепад температуры в зоне трения, углеродные материалы не склонны к терморастрескиванию. Однако широкое применение УУКМ в узлах трения при высоких температурах сдерживается в связи с тем, коэффициент трения имеет высокое значение.

Цель работы - проведение высокотемпературных лабораторных трибологических испытаний ряда перспективных материалов в диапазоне температур (300...800°C).

Для решения поставленной задачи производилась модификация поверхности трения УУКМ. Из УУКМ и ЧСЦ изготавливались образцы размером 10x10x8 мм. Обработка поверхности трения осуществлялась в среде: высокотемпературного герметика OLIMP, работоспособного до температуры 1200°C и ацетата натрия с фтористым натрием. Испытаниям были подвергнуты 4 вида образцов: УУКМ, УУКМ с поверхностью, модифицированной в среде высокотемпературного герметика OLIMP, ацетата натрия с фтористым натрием и образцы из ЧСЦ. Для проведения триботехнических испытаний был использован высокотемпературный стенд ВТМТ-1000, разработанный в ИМАШ РАН, обеспечивающий режим трения образцов по пальчиковой схеме в интервале температур 0...1000°C в условиях диапазона нормальных нагрузок 50 – 500 Н. С учетом термоизоляции узел нагрева позволяет разогревать испытываемые образцы до температуры 1000°C.

В процессе испытаний осуществлялся контроль нагрузки на испытываемые образцы, скорость вращения шпинделя установки, время испытаний и температура. Испытания образцов из УУКМ и ЧСЦ в паре трения со сталью 40X13. Площадь контакта составляла 300 мм², средний диаметр расположения образцов – 66 мм, линейная скорость – 0,16м/с, осевая нагрузка: 0,3; 0,5; 0,67; 1,0 МПа. Измерение момента трения осуществлялось от температуры 20°C до 800°C с шагом 100°C [2].

В результате испытаний было установлена зависимость коэффициента трения при нагрузке от 0,5 до 1,0 МПа и температуре от 300°C до 800°C для испытываемых материалов: УУКМ, УУКМ с поверхностью, модифицированной в среде высокотемпературного герметика OLIMP, ацетатом натрия с фтористым натрием и образцы из ЧСЦ.

С увеличением температуры испытаний с 300°C до 700°C коэффициент трения для УУКМ по стали 40X13 растет при нагрузке 0,5 МПа он составляет от 0,13 до 0,57, а при нагрузке 1,0 МПа от 0,11 до 0,47 соответственно. При нагрузке 1,0 МПа и температуре 700°C коэффициент трения по стали 40X13 ниже на 17,5%. Модифицированная поверхность трения УУКМ в среде ацетата натрия с фтористым натрием имеет более низкий коэффициент трения, чем с УУКМ в диапазоне температур 300...800°C. При температуре 800°C поверхность УУКМ, модифицированная в среде ацетата натрия с фтористым натрием имеет коэффициент трения по стали 40X13 при нагрузке 0,5МПа - 0,184, а при нагрузке 1,0МПа - 0,152.

Модифицированная поверхность УУКМ герметиком OLIMP при температуре 700°C во всем диапазоне нагрузок 0,3...1,0 МПа имеет коэффициент трения от 0,50 до 0,25 соответственно, что в сравнении с УУКМ на 25...40% ниже.

Коэффициент трения ЧСЦ по стали 40X13 при нагрузке 0,5МПа в диапазоне температур 300...700°C изменяется от 0,051 до 0,109.

Список литературы

1. Новые материалы. Колл. авторов. Под научной редакцией Ю.С. Карабасова. – М: МИСИС. – 2002 – 736 с.
2. Рошин М.Н. Влияние температуры и нагрузки на коэффициент трения при высоких температурах// Journal of Advanced Research in Technical Science. – North Charleston, USA: SRC MS, CreateSpace. – 2018. – Issue 10-1, pp..21-24.

МОДЕЛЬ АНАЛИЗА ЦИКЛИЧЕСКИХ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЙ В АВТОМАТИЧЕСКИХ КОРОБКАХ ПЕРЕДАЧ

Саламандра К.Б., Тывес Л.И.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; (ksalamandra@yandex.ru)

Увеличение числа ступеней в автоматических коробках передач (АКП) приводит к уменьшению шага между передаточными отношениями соседних ступеней и, соответственно, сближаются программные значения скоростей переключений в системе управления коробкой [1]. Последнее является одной из причин циклических переключений между двумя соседними ступенями, что приводит к дискомфорту пассажиров, снижению ресурса и повышенным нагрузкам на элементы трансмиссии [2, 3].

Высокочастотное заикливание связано с сокращением длительности процесса переключения передач в АКП. В настоящее время, благодаря применению современных фрикционных материалов, быстродействующих гидроприводов и широким возможностям систем управления, длительность переключения ступеней составляет 0,2 – 0,5 сек [2-4]. При столь малых значениях времени процесс переключения приобретает свойства ударного взаимодействия элементов трансмиссии [5, 6], возбуждающий колебания выходного вала АКП, скорость вращения которого считывается датчиком системы управления. Инерционные моменты, вызванные резким изменением скоростей элементов трансмиссии в процессе переключения ступеней, существенно превышают моменты двигателя и приведенные моменты сил сопротивления движению. При малом демпфировании величина амплитуды изменений скорости вращения выходного вала АКП может быть весьма существенной, что вызовет обратное переключение на предыдущую ступень и приведет к заикливанию, которое в свою очередь может приводить к увеличению динамических нагрузок на элементы трансмиссии.

Низкочастотное заикливание связано с невозможностью сохранить выбранную скорость движения транспортного средства в зоне близких значений скоростей переключений на соседние ступени при периодических изменениях внешних условий, например, холмистый или извилистый рельеф дороги. Вопросы диагностирования таких циклических переключений, экспериментальные данные и способы снижения вероятности их появления с помощью учета дополнительных параметров, косвенно свидетельствующих о цикличности, рассматривались в работах [7, 8].

В ИМАШ РАН разработана динамическая модель трансмиссии транспортного средства с АКП [9], в которой отражены наиболее существенные свойства: многомассовость, упругость и диссипация энергии, соотношение движущих сил и сил сопротивления движению, фиксированные программные значения скоростей выходного вала коробки передач, при которых происходят переключения.

Выведены соотношения для определения координат и скоростей элементов трансмиссии перед переключением ступеней и после него. Проведено численное моделирование процессов переключений, показывающее возможность заикливания переключений ступеней – выхода модели на режим автоколебаний выходного вала коробки передач. Модель позволяет для любых вариантов движения транспортного средства определить условия возникновения цикличности переключений ступеней и выработать меры для устранения этого явления. Модель также может быть использована при разработке систем управления переключениями в АКП и согласования режимов работы двигателя, трансмиссии и коробки при различных условиях движения транспортного средства.

Установлено, что уменьшить зону возбуждения автоколебаний выходного вала АКП можно за счет:

- увеличения жесткости выходного вала коробки и увеличения демпфирования;
- введения запаздывания на обработку сигналов с датчиков скорости выходного вала коробки передач после переключения;
- изменения соотношений моментов инерции звеньев коробки передач и трансмиссии;
- увеличения разности между скоростями соседних переключений.

Список литературы

1. Саламандра К.Б. Современные методы синтеза автоматических планетарных коробок передач // Известия МГТУ «МАМИ». - 2017. - № 3(33). - С. 49 – 55.
2. Naunheimer H., Bertsche B., Ryborz J., Novak W. Automotive Transmissions. – Springer Berlin, Heidelberg, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-16214-5>.
3. Fischer R., Küçükay F., Jürgens G., Najork R., Pollak B. The Automotive Transmission Book. Powertrain. - Springer Cham, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05263-2>.
4. Шарипов В.М., Дмитриев М.И., Зенин А.С., Маланин И.А., Смирнов И.А. К вопросу о буксовании фрикционных сцеплений при переключении передач без разрыва потока мощности в коробках передач автомобилей и тракторов // Тракторы и сельхозмашины. 2015. № 6. с. 5-9.
5. Саламандра К.Б., Тывес Л.И. Применение закона сохранения момента импульса при анализе переключений в автоматических коробках передач // Известия МГТУ «МАМИ», № 3(29), 2016. стр. 80 – 88.
6. Саламандра К.Б., Тывес Л.И. Интегральный принцип в задачах динамического анализа переключений в автоматических коробках передач // Проблемы машиностроения и надежности машин – 2017. – № 5. стр. 22 – 29.
7. Держанский В.Б., Тараторкин И.А. Адаптивное управление переключением передач гидромеханической трансмиссии на основе мониторинга технического состояния и режимов функционирования // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. - 2005. - № 14 (54). - С. 75-84.
8. Держанский В.Б., Тараторкин И.А., Рылеев А.В., Бураков Е.А. Прогнозирование цикличности переключения передач трансмиссии гусеничных машин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. - 2007. - № 25 (97). - С. 66-69.
9. Саламандра К.Б., Тывес Л.И. Циклические переключения в автоматических коробках передач // Вестник научно-технического развития. 2018. № 2 (126). С. 23-32. <http://vntr.ru/vols/2018-02/vntr2018-126-4.pdf>

МНОГОПОТОЧНЫЕ ВАЛЬНО-ПЛАНЕТАРНЫЕ КОРОБКИ ПЕРЕДАЧ

Саламандра К.Б.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; (ksalamandra@yandex.ru)

Рост числа ступеней в коробках передач транспортных средств приводит к увеличению количества используемых механизмов и их усложнению [1]. Одним из способов синтеза коробок передач, обеспечивающих широкий диапазон изменения скорости, составленных из простых механизмов и малого количества элементов управления является реализация двух важных свойств: 1) возможность передачи мощности в коробке передач по двум и более параллельным кинематическим цепям; 2) возможность включения большего количества ступеней меньшим числом элементов управления. Указанными свойствами обладают многопоточные вально-планетарные коробки передач.

Параллельное соединение через дифференциальные планетарные передачи нескольких передач с неподвижными осями зубчатых колес существенно расширяет функциональные возможности механизмов, диапазон регулирования и число ступеней. Изменение режима работы дифференциалов и управляемое включение передач с неподвижными осями позволяет последним работать как отдельно при однопоточном режиме работы дифференциала, так и параллельно с другими передачами и дифференциалами при двухпоточном режиме работы дифференциала. Дополнительным преимуществом использования соединений дифференциалов и передач с неподвижными осями является получение компактных коробок передач, составленных из простых механизмов с высоким КПД. Кроме того, в двухпоточных коробках передач нагрузки, действующие на внутренние звенья на многопоточных режимах, могут быть снижены на 50%, а в трехпоточных – более, чем на 65%.

В ИМАШ РАН разработана методика синтеза двух- [2, 3] и трехпоточных [4-6] вально-планетарных коробок передач. На рис. 1 показаны примеры синтезированных 8-ми (а) и 12-ти (б) ступенчатых двухпоточных вально-планетарных коробок передач, а на рис. 2 – 14-ти ступенчатой трехпоточной вально-планетарной коробки передач.

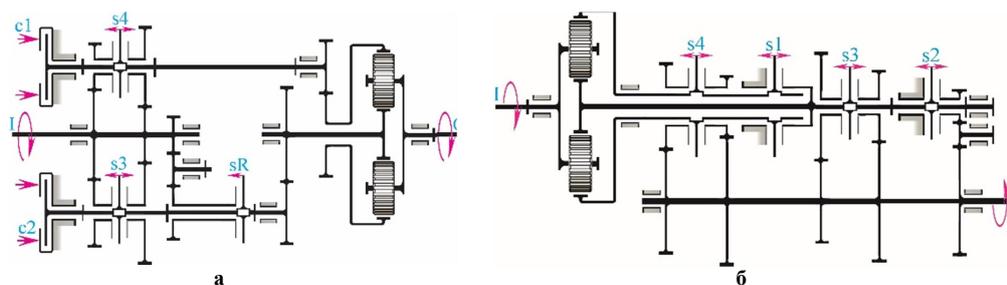


Рис. 1. Кинематические схемы двухпоточных коробок передач: а – 8-ми ступенчатая [7]; б – 12-ти ступенчатая [8].

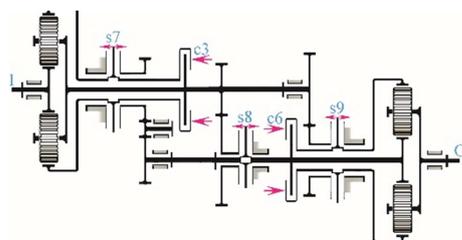


Рис. 2. Кинематическая схема 14-ти ступенчатой трехпоточной коробки передач [9].

Обозначения на рисунках: I, O – соответственно входной и выходной валы; c1, c2 – муфты управления; s1-s4 и sR – синхронизаторы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-79-10493).

Список литературы

1. Саламандра К.Б. Современные методы синтеза автоматических планетарных коробок передач // Известия МГТУ «МАМИ». - 2017. - № 3(33). - С. 49 – 55.
2. Kravnev A., Salamandra K., Raghavan M. Synthesis of the Two-Stream Transmissions. In: Power Transmissions. Mechanisms and Machine Science, vol 13. Dordrecht: Springer, 2013.
3. Саламандра К.Б. Структурный анализ и синтез двухпоточных коробок передач транспортных средств // «Вестник научно-технического развития: Интернет-журнал». № 1 (89). – 2015 – стр. 25 – 35. <http://vntr.ru/ftpgetfile.php?id=828>.
4. Саламандра К.Б. Классификация и синтез трехпоточных вально-планетарных коробок передач // Тракторы и сельхозмашины. 2018. № 1. С. 55-67.
5. Salamandra K. Transmissions with three power-flows for trucks and tractors // ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT 2018, pp. 1955-1961. DOI: 10.22616/ERDev2018.17.N010
6. Саламандра К.Б. Перспективные трехпоточные вально-планетарные коробки передач // Современное машиностроение: Наука и образование : материалы 7-й международной научно-практической конференции / Под ред. А.Н.Евграфова и А.А. Поповича.- СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. с. 720-733. DOI 10.1872/MMF-2018-61
7. Kravnev A.F., Astashev V.K., Salamandra K.B., Raghavan M. Multi-speed transmission: патент на изобретение № US 8360919. Опубликовано 29.01.2013.
8. Крайнев А.Ф., Асташев В.К., Саламандра К.Б., Орешкин В.Е. Коробка передач: патент на изобретение № RU 2391588. Опубликовано 10.06.2010. Бюл. № 16.
9. Саламандра Б.Л., Саламандра К.Б. Коробка передач: патент на изобретение № RU 2531995. Опубликовано 27.10.2014. Бюл. № 30.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВАКУУМНЫХ СМАЗОК

Самусенко В.Д.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (samusenkovd@gmail.com)

Исследовать влияние температуры на антифрикционные свойства пластичных смазочных материалов, предназначенных для использования в условиях вакуума. Способность смазочного материала обеспечивать стабильный коэффициент трения принималась как основной критерий работоспособности смазки в заданных условиях.

Были испытаны четыре образца смазки. Дисперсионной средой для смазок *1*, *2* и *3* служат перфторполиэфиры (ПЭФ). Дисперсионной фазой для *1* и *3* служат органосиликагели; для смазки *2* – политетрафторэтилен (ПТФЭ). Смазка *1* включает 0,6-0,8% органосиликагеля марки АМ-2, 2% двуокиси титана и перфторполиэфир 180. Смазка *3* имеет в своем составе растворимую в ПЭФ металлоплакирующую присадку. Смазка *4* имеет в качестве дисперсионной среды жидкость ХС-2-1ВВ и мыльный загуститель (литиевое мыло стеариновой кислоты-11% и литиевое мыло гидрорированного касторового масла – 6%), также фенилальфанафтиламин – 0,5% [1].

В данных исследованиях использована четырехшариковая машина КТ-2 [2], которая позволяет оценивать значения коэффициента трения в широком диапазоне температур. Диаметр шариков – 7,94 мм (из стали 100Cr6), нагрузка на узел трения – 110 Н, частота вращения верхнего шара – 1 об/мин. Исследование проводилось в диапазоне температур 30-300°C. Температура узла трения ступенчато повышалась со скоростью 5°C в минуту. Коэффициент трения оценивался в течение 60 с через каждые 10°C.

Результаты проведенных испытаний четырех смазок приведены на рис. 1 в виде зависимостей коэффициента трения от температуры.

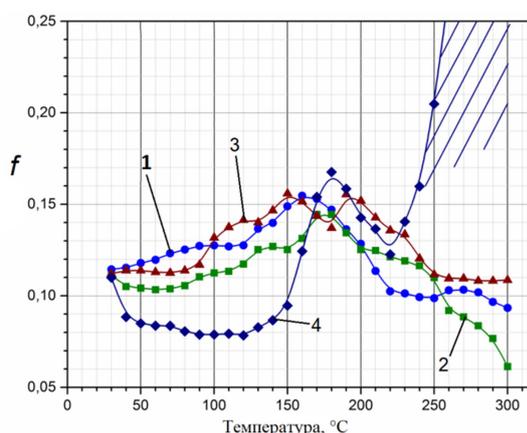


Рис. 1. Изменение коэффициента трения в зависимости от температуры.

Анализ рис. 1 показывает, что температурные зависимости трех пластичных смазок *1*, *2* и *3* сделанных на основе ПЭФ (хотя и с разными загустителями) имеют схожий характер – коэффициент трения плавно повышается от 0,10-0,12 при комнатных температурах до 0,145-0,155 при 150-170°C, а затем снижается. Причем, коэффициенты трения для смазок *1* и *3*, имеющие органосиликагелевый загуститель устанавливаются на уровне порядка 0,1, а для смазки *2*, загуститель которой представляет собой ПТФЭ, продолжает снижаться с ростом температуры испытаний и достигает при предельной температуре величины 0,06. При тех же условиях смазка *4* ведет себя как типичная поверхностно-активная среда. В диапазоне температур 20-40°C она обеспечивает низкий коэффициент трения – порядка 0,07-0,08, затем, начиная с 150°C, он быстро возрастает вследствие разрушения смазки под воздействием температуры.

Список литературы

1. Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов/М.И. Маленков, С.И. Каратушин, В.М. Тарасов. Балт. Гос. Тех. университет. – СПб, 2007 – 54 с.
2. ГОСТ 23.221-84 Обеспечение износостойкости изделий. Метод экспериментальной оценки температурной стойкости смазочных материалов при трении.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЯ КАК ОБЪЕКТА УТИЛИЗАЦИИ

Сахаров А.В., Родионова Н.А.

ИМАШ им. А.А. Благодирова РАН, Россия, Москва; (modul_lab@mail.ru).

Заключительным этапом жизненного цикла любого машиностроительного изделия является его утилизация. Под утилизацией машиностроительного изделия будем понимать процесс разрушения изделия на отдельные элементы (сборочные единицы, узлы, детали) с целью повторного использования этих элементов в качестве запасных частей для ремонта таких же изделий или получения из них сырья для изготовления новых изделий.

Утилизация машиностроительного изделия в общем случае включает:

1. Транспортировку изделия к месту утилизации;
2. Подготовку изделия к утилизации (удаление технологических жидкостей и др.);
3. Разрушение изделия на элементы (сборочные единицы, узлы, детали) выбранными методами.
4. Дефектовку элементов изделия (выявление элементов, пригодных для повторного использования или восстановления).
5. Отправку элементов изделия, пригодных для повторного использования на склад запасных частей или к месту восстановления;
6. Отправку элементов изделия, непригодных для повторного использования или восстановления на дальнейшую утилизацию.

Процесс утилизации изделия связан с определенными затратами времени, труда и материальных средств. В связи с этим важно, чтобы конструкция изделия обеспечивала возможность ее утилизации с минимальными затратами. Для этого необходимо сформулировать требования к конструкции изделия на этапе утилизации.

Утилизация машиностроительного изделия с минимальными затратами возможна, если на этапе конструирования изделия предусмотреть выполнение следующих условий:

минимальную трудоемкость разрушения изделия; минимальную себестоимость утилизации изделия; максимальное сохранение элементов изделия для повторного использования.

Для оценки приспособленности изделия к утилизации было введено понятие технологичности конструкции изделия как объекта утилизации (ИОУ). С точки зрения технологического процесса утилизации конструкцию изделия можно считать технологичной, если ее можно разрушить с наименьшей трудоемкостью и себестоимостью, максимально сохраняя элементы изделия для последующего вторичного использования.

Были определены показатели технологичности конструкции изделия как объекта утилизации и выполнены их оценка (табл.1).

Показатели технологичности ИОУ	технологично	нетехнологично
1. Количество сборочных единиц, узлов и деталей в изделии	↓	↑
2. Наличие в конструкции изделия цветных металлов, полимерных и других неметаллических материалов		
3. Наличие в конструкции изделия технологических жидкостей и масел		
4. Наличие в конструкции изделия разъемных соединений		
5. Наличие в конструкции изделия неразъемных соединений		
6. Наличие в конструкции изделия элементов, которые можно повторно использовать сразу после демонтажа		
7. Габаритные размеры изделия	↓	↑
8. Вес конструкции изделия	↓	↑

где: ↑ - высокое значение показателя; ↓ - низкое значение показателя

Таблица 1. Показатели технологичности конструкции изделия как объекта утилизации

Представленные показатели позволяют еще до начала технологического процесса утилизации изделия оценить технологичность его конструкции как объекта утилизации.

МОДУЛИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Сахаров А.В.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (klondikes@yandex.ru).

Для организации производства станков нового типа с использованием принципов модульной технологии необходимо создать соответствующую элементную базу средств технологического обеспечения изготовления деталей станков. Главным в построении этой базы являются модули поверхностей деталей, под которые разрабатываются модули средств их технологического обеспечения. Модулем поверхностей (МП) называется сочетание поверхностей, объединенных выполнением определенной служебной функции детали [1]. Существующая классификация МП насчитывает двадцать шесть видов МП, разделенных на три класса: базисные, рабочие и связующие МП.

Чтобы разработать модули технологических процессов изготовления МП надо сначала определить номенклатуру МП в деталях металлорежущих станков. С целью решения данной задачи были проанализированы металлорежущие станки различных групп и выявлены типовые детали этих станков. Приняты к рассмотрению типовые детали металлорежущих станков различных групп. Анализ их модульного строения позволил выявить модули поверхностей, характерные для деталей станков. В частности было установлено, что базисные МП в своем большинстве не отличаются от МПБ деталей других изделий. Что касается рабочих МП, то здесь характерными МП являются рабочие МП, образованные поверхностями направляющих (прямолинейных, круговых)

В качестве примера на рис. 1 показан эскиз пиноли задней бабки токарного станка в модульном исполнении.

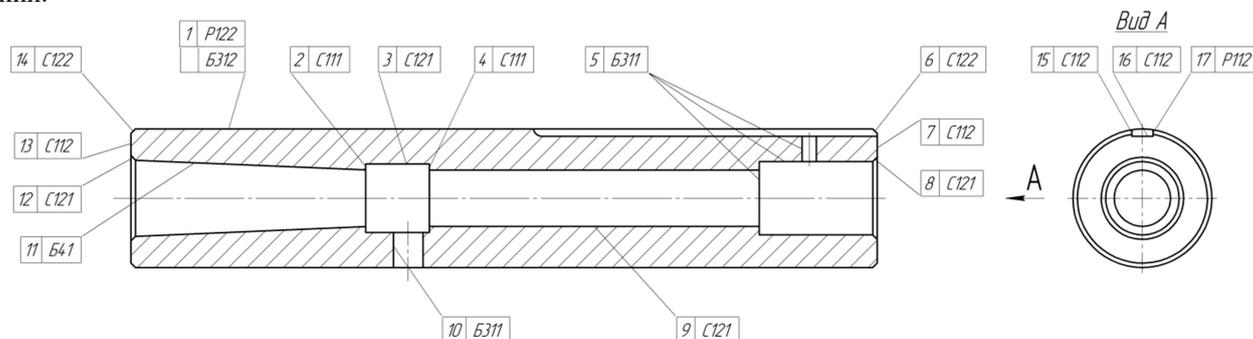


Рис. 1. Эскиз пиноли задней бабки токарного станка в виде совокупности МП.

Анализ полученной номенклатуры МП показал, что в деталях металлорежущих станков преобладают базисные и связующие МП, а доля рабочих МП незначительна. Среди базисных МП наиболее часто встречаются МПБ211 (торец и резьбовая наружная поверхность) и МПБ311 (торец и цилиндрическое отверстие), а среди связующих – МПС112 (плоская наружная поверхность) и МПС121 (цилиндрическое отверстие). Таким образом, из всего множества МП деталей металлорежущих станков доминируют МП, образованные сочетаниями поверхностей простой геометрической формы.

Вместе с тем в деталях металлорежущих станков встречается незначительное количество МП, образованных поверхностями сложной геометрической формы. Так, среди базисных МП это МПБ51 (фасонная поверхность незамкнутого контура) и МПБ52 (фасонная внутренняя поверхность вращения), среди связующих МП – МПС21 (фасонная поверхность замкнутого контура) и МПС22 (фасонная наружная поверхность вращения), а у рабочих МП – МПР22 (фасонная поверхность незамкнутого контура).

Список литературы

1. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2001. 368с.

ОСОБЕННОСТИ УПРОЧНЕНИЯ ИМПЛАНТАТОВ ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ВТ-6 С ПОМОЩЬЮ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНО-УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ

Сахвадзе Г.Ж.¹, Сахвадзе Г.Г.^{1,2}

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; (sakhvadze@mail.ru)

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Титановые сплавы ВТ-6 хорошо известны за их превосходные механические свойства и за их хорошую биологическую совместимость, делая их привлекательными в качестве имплантатов. Протезы из ВТ-6 тазобедренного сустава успешно применяются в последнее время. В основном, цель хирургического введения искусственного тазобедренного сустава состоит в том, чтобы максимально восстановить кинематику опорно-двигательной системы пациента, выдерживая при этом естественные физиологические нагрузки, минимизировав износ и трение в суставе, избегая вредные реакции со стороны организма.

Выбранная форма тазобедренного сустава – стандартный протез Чарнли (Charnley), геометрические особенности которого представлены на рис. 1. Геометрия протеза сильно влияет на его биомеханические характеристики, а также и на боисовместимость [1].

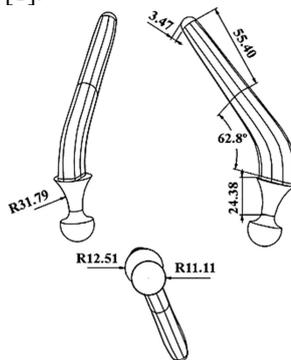


Рис. 1. Геометрические особенности протеза тазобедренного сустава Чарнли (Charnley). Размеры показаны в мм.

Предложенная в настоящей работе стратегия реализации технологии лазерно-ударно-волновой обработки (ЛУВО) протезов тазобедренного сустава из ВТ-6 в конечноэлементной модели состоит из двух шагов [2]: 1) вычисляются собственные деформации, вызванные применением технологии ЛУВО путем решения явной задачи динамического анализа посредством МКЭ-пакета LS-DYNA; 2) далее решается неявная задача ANSYS, где полученные на шаге 1 собственные деформации вводятся в качестве входных данных, и проводится упругое моделирование задачи для определения полных остаточных напряжений, вызванных технологией ЛУВО.

Вычислительные трудности, возникающие в аналогичных задачах, были преодолены путем использования метода собственных деформаций (МСД) [3]. Были вычислены сжимающие остаточные напряжения (СОН), возникающие при ЛУВО в протезе тазобедренного сустава из титанового сплава ВТ-6. Полученные результаты показали, что технология ЛУВО в протезах тазобедренного сустава может сгенерировать СОН, больше 600 МПа, при этом глубина залегания СОН – более 1,60 мм, что более чем в 4 раза больше, чем применяющаяся в настоящее время с целью их упрочнения технология дробеструйной обработки [3]. Показано, что технология ЛУВО может быть успешно применена для упрочнения протезов тазобедренных суставов с целью создания в них глубоких СОН, существенно повышая их прочность, долговечность, а также износо- и коррозионостойкость.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», Соглашение о предоставлении субсидии №14.607.21.0191 от 26.09.2017 г., проект RFMEFI60717X0191.

Список литературы

1. Sakhvadze G.Zh. Finite element modeling of the technology of multiple laser shock processing of materials with use of the eigenstrains method // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2018, Vol. 47, No. 5, pp. 469–474. DOI: 10.3103/S1052618818050114.
2. Sakhvadze G.Zh. Features of Finite Element Modeling of Residual Stresses Arising in Material under Laser Shock-Wave Processing Using the Intrinsic Deformations Method // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2018, Vol. 47, No. 4, pp. 373–379. DOI: 10.3103/S105261881804012X.
3. Sakhvadze G. Zh., Kavtaradze R.Z., Nikabadze M.U. Eigenstrain Modeling of Laser-Shock Processing of Materials // Russian Engineering Research. - 2018. - Vol. 38. № 10. pp. 755–760. DOI: 10.3103/S1068798X18100143.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СОБСТВЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИИ ЛАЗЕРНО-УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Сахвадзе Г.Ж.¹, Сахвадзе Г.Г.^{1,2}, Киквидзе О.Г.³

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; (sakhvadze@mail.ru)

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Государственный университет им. Ак. Церетели, Кутаиси, Грузия

Представлена практическая реализация в конечноэлементных пакетах LS-DYNA и ANSYS сравнительно нового подхода для решения задач определения остаточных напряжений при использовании технологии лазерно-ударно-волновой обработки (ЛУВО) материалов. Данный подход основан на концепции собственных деформаций. Термин «собственные деформации» впервые ввел Рейснер (Reissner) в 1931 году. Под этим термином он понимал неупругие деформации, соответствующие самоуравновешенным остаточным напряжениям. В 1991 году Мура (Mura) предложил более общее определение собственной деформации (eigenstrain), принятое в современной научной литературе - это могут быть неупругие деформации любой природы (температурные, пьезоэлектрические, пластические, ростовые, фазовые и др.). Использование термина собственной деформации позволяет исследователю абстрагироваться от природы возникновения той или иной пластической деформации [1].

Предложенная стратегия реализации технологии ЛУВО в конечноэлементной модели состоит из двух шагов [2]: 1) вычисляются собственные деформации, вызванные применением технологии ЛУВО путем решения явной задачи динамического анализа посредством МКЭ-пакета LS-DYNA; 2) далее решается неявная задача ANSYS, где полученные на шаге 1 собственные деформации вводятся в качестве входных данных, и проводится упругое моделирование задачи для определения полных остаточных напряжений, вызванных технологией ЛУВО (рис. 1).

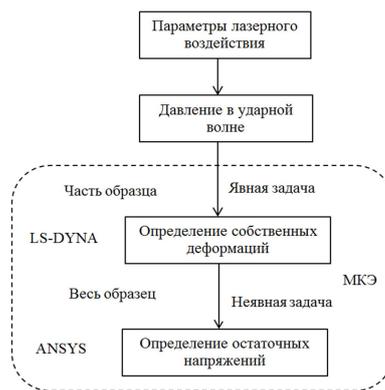


Рис.1. Стратегия численного моделирования.

По полученным для титанового сплава ВТ6 результатам можно отметить следующую закономерность: сжимающие остаточные напряжения (СОН) на поверхности заметно возрастают (от 510 МПа до 830 МПа) с увеличением количества импульсов. Кроме того, глубина зоны сжатия увеличивается от 1,26 мм до 1,60 мм при увеличении количества импульсов от 1 до 4. Естественно, для того, чтобы компенсировать увеличение поверхностных СОН, происходит и увеличение пиковых растягивающих остаточных напряжений (РОН) вглубь материала, поднявшись от 180 до 275 МПа между первым и четвертым импульсами. Глубина расположения такого пика также увеличивается от 2 до 2,6 мм (при увеличении количества импульсов от 1 до 4).

Показано, что технология ЛУВО может быть успешно применена для упрочнения ответственных узлов из конструкционных материалов с целью создания в них глубоких СОН, существенно повышая их прочность, долговечность, а также износо- и коррозионостойкость [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», Соглашение о предоставлении субсидии №14.607.21.0191 от 26.09.2017 г., проект RFMEFI60717X0191.

Список литературы

1. Сахвадзе Г.Ж., Кавтарадзе Р.З., Никабадзе М.У. Использование метода собственных деформаций при моделировании технологий однократной и многократной лазерно-ударно-волновой обработки материалов // Вестник машиностроения. 2018. № 7. С. 41-46.
2. Sakhvadze G. Zh., Pugachev M.S. Kikvidze O.G. Two-Sided Laser Shock Processing // Russian Engineering Research. - 2017. - Vol. 37. № 1. pp. 40-45. DOI: 10.3103/S1068798X17010191.
3. Сахвадзе Г.Ж., Гаврилина Л.В., Киквидзе О.Г. Влияние эффекта перекрытия лазерных пятен на остаточные напряжения при лазерно-ударно-волновой обработке материалов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 3. С. 77-84.

НОВЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ МАССАЖЕРОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НА БАЗЕ ТРЕУГОЛЬНОГО И ОКТАЭДРАЛЬНОГО САМОПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ МОДУЛЕЙ

Саяпин С.Н.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (E-mail: S.Sayapin@rambler.ru)

Цель работы – разработка новых принципов построения малогабаритных переносных адаптивных мобильных реабилитационных плоского и пространственного роботов-манипуляторов параллельной структуры модульного типа в виде активного треугольника с 3 DOF («Триангель») [1, 2] и активного октаэдра с 12DOF («Октаэдральный додекапод») [3, 4]. При этом «Триангель» и «Октаэдральный додекапод» способны работать автономно без присутствия массажиста и предназначены соответственно для автоматизации процессов баночного массажа спины и груди и массажа верхних и нижних конечностей, включая массаж локтевых и коленных суставов, а также шеи пациента. При подключении «Триангеля» и «Октаэдрального додекапода» к сети Интернет может быть организована on-line связь с массажистом для оперативного контроля за проведением массажа и принятия решений при возникновении нештатных ситуаций. Ниже представлено описание «Триангеля» и «Октаэдрального додекапода».

На рис. 1 показаны структурная схема «Триангеля» (а), схемы проведения скользящего баночного массажа (б, в), локального вакуум-массажа и массажа сдвижением и растяжением мышц (г), физическая модель «Триангеля» (д) и ее вертикальные массажные движения (е, ж).

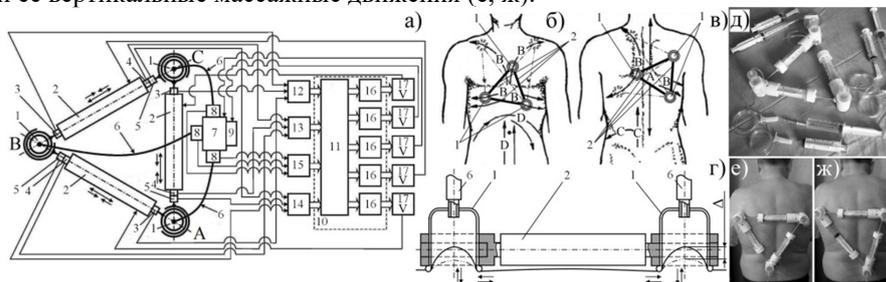


Рис. 1: 1 - массажная вакуумная банка; 2 - линейный привод; 3, 4, 5 - датчики силы, относительного перемещения и скорости; 6 - гибкий шланг; 7 - воздухораспределитель; 8 - датчик давления; 9 - вакуумный насос; 10 - система управления; 11 - компьютер с АЦП и ЦАП.

«Октаэдральный додекапод» (ОД) представляет собой пространственный механизм параллельной структуры в виде активного октаэдра ABCD (рис. 2), ребра которого выполнены в виде стержней с линейными приводами 1, концы которых соединены в вершинах 2 с помощью сферических или эквивалентных им шарниров. Каждый из линейных приводов снабжен датчиками силы, относительного перемещения и относительной скорости, и изменяет свою длину по командам от системы управления. При этом датчики силы линейных приводов фронтальной и тыльной граней выполнены в виде тензометрических пластин 3 с возможностью образования адаптивных схватов робота-манипулятора.

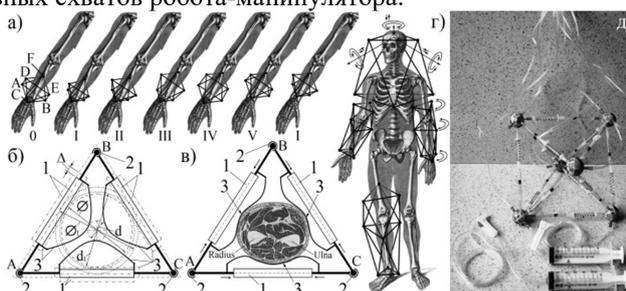


Рис. 2. Циклограмма перемещения ОД вдоль предплечья (а); грань ABC со схватами (б) и обхват гранью ABC предплечья (в); схемы установки ОД на теле пациента (г); физическая модель ОД.

Список литературы

1. Саяпин С.Н., Саяпина М.С. Перемещающийся массажер и способ осуществления массажа с его помощью. Патент РФ на изобретение №2551939. Заявитель ИМАШ РАН. Оpubл. 10.06.2015, Бюл. № 16.
2. Саяпин С.Н., Саяпина М.С. Самоперемещающийся многофункциональный вакуумный массажер на базе активного треугольного модуля параллельной структуры//Мед. техника. 2017. № 2. С. 52-55.
3. Саяпин С.Н. Адаптивный мобильный пространственный реабилитационный робот-манипулятор и способ организации движений и диагностики пациента с его помощью. Патент РФ на изобретение №2564754. Заявитель ИМАШ РАН. Оpubл. 10.10.2015, Бюл. № 28.
4. Саяпин С.Н. Принцип построения адаптивного мобильного пространственного реабилитационного робота-манипулятора на основе октаэдрального додекапода//Мед. техника. 2017. № 4. С. 50-53.

АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ДЕСТРУКЦИИ СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ ПРИ ПОВТОРНО СТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Северов П.Б.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (alpinprom@yandex.ru)

Целью данной работы является изучение накопления механических повреждений слоистых углепластиков в ходе повторно статических нагружений с приращением уровня нагрузки в каждом последующем цикле нагружения. Регистрация деструкции материала в качестве потока дискретных актов локальных разрушений различной интенсивности, происходящих на различных масштабных уровнях, производилась акустико-эмиссионным методом. В работе [1] выявлена синхронность в качественном поведении рассеяния механической энергии и накопления энергии акустико-эмиссионных (АЭ) импульсов. Это позволяет оценивать степень целостности слоистых углепластиков по акустико-эмиссионному отображению процессов их неупругого деформирования и разрушения.

Корсетные образцы 1, 2 и 3, вырезанные из однонаправленного многослойного углепластика под углом 0° к направлению укладки волокон, растягивались и доведены до разрушения на испытательной машине с управлением по перемещению активного захвата «рис. 1». По результатам АЭ анализа на «рис. 2» представлены соответствующие кривые степени целостности образцов, доведенных до разрушения. При квазистатическом нагружении образца 1 наблюдается однозначная зависимость его степени целостности от уровня приложенных напряжений. При повторно статических нагружениях один и тот же уровень напряжения может достигаться несколько раз. Например, при испытании образца 3 на пути увеличения нагрузки уровень напряжения $\sigma_x = 256$ МПа достигается 5 раз в циклах нагружения 5 – 9 «рис. 3». С каждым циклом нагружения деструкция материала образца увеличивается, степень целостности уменьшается «рис. 4».

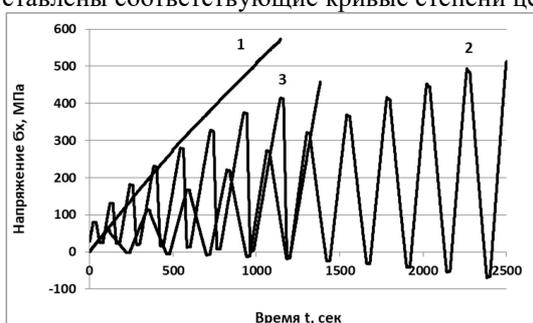


Рис. 1. Диаграммы квазистатического (1) и повторно статических (2, 3) нагружений

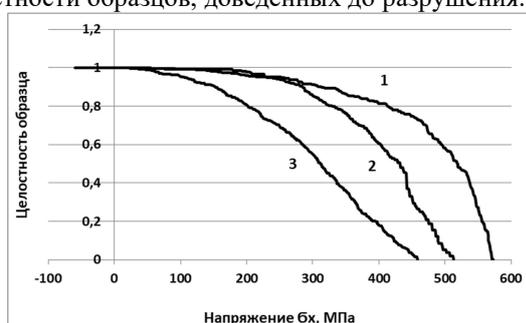


Рис. 2. Кривые степени целостности образцов в зависимости от напряжения

При повторно статическом нагружении образца 1 наблюдается однозначная зависимость его степени целостности от уровня приложенных напряжений. При повторно статических нагружениях один и тот же уровень напряжения может достигаться несколько раз. Например, при испытании образца 3 на пути увеличения нагрузки уровень напряжения $\sigma_x = 256$ МПа достигается 5 раз в циклах нагружения 5 – 9 «рис. 3». С каждым циклом нагружения деструкция материала образца увеличивается, степень целостности уменьшается «рис. 4».

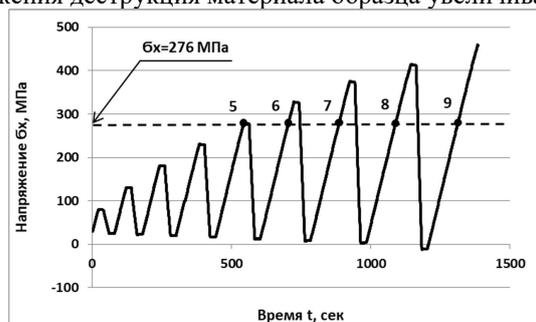


Рис. 3. Диаграмма повторно статического нагружения образца 3

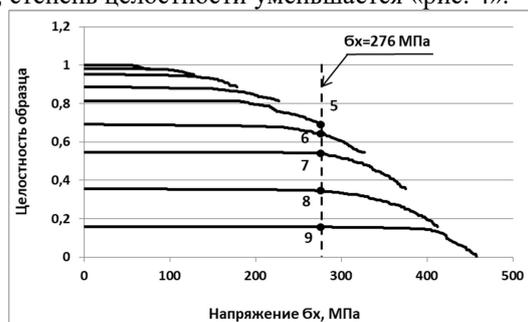


Рис. 4. Степень целостности образца 3 при напряжении 276 МПа в циклах нагружения 5-9

Кривые степени целостности строятся в зависимости от одного из параметров эксплуатации, определяемого в качестве наиболее важного. В данном случае таким параметром выступает номинальное напряжение σ_x , но подход принципиально не изменяется при выборе параметром эксплуатации времени или количества циклов нагружения.

Список литературы

1. Северов П.Б. Оценка механического состояния слоистых углепластиков по акустико-эмиссионному отображению процессов неупругого деформирования и разрушения // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2016. №4. С.85-92.

ЧИСЛОВОЕ ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СТАНКАМИ: ВОЗНИКНОВЕНИЕ, ЭТАПЫ СТАНОВЛЕНИЯ, НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ

Серков Н.А., Пась О.В.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (serkov1943@mail.ru).

Конкурентоспособность изделий ракетно-космической техники (РКТ) в значительной степени зависит от уровня совершенства технологического оборудования, в частности, многокоординатных станков с ЧПУ.

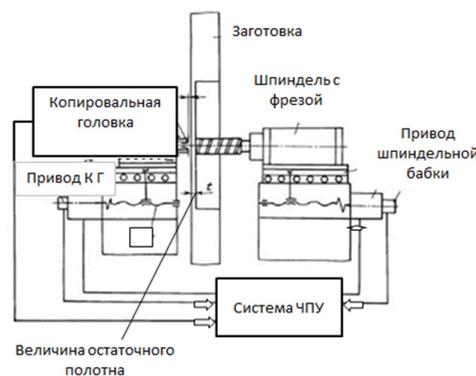
В конструкциях несущих корпусов изделий РКТ используются «вафельные оболочки».

Технология получения вафельного фона относится к классу уникальных и требует применения специальных фрезерных станков, оснащенных системами числового программного управления (ЧПУ).

В докладе рассмотрена история создания станков с ЧПУ: 1) предпосылки возникновения ЧПУ из систем управления по копиру, 2) этапы совершенствования ЧПУ в США и в России, 3) предпосылки возникновения числового программно-копировального управления (ЧПКУ) для обработки изделий с вафельным фоном и 4) направления совершенствования этого вида управления станками. Специфика вафельной конструкции обечайки изделия РКТ (рисунок, а) [1] - это тонкостенное полотно с ребрами, образующими ячейки, и выполненными с полотном, как единое целое.



а)



б)

Особенностью обечайки изделий РКТ являются большие размеры и тонкостенность. Это вызывает трудности обеспечения заданной производительности и точности изготовления. Одним из направлений решения этой проблемы есть применение ЧПКУ на специальных фрезерных станках. На рисунке, б) представлена схема станка [2], на котором в процессе изготовления детали фрезерная головка обрабатывает дно кармана, отслеживая при этом противоположную поверхность детали. При таком способе обработки достигается постоянство величины остаточного полотна, являющегося важной характеристикой обрабатываемой детали. Стратегия обхода кармана задается программой, а размер остаточного полотна обеспечивается копированием противоположной поверхности обрабатываемой детали.

Характерным отличием применения программно-копировального управления для обработки обечаек вафельной конструкции является то, что в нем в качестве копира используется одна из поверхностей самой обрабатываемой детали. Это новый способ программного управления, он заключается в сочетании числового программного управления с копированием одной из поверхностей обрабатываемой детали, что позволяет повысить точность и эффективность обработки крупных технологически-нежестких деталей сложной формы.

1. Числовое программное управление технологическим оборудованием является одним из основных средств автоматизации машиностроительного производства, включая ракетно-космическую отрасль.

2. Металлорежущие станки с ЧПУ, прошли богатый путь развития от станков с достижимой точностью контурной обработки шаблонов $\pm 0,1$ мм до современных 5 координатных станков с ЧПУ, обеспечивающих точность контурной обработки $\pm 0,012$ мм [3].

3. В числовом программном управлении станками сформировалось новое направление: программно-копировальное управление, позволяющее проводить высокопроизводительную обработку «вафельного фона» обечаек.

4. Необходимо дальнейшее развитие научно-исследовательских работ, направленных на создание эффективных алгоритмов управления станками с системами ЧПКУ с повышенными точностными возможностями обработки крупных технологически-нежестких деталей сложной формы.

Список литературы

1. Зайцев А.М. Разработка направлений повышения эффективности технологической подготовки производства деталей и узлов ракетно-космической техники: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 166 с
2. Котов А.Н., Чуйкин С.А., Милехин Е.С., Макаров Ю.Н., Коротков А.Н., Володина С.А. Металлообрабатывающий станок / патента RU 2397049 МПК В23С3/00, публикация патента: 20.08.2010, подача заявки: 29.01.2009 <http://bd.patent.su/2397000-2397999/pat/serv1/servletd7c1.html> (дата обращения: 07.08.2018).
3. Серков Н.А. Точность многокоординатных машин с ЧПУ: Теоретические и экспериментальные основы. -М.: ЛЕНАНД, 2015. - 304 с.

РАЗРАБОТКА «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА» ВИБРАЦИИ ПОДШИПНИКА КАЧЕНИЯ

Скворцов Д.Ф.¹, Лебедев С.В.²

¹ООО «ДИАМЕХ 2000», Москва, Россия (diamech@mail.ru)

²Национальный Исследовательский Университет «Московский Институт Электронной Техники» (НИУ МИЭТ), Москва, Россия

Тезисы доклада. В докладе представлены результаты исследования возможностей создания «интеллектуального датчика» вибрации для автоматической оценки технического состояния подшипника качения. На сегодняшний день для периодической оценки технического состояния подшипников качения применяются дорогостоящие универсальные переносные виброизмерительные приборы, использование которых требует от пользователя высокой квалификации и больших временных затрат на выполнение измерений и анализ результатов. Такой подход не позволяет предотвращать развитие внезапных отказов и тормозит повсеместное внедрение вибродиагностики в машины и механизмы. В дополнение к существующим системам периодического вибрационного мониторинга технического состояния авторами доклада предлагается применение специализированной Сверхбольшой Интегральной Схемы (СБИС), конструктивно объединенной с акселерометром в одном корпусе. СБИС содержит все необходимые блоки для подключения акселерометра, датчика оборотов, температуры; а также имеет интерфейсы для обмена информацией с внешними устройствами сбора, хранения и анализа сигналов. На СБИС установлена экспертная система, которая позволяет автоматически принимать решение о техническом состоянии контролируемого подшипника в реальном времени.

В докладе представлены результаты тестирования макета СБИС на нескольких подшипниках качения одного типа, имеющих различное техническое состояние. Измерения подшипников выполнялись на станке специальном вибродиагностическом СП-180М. Приведен сравнительный анализ результатов измерения «интеллектуального датчика» с классическим виброанализатором, предложены диагностические симптомы и правила принятия решений. Предложена область применения интеллектуальных датчиков.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России. ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы»
Соглашение о предоставлении субсидии № 14.581.21.0030.
Уникальный идентификатор проекта RFMEFI58117X0030.

СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ВИБРАЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ПОТ

Скворцов О.Б.^{1,2}

¹ИМАШ РАН, Москва, Россия, (skv@balansmash.ru);

²Научно-технический центр «Завод Балансировочных машин», Москва, Россия.

Системы вибрационного мониторинга (СВМ) предназначены для выполнения дистанционного контроля вибрационного состояния оборудования, диагностики исправностей и прогнозирования остаточного ресурса. СВМ также необходимы для реализации аварийной защиты агрегатов в условиях быстрого развития опасных ситуаций. В соответствии с рекомендациями нормативной документации для такого широкого класса оборудования, как роторные агрегаты вибрационный контроль ограничивается измерением интенсивности вибрации, в большинстве случаев по среднему квадратичному значению скорости. При разработке методов диагностирования и прогнозирования оборудования по вибрационному состоянию можно выделить три основных подхода. В соответствии с первым на основе эмпирических и статистических данных формируется набор диагностических признаков, контроль за изменениями которых позволяет выявить зарождающиеся и развивающиеся дефекты, для которых по тренду параметров формируется оценка остаточного ресурса. При втором подходе оценка остаточного ресурса строится как прогноз возникновения и развития повреждений для используемых в оборудовании материалов с учетом действующих на них нагрузок. В основу данного подхода заложены методы прогнозирования по вероятностным зависимостям для $S-N$ диаграмм. Возможен также подход, основанный на использовании обучаемых нейронных сетей, для которых в явном виде не формулируется описание процесса постановки диагноза. Задачи противоаварийной защиты (ПАЗ), хотя и имеют существенные особенности (меньшие требования к разрешающей способности и точности, при необходимости повышенной надежности и сокращенной времени отклика на возникновение аварийных ситуаций), желательно решать в рамках единой системы вибрационного мониторинга. Построение высоконадежной системы вибрационного мониторинга, решающей весь круг перечисленных задач требует увеличения объема собираемых на объекте данных о его вибрационном состоянии, эффективных передачи, хранения и анализа данных в центрах обработки при естественном желании сокращения затрат на СВМ. Реализующие такие возможности сбора и обработки информации СВМ реализуют с применением принципов промышленного интернета вещей (IIoT). Технологии IIoT можно рассматривать, как версию решений SCADA. Получение дополнительных преимуществ обеспечивается при одновременном использовании в СВМ специализированных решений: адаптируемые в процессе работы структуры сбора вибрационных сигналов, которые позволяют более полно и оптимально использовать возможности измерения сигналов в расширенном частотном и динамическом диапазонах [1-4]; учет пространственного характера процессов вибрации, позволяющий при использовании одного набора датчиков максимально приблизиться к получению полного объема диагностической информации и обеспечить повышенную достоверность работы при выполнении противоаварийной защиты [5, 6]; а также обеспечить возможность использования малобюджетных многокомпонентных датчиков вибрации [7], что в значительной степени позволяет приблизиться к такому решению. Снижение затрат на такую систему может быть обеспечено не только за счет применения MEMs датчиков вибрации, но и использованием для их подключения модификаций интерфейсов, аналоговичных получившим широкое применение IEPЕ, но более экономичных и надежных [8, 9]. Применение перечисленных инновационных решений позволяет принципиально расширить возможности СВМ [10, 16].

Список литературы

1. Патент RU 2644620, кл. G01M 7/02, БИ № 5. 2018. - 14 с.
2. Патент RU 2658569, кл. G01M 1/00, БИ № 18. 2018. - 14 с.
3. Патент RU 2658570, кл. G01M 1/00, БИ № 18. 2018. - 13 с.
4. Патент RU 2658575, кл. G01P 3/36, БИ № 18. 2018. - 10 с.
5. Патент RU 2658568, кл. G01P 15/09, БИ № 18. 2018. - 22 с.
6. Патент RU 2658577, кл. G01H 11/06, БИ № 18. 2018. - 26 с.
7. Патент RU 2658565, кл. G01P 15/08, БИ № 18. 2018. - 21 с.
8. Патент RU 2642807, кл. G08C 19/02, БИ № 3. 2018. - 23 с.
9. Патент RU 2646311, кл. G01C 19/02, БИ № 7. 2018. - 11 с.
10. Скворцов О.Б. Вибрационная прочность: мониторинг, диагностика, защита // Научные чтения им. чл.-корр. РАН И.А. Одингера "Механические свойства современных конструкционных материалов". М.: 6-7 сент. 2018. Сборник материалов. ИМЕТ РАН 2018. - С.138-139.
11. Скворцов О.Б. Структура каналов измерения вибрации // Сборник докладов конференции «Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике» ФТИ Московского технологического университета. — М.: МИРЭА, 2018. — С.492-497
12. Скворцов О.Б. Вибрационный мониторинг компрессорного оборудования // Компрессорная техника и пневматика, № 6. 2017. - С.33-38.
13. Скворцов О.Б. Анализ вибрационных сигналов при решении задач балансировки роторов // Автоматизация. Современные технологии. № 2. 2018. - С.60-66.
14. Скворцов О.Б. Перспективы развития нормативной базы и расширения вибрационного мониторинга роторного оборудования // Электрические станции. № 8. 2017. С. 46-53.
15. Скворцов О.Б. Системы противоаварийной защиты по вибрации роторного оборудования // Системы управления полным жизненным циклом высокотехнологичной продукции в машиностроении: новые источники роста : Всероссийская научно-практическая конференция: материалы конференции / Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — 149-153
16. Скворцов О.Б. и др. Разработка функционала каталога узлов и механизмов, разработка пользовательского функционала для создания и редактирования объектов БД различных иерархических уровней // Отчет по НИОКР. Этап 2 темы «Разработка платформы IIoT для мониторинга и управления технической эксплуатацией энергетического оборудования по его фактическому состоянию» № АААА-Б18-218071990014-8 инв. БП-829/18. 2018. – 87 с.

ОСОБЕННОСТИ КИНЕМАТИКИ МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С КРУГОВОЙ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ

Скворцов С.А., Глазунов В.А., Алешин А.К., Рашоян Г.В., Чернецов Р.А., Шалюхин К.А.
ИМАШ РАН, г. Москва, (1691skvorcov@mail.ru).

Рассмотрены особенности решения задач о положениях выходного звена для механизмов параллельной структуры с несколькими кинематическими цепями и круговой направляющей, с учетом ряда геометрических ограничений, связанных с реализацией положения и определения границ.

Ключевые слова: механизмы параллельной структуры, круговая направляющая, выходное звено.

Рассматриваются механизмы параллельной структуры с несколькими кинематическими цепями и круговой направляющей с двигателями, установленными на основании, что позволяет обеспечить полный поворот вокруг вертикальной оси. Данное свойство механизмов весьма важно для тренажеров, имитирующих движение транспортных средств.

Проведен кинематический анализ новых синтезированных механизмов параллельной структуры с несколькими кинематическими цепями и круговой направляющей, с учетом ряда геометрических ограничений. Для нахождения рабочей зоны рассмотрены решения задач о положениях и приведены критерии определения особых положений для этих механизмов (рис. 1-2). В работе рассмотрены особенности численного решения таких задач. Полученные таким образом рабочие зоны позволяют выбирать механизмы для определенных задач.

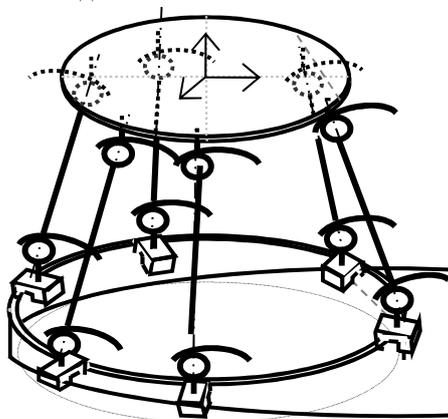


Рис. 1. Механизм параллельной структуры с шестью кинематическими цепями и круговой направляющей

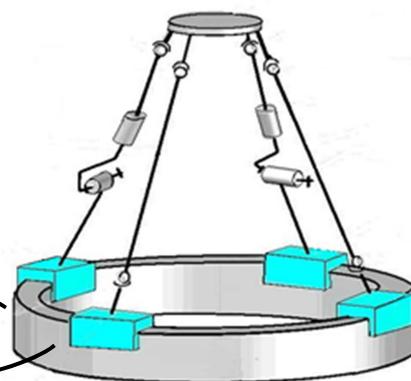


Рис. 2. Механизм параллельной структуры с четырьмя кинематическими цепями и круговой направляющей

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ АВИАЦИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

Скворцов С.А., Филиппов Г.С., Глазунов В.А., Чернецов Р.А.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

Важной задачей авиационной промышленности является проблема снижения уровней шумов, тепловых излучений авиационных двигателей. В условиях высоких температур, воздействия направленных потоков газа и плазмы, снижение акустических шумов и инфракрасного излучения является сложной технической задачей. Для ее решения существует ряд технических решений, основой которых является изготовление центрального тела сопла в виде сложной трехмерной структуры. Она состоит из множества концентрических поверхностей, полостей, объединенных друг с другом перемычками различных толщин. Применение подобных конструкций допускает значительное снижение шума и излучения, но обладает недостатками - дороговизной производства и высокой массой изделий в условиях сохранения требований к прочности и внешней поверхности материала изготавливаемой детали.

Применение роботизированных систем параллельной структуры с использованием аддитивной технологии может оказаться весьма эффективной в качестве технологии изготовления центрального тела сопла либо нанесения специальных покрытий на него.

Для решения данной проблемы, был синтезирован механизм параллельной структуры, позволяющий значительно уменьшить перечисленные недостатки, а также существенно повысить прочность, надежность, антикоррозионные свойства изготавливаемого трехмерного объекта посредством применения аддитивной технологии высокой точности (рис. 1) [1].

Ферменная конструкция механизма, где двигатели располагаются на основании, обеспечивает высокую точность позиционирования рабочего инструмента, снижение влияния вибраций двигателей на выходное звено, увеличение возможностей силовой нагрузки.

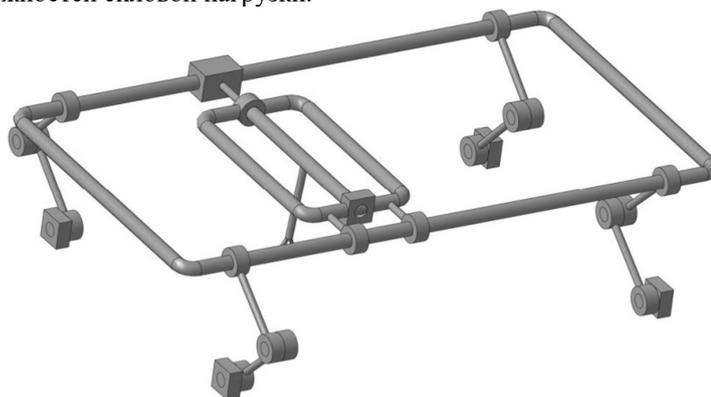


Рис. 1. Схематичное изображение механизма параллельной структуры с пятью степенями свободы.

Разработанный манипулятор параллельной структуры, имеющий пять степеней свободы, содержит основание, выходное звено, подвижную платформу, установленную на платформе каретку продольного перемещения с закрепленным на ней выходным звеном, а также кинематические цепи, связывающие основание с кареткой. Платформа и каретка выполнены прямоугольной формы из полых труб и сочлены между собой с взаимно перпендикулярным расположением длинных сторон. Кроме того, платформа соединена с основанием посредством установленных попарно на длинных сторонах платформы четырех кинематических цепей, каждая из которых содержит жестко установленный на основании вращательный привод и два шарнирно соединенных между собой передаточных звена, первое из них закреплено на оси привода, а второе шарнирно сопряжено с длинной стороной платформы, причем оси вращения приводов и поворота шарнирных соединений кинематических цепей параллельны направлению длинных сторон платформы. Каретка установлена на платформе с возможностью движения вдоль платформы и вращения вокруг собственной оси с помощью комбинированного двигателя и двух скользящих шарниров, расположенных на противоположных длинных сторонах платформы соответственно, при этом соединение каретки с комбинированным двигателем осуществлено посредством центральной оси, а с поворотными шарнирами - двумя перемычками.

Список литературы

1. Филиппов Г.С., Глазунов В.А. Перспективы применения механизмов параллельной структуры в аддитивных технологиях изготовления центрального тела сопла турбореактивного двигателя, высокоточных хирургических манипуляциях, зондовой диагностике плазменных потоков // Проблемы машиностроения и автоматизации, 2018. Т.3. СС.121-128.

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ НЕИНВАЗИВНОГО СЕНСОРНОГО СМАРТПРОТЕЗА

Скворчевский А.К., Соловьев А.А., Сергеев А.М., Ковалев Н.С.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (aa.solovjev@yandex.ru).

В мировой науке и практике, относимых к повышению качества жизни человека, существенное место занимает разработка протезов конечностей, приближенных по своим возможностям к природным органам человека [1-8].

Одним из ведущих направлений в этой области является создание устройств, обладающих свойством воспринимать и передавать информацию в процессе контакта с различными объектами предметной среды. Тактильное взаимодействие является здесь определяющим. Соответственно, направленность проводимых работ связана с возможностью искусственных органов возвращать человеку чувство осязания, которого он был лишен в результате травмы или болезни.

Цель исследования - разработка протеза кисти с системой искусственного осязания, имитирующей реакцию на стимулы механорецепторов утраченных дистальных фаланг пальцев при участии сохраненного плечевого отдела свободной верхней конечности (СВК) человека.

Основой разработки является принцип однородности механорецепторов кожных покровов СВК. К первым относятся: свободные нервные окончания, диффузные окончания Руффини и инкапсулированные окончания - тельца Фатер-Пачини, Мейсснера, Краузе.

Рабочая гипотеза основана на предположении, что сегмент плеча первичной сенсорной зона коры головного мозга, получающий сигнал от «своих» механорецепторов, при соответствующей реабилитационной методике может дополнительно выполнять функции сегмента пальцев руки. Реабилитация в данном случае понимается как «научение» сегмента плеча сенсорной зоны способности замещать пальцевые сегменты, расположенные по структуре 4+1.

Разрабатываемое устройство видоизменяет, но не меняет в корне механизм воздействия на механорецепторы, что позволяет избежать инвазивных методов протезирования, влекущих, в том числе на стадии эксперимента, существенные риски для здоровья пользователя.

Устройство имеет двухсекционную схему: искусственную кисть с чипированным патроном и плечевую стимульную манжету. Сенсбилизация искусственных пальцев протеза осуществляется при помощи миниатюрных пьезоэлектрических датчиков давления и вибрации. Учитывая сложность комплекса движений человеческой руки, передача сигнала датчиков происходит на беспроводной основе по принципу bluetooth. Для скорейшей адаптации выбранного сегмента сенсорной коры в стимульной манжете используется «принцип пианино», при котором на рецепторы плеча приходится воздействие пяти последовательно расположенных механических раздражителей-стимулов.

Результатом работы, выполняемой в рамках проводимых в ИМАШ РАН исследований по мехатронике, станет полноценная модель неинвазивного сенсорного смартпротеза кисти руки, позволяющая людям с ограниченными возможностями в значительной мере компенсировать утрату ампутированного органа и адаптироваться к различным условиям социальной сферы.

Список литературы

1. Воробьев Е.И., Скворчевский А.К., Сергеев А.М. Проблемы создания алгоритмов управления антропоморфными биопротезами рук и ног // Медицина и высокие технологии. - № 1. – 2012. – С. 7-12.
2. Скворчевский К.А., Сергеев А.М., Аментьев А.А., Скворчевский А.К., Гудушаури Э.Г. Медицинская робототехника для возмещения утраченных функций больных на квантовых и радиоэлектронных элементах, имплантируемых в биопротезы // Медицина и высокие технологии. - № 4. – 2015. – С. 45-54.
3. Скворчевский А.К., Воробьев Е.И., Сергеев А.М., Ковалев Н.С. Информационные модели антропоморфных протезов с искусственными мышцами на основе гидролазерного эффекта и алгоритмы управления // Медицина и высокие технологии. - № 2. – 2017. – С. 63-71.
4. Воробьев Е.И., Скворчевский А.К., Сергеев А.М., Ковалев Н.С. Алгоритмы управления ориентацией кисти антропоморфного протеза руки с искусственными мышцами // Медицина и высокие технологии. - № 2. – 2017. – С. 72-77.
5. Awad M. I., Abouhossein A., Dehghani-Sanij A. A., Richardson R. and other. Towards a Smart Semi-Active Prosthetic Leg: Preliminary Assessment and Testing Preliminary Assessment and Testing. <http://eprints.whiterose.ac.uk/102329/1/Mechatronics%20conference%202016%20ver.4.pdf>
6. Beyrouthy T., Kork Al S., Korbane J. A., Abouelela M. EEG Mind Controlled Smart Prosthetic Arm – A Comprehensive Study. https://www.astesj.com/publications/ASTESJ_0203111.pdf
7. Johansena D., Popović D. B., Struijck L., Sebeliusd F., Jensene S. A Novel Hand Prosthesis Control Scheme Implementing a Tongue Control System. IJ. Engineering and Manufacturing 2012, 5, 14-21. <http://www.mecs-press.org/ijem/ijem-v2-n5/IJEM-V2-N5-3.pdf>
8. Bionic FINGERTIP helps amputee sense touch and textures: Man who lost left hand is able to feel surfaces with prosthetic digit. <https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-3482068/Bionic-FINGERTIP-helps-amputee-sense-touch-textures-Man-lost-left-hand-able-feel-surfaces-prosthetic-digit.html>

РАСЧЕТ ВРЕМЕНИ ПРОБЕГА ПУЛЬСОВОЙ ВОЛНЫ ПО ДАННЫМ СФИГМОГРАФИИ

Сластушенский Ю.В.^{1,2}, Ревизников Д.Л.^{1,2}, Рогоза А.Н.^{1,3}, Украинский Л.Е.¹

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (slastushenskiy@mosinter.net);

²Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)

³НИИ кардиологии им. А.Л. Мясникова, Москва, Россия

Анализ пульсовых волн лежит в основе целого ряда современных методов и средств диагностики сердечно-сосудистой системы человека. Этот вопрос подробно освещен в работах авторов [1-3]. Одним из важнейших показателей, характеризующих состояние сердечно-сосудистой системы, является скорость распространения пульсовой волны. Во многом это обусловлено прямой связью данной величины с эластичными свойствами артерий. Скорость распространения пульсовой волны может быть вычислена по результатам одновременного измерения волновых профилей на различных участках артериальной системы. Другой подход связан с синтезом профиля пульсовой волны в аорте по измерениям на периферии и последующим разложением центральной пульсовой волны на прямую и отраженную волны. Вообще говоря, в артериальной системе реализуются множественные отражения от бифуркаций и резистивных сосудов. Однако доминирующую роль в формировании пульсовой волны в аорте играют отражения в зоне нижних конечностей, что позволяет использовать модель единой (эффективной) отраженной волны.

Задача декомпозиции состоит в анализе профиля центральной пульсовой волны с целью выделения в комплексном сигнале прямой и отраженной волн. В разработанном авторами программно-аппаратном комплексе [2] используется приближенный метод декомпозиции [4], основанный на данных контурного анализа синтезированного профиля.

Контурный анализ пульсовой волны позволяет выделить на сигнале первый и второй систолические пики, а также определить продолжительность сердечного выброса (момент окончания систолы).

На втором шаге по этим данным строится приближенная кусочно-линейная функция расхода крови. Затем осуществляется дискретное преобразование Фурье функций давления и расхода крови, после чего с использованием импедансных соотношений конструируются приближенные профили прямой и отраженной волн. Окончательные профили формируются с помощью масштабирующих процедур. Итоговое время пробега пульсовой волны вычисляется на основе кросскорреляционного анализа прямой и отраженной волн.

Особенностью разрабатываемых авторами методов и средств исследования нелинейных волновых процессов в сердечно-сосудистой системе человека является как использование современных методов измерения и обработки пульсовой волны, так и методов прямого численного моделирования гемодинамических процессов в артериальном дереве [1,2]. Последние позволяют для заданных условий получить точное разложение пульсовой волны на прямую и отраженную волны. Таким образом, появляется возможность верификации приближенных алгоритмов декомпозиции. Сравнение профилей прямой и отраженной пульсовых волн, рассчитанных путем решения уравнений гемодинамики, и результатов, полученных с помощью приближенного алгоритма декомпозиции, показало хорошее согласование волновых профилей. При этом отличие в вычисленных различными методами временах пробега пульсовой волны составляет около 7 %, что вполне приемлемо для сфигмографического анализа.

Список литературы

1. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Рогоза А.Н., Сластушенский Ю.В., Украинский Л.Е. Анализ и диагностика сердечно-сосудистой системы человека на принципах нелинейной волновой механики. // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2016, № 2, с. 96 – 103.
2. Ганиев Р.Ф., Ревизников Д.Л., Рогоза А.Н., Сластушенский Ю.В., Украинский Л.Е. Волновые процессы в сердечно-сосудистой системе человека: измерительный комплекс, вычислительные модели и диагностический анализ. // Доклады Академии Наук (Физика), 2017, т. 473, № 3, с. 291 – 294.
3. Астраханцева Е.В., Гидасов В.Ю., Пирумов У.Г., Ревизников Д. Л. Численное моделирование гемодинамических процессов в артериальном дереве. Исследование влияния пережатия сосуда на параметры течения // Мат. моделирование. 2006. Т. 18. № 8. С. 25–36.
4. A. Qasem, A. Avolio. Determination of Aortic Pulse Wave Velocity from Wavefront Decomposition of the Central Aortic Pressure Pulse. // Hypertension, 2008, 51, p.188-195.

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

Смелягин А.И.

Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия
(E-mail: asmelyagin@yandex.ru)

Целью структурного синтеза механизмов и машин (ММ) является построение структурной схемы ММ по заданной их подвижности [1,2,3,4].

До 80-х годов прошлого столетия структуру вновь создаваемых ММ выбирали либо интуитивно, либо научно - путем наложения структурных групп [1,2,3,4] Ассура. Подтверждением этому является следующее высказывание: «Применяя структурную классификацию Ассура, мы исключаем применение иных методов образования механизмов, так как она претендует на универсальность» [5]. Такой подход обычно позволял найти приемлемое решение, но оно часто не являлось лучшим.

В настоящей работе показано, что метод Ассура не универсален и, главное, он не позволяет найти все возможные схемы, удовлетворяющие начальным условиям синтеза, поэтому предлагаются новые научные методы синтеза механизмов.

Эти методы базируются на разработанных автором [1,2,3,4] структурных формулах (1,2,3) и структурных математических моделях механизмов как с замкнутыми (4), так и разомкнутыми (5,6) кинематическими цепями.

$$\begin{aligned}
 W &= \Pi n - \sum_{i=1}^{\Pi-1} (\Pi - i) p_i \quad (1); & W &= \sum_{i=1}^{\Pi-1} i p_i - k \Pi \quad (2); & W_{\text{с.м}} &= \sum_{i=1}^n W_i - \sum_{j=1}^n (K_j - 1) \quad (3); \\
 \left\{ \begin{aligned}
 p &= \frac{1}{2} \left(\sum_{t=T-j}^2 (t n_t + Z + S) \right); \\
 n &= \sum_{t=T-j}^2 n_t; \\
 W &= \sum_{i=1}^{\Pi-1} i p_i - k \Pi; \quad (4) \\
 k &= p - n; \\
 p &= \sum_{i=1}^{\Pi-1} p_i \\
 T &\leq k + 1
 \end{aligned} \right. & \left\{ \begin{aligned}
 2p &= n_1 + Z; \\
 S &= 1; \\
 n &= \sum_{t=T-j}^2 n_t; \\
 W &= \sum_{i=1}^{\Pi-1} i p_i; \\
 p &= \sum_{i=1}^{\Pi-1} p_i; \quad (5) \\
 T &\leq N + 1; \\
 n_1 &= N; \\
 N &= \sum_{t=T-j}^3 [(t-1)n_{\text{вых}} + (t-2)n_{\text{пр}}]; \\
 n_{\text{сл}} &= \sum_{t=T-j}^3 n_t; \\
 n_{\text{сл}} &= n_{\text{вых}} + n_{\text{пр}};
 \end{aligned} \right. & \left\{ \begin{aligned}
 2p &= n_1 + Z; \\
 S &= 1; \\
 n &= n_1; \\
 W &= \sum_{i=1}^{\Pi-1} i p_i; \\
 p &= n; \quad (6) \\
 p &= \sum_{i=1}^{\Pi-1} p_i; \\
 T &= 1 \\
 t &= 1
 \end{aligned} \right.
 \end{aligned}$$

Предлагаемые методы позволяют проводить целенаправленный количественный и качественный синтез непосредственно ММ, а не структурных групп, как в методе Ассура. Разработанные формулы и структурные математические модели и методы позволяют найти и проанализировать все структурные схемы любых:

- ассуровых механизмов;
- неассуровых механизмов;
- структурных групп.

Такой подход позволяет целенаправленно и логично выбрать рациональную структурную схему создаваемых ММ.

В работе приведены примеры количественного и качественного синтеза простых и сложных механизмов различной подвижности как с замкнутыми, так и разомкнутыми (роботы, манипуляторы) кинематическими цепями. Были найдены и построены все структурные схемы механизмов, соответствующих условиям синтеза, что позволяет в дальнейшем целенаправленно выбрать лучшую из них.

Список литературы

1. Смелягин А.И. Структура, структурный анализ и синтез механизмов. Новосибирск: Издательство НГТУ. 1997. - 109 с.
2. Смелягин А.И. Структура механизмов и машин. Новосибирск: Издательство НГТУ. 2002. - 308 с.
3. Смелягин А.И. Структура механизмов и машин. М.: Высш. шк. 2006. - 304 с.
4. Смелягин А.И. Теория механизмов и машин. М.: ИНФРА-М. 2008. - 263 с.
5. Боголюбов А.Н. Теория механизмов и машин в историческом развитии ее идей. М.: Наука, 1976. — 467 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ ЛЕГИРОВАННЫХ ГИБРИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОРОШКОВОЙ ОСНОВЕ

Смирнов Н.И.¹, Прожега М.В.¹, Смирнов Н.Н.¹, Пятов И.С.²,
Шапошникова К.В.², Ладанов С.В.³

¹ИМАШ РАН, Москва, Россия, ИМАШ РАН; (prmaksim@gmail.com)

²ООО "РЕАМ-РТИ, Москва, Россия;

³ООО "СЭТ", Москва, Россия.

В работе представлены результаты исследований трибологических свойств гибридных материалов на порошковой основе, изготовленных по технологии «Карбул», модифицированных порошками различного состава. Испытания проводили по схеме «диск-диск» на модернизированной машине трения СМТ-1. Исследованы структура и механизм изнашивания гибридных материалов КАРБУЛ.

Гибридные материалы на порошковой основе обладают рядом преимуществ, такими как коррозионная и химическая стойкость, низкая удельная плотность, высокая рабочая теплостойкость [1-2]. В настоящее время активно ведутся работы по внедрению материалов «Карбул» в промышленность. Целью работы является изучение трибологических свойств представленных композитов, изготовленных по технологии «Карбул», в зависимости от их состава. Для исследований были представлены материалы, изготовленные по технологии «Карбул», модифицированные различными добавками.

Технология «Карбул» включает в себя следующие этапы:

1. Подготовку вулканизуемой эластомерной смеси;
2. Изготовление из эластомерной смеси заготовки;
3. Изготовление прекурсора;
4. Отверждение прекурсора в изделие;
5. Контроль изделия: геометрия (размеры), твердость.

В качестве эластомерного связующего использовали синтетические каучуки марки БНКС-18АМН и СКД СН, а также органический пероксид Perkadox 14/40.

Полунатурные испытания на износ по схеме «плоскость-плоскость» проводили на модернизированной машине трения СМТ-1 (Точприбор, Россия). Сигналы с датчиков регистрировали с помощью многофункциональной платы АЦП РС1 6023Е производства National Instruments. Программу для обработки сигналов разработали с использованием графической среды LabVIEW 2009. Перед каждым опытом образцы промывали в ультразвуковой ванне в растворе Нефрас С2 80/120, после чего выдерживали в термокамере в течение 30 минут при температуре 1000С. После этого образцы взвешивали с помощью весов Ohaus Advanturer, имеющих погрешность измерения 0,0001 г. После испытаний повторяли процедуру очистки и взвешивали для определения потери массы.

В качестве критерия износостойкости покрытий использовали величину объемной скорости изнашивания. Испытания материалов на трение и износ проводили при следующих режимах:

- усилие прижатия дисков – 100 Н;
- удельное давление – 0,066 МПа;
- частота вращения вала – 275 об/мин;
- скорость скольжения (по среднему диаметру) – 0,5 м/с;
- длительность опыта – 10 мин.

Результаты испытаний материалов на трение показали, что наименьшим коэффициентом трения обладает образец №2, изготовленный по технологии «Карбул» с добавлением порошков карбида кремния, искусственного графита и белой сажи. В процессе испытаний происходило плавное снижение значения коэффициента трения. Стоит отметить, что этот же материал значительно превосходит по износостойкости материалы, содержащие кроме карбида кремния белую сажу (обр.№3), искусственный графит (обр. №5) и два типа порошка карбида кремния (обр.№4).

Список литературы

1. Макаров А.Р., Смирнов С.В., Осокин С.В., Пятов И.С., Врублевская Ю.И., Финкельберг Л.А. Конструкционные материалы для поршней ДВС // Известия МГТУ «МАМИ» №1(15), 2013, т.1, 118-125.

2. Пятов И.С. Рабочие ступени насосов из органических керамикоподобных материалов для осложненного фонда скважин // Инженерная практика, №1, 2013, стр.8-11.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ВЫСОКООБОРОТНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ

Смирнов Н.И.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (smir1947@yandex.ru).

Увеличение частоты вращения погружных центробежных насосов для добычи нефти (УЭЦН) с помощью вентильных приводов, позволяет существенно уменьшить длину сборки, увеличить напор на одну насосную ступень, применять меньшие габариты насосов, сократить затраты на монтажные операции. Особенно эти эффекты проявляются при увеличении частоты вращения до 10000 об/мин и выше. Однако при этом следует ожидать появления трибологических проблем, которые ограничивают широкое внедрение перспективной техники [1]. Исследование особенностей изнашивания насоса, скорости изнашивания при различных эксплуатационных условиях является целью работы.

Из статистики отказов УЭЦН стандартного исполнения с номинальной частотой вращения вала 3000 об/мин известно, что основными деталями и узлами, определяющими ресурс механической части являются: насосные ступени, подшипники, валы. Наиболее часто встречаются абразивный износ и гидроабразивный (эрозионный) износ при наличии в пластовой жидкости абразивных частиц и коррозионно-активных элементов. Методология исследования включает: разработку научных стендов и методик для исследования износа насосных ступеней, радиальных подшипников скольжения, торцевых уплотнений, упорных подшипников, износа материалов в условиях, приближенных к эксплуатационным; моделирование динамики вала при износе, разработку технических мероприятий по повышению ресурса УЭЦН.

Наиболее опасным, с точки зрения наступления отказа, является износ подвижных сопряжений и износ проточной части. Опыты, проведенные с насосными ступенями 5-50 в абразивосодержащей среде и в различных точках напорно-расходной характеристики [1], показали, что увеличение частоты вращения в два раза приводит к росту скорости изнашивания осевых сопряжений ~ в 5 раз и росту скорости изнашивания радиальных сопряжений ~ в 3,5 раза, табл.1. Увеличение износа связано с ростом напора на каждой насосной ступени и более интенсивном попадании в зазор абразивных частиц.

Частота, об/мин	Подача, м ³ /час	V _{вт} ·10 ⁵ , мм/мин	V _{рад} ·10 ⁴ , мм/мин	V _{ос} ·10 ³ , мм/мин
5705	1,92	3,1	15	14,3
2950	1,38	1,94	2,6	5,6
2950	1,58	2,9	5,6	4,6

Таблица 1. Скорость изнашивания насосной ступени 5-50 от частоты вращения

Износ проточной части связан с эрозионным воздействием абразивных частиц, содержащихся в пластовой жидкости, на поверхность проточной части направляющего аппарата и рабочего колеса. Особенно опасен локальный износ («промыв»), который приводит к механическому разрушению направляющего аппарата и корпуса установки. Опыты, проведенные на стенде [2], показали, что на интенсивность изнашивания I_3 материала сильное воздействие оказывает скорость потока жидкости V (степенная зависимость), которая в свою очередь определяется частотой вращения, а также угол воздействия потока на стенку детали α (1).

$$I_3 = KV^n f(\alpha) \quad (1)$$

Для применяемых на практике порошковых материалов для насосных ступеней показатель степени находится в диапазоне 2,5-3. Таким образом, при увеличении частоты вращения с 2970 до 10000 об/мин при похожих размерах и материалах насосных ступеней может произойти увеличение гидроабразивного (эрозионного) износа ~ в 42 раза.

Список литературы

1. Смирнов Н.И. Исследование эрозионной стойкости материалов УЭЦН // Neftegaz .RU/ с.48-55.
2. Пат. 2444719 РФ Способ испытания материалов на гидроабразивный и коррозионный износ / Н.И. Смирнов, Н.Н. Смирнов; опубл. 10.03.2012

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ «ПОЛНЫХ СПЕКТРОВ» ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВИБРАЦИИ ВАЛА В ПОДШИПНИКАХ СКОЛЬЖЕНИЯ В РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕДУРЫ ВИБРОМОНИТОРИНГА КОМПРЕССОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия, (E-mail: agsokolova@gmail.com).

Известно, что в системах вибромониторинга технического состояния машинного оборудования роторного типа в настоящее время наряду с данными измерения параметров абсолютной вибрации на корпусе (уровней и спектров виброскорости в полосе частот от 10 до 1000 Гц) используются данные измерения параметров относительной вибрации вала в подшипниках скольжения (амплитуд колебаний на 1-ой и 2-ой гармониках частоты вращения и орбит прецессии вала). Отсутствие в энергетических спектральных характеристиках фазовой информации между компонентами относительного виброперемещения вала в вертикальном и горизонтальном направлениях измерения и отсутствие синхронизации этих колебаний с оборотами вала не позволяет с достаточной степенью вероятности идентифицировать вид и степень повреждения подшипникового узла. Целью работы является разработка и адаптация к реальным условиям методов обработки вибросигналов, позволяющих существенно расширить возможности обнаружения дефектов и оценки текущего технического состояния роторных машин.

Особый интерес представляет так называемый «полный спектр» (*full spectrum*) [1]. Ввиду отсутствия на ряде предприятий полного комплекта программного обеспечения фирмы *Bently Nevada Corporation* и кифазора для отображения формы орбиты, принятой на фирме, в ИМАШ РАН в среде *MathLab* было разработано программное обеспечение анализа «полных» спектров без синхронизации с оборотами вала. Этот программный комплекс позволяет при малых затратах существенно расширить возможности оценки текущего технического состояния машин. На примере результатов постобработки вибрационных сигналов центробежного компрессора ЦК-1 заводской установки 35/8-300Б в предаварийной ситуации и после ремонта компрессорной установки продемонстрирована высокая чувствительность полных спектров к развитию неисправностей подшипников скольжения, сопровождающихся нелинейными колебаниями [2].

На фотографиях деталей подшипников скольжения (рис.1), сделанных во время разборки агрегата для ремонта, показаны эксплуатационные повреждения, возникшие в результате эксплуатации установки вопреки рекомендациям по показаниям системы вибромониторинга.



Рис.1. Следы контакта шейки вала и поверхности переднего подшипника компрессора: а) – на верхнем и б) – на нижнем вкладышах.

На рис.2 для примера приведены полные спектры прецессии вала в переднем подшипнике компрессора, слева – до ремонта, справа – после.

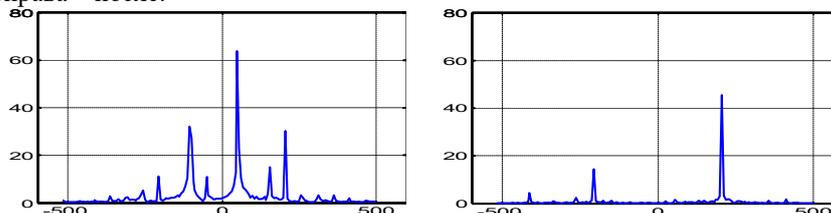


Рис.2. Полные спектры прецессии вала в поврежденном подшипнике и после ремонта компрессора.

Соотношения амплитуд компонентов полного спектра в отрицательной и положительной областях частот на частоте вращения ротора, ее гармониках и субгармониках характеризуют качество функционирования роторной системы и возможный вид дефекта.

Список литературы

1. Goldman P., Muszynska, A., “Application of Full Spectrum to Rotating Machinery Diagnostics”, *Orbit*, Vol.20, No.1, First Quarter, 1999, pp. 17-21.
2. Использование полных спектров и других двумерных виброхарактеристик в диагностике компрессорного оборудования / Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я. и др./ *Контроль.Диагностика*, № 8, 2016. - С.4-14. /*Журнал Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике* – РОНКТД.

ВИБРОДИАГНОСТИКА ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА ХАРАКТЕРИСТИК ДВУМЕРНЫХ ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я., Иванова М.А.

Институт Машиноведения РАН, Москва, Россия (agsokolova@gmail.com)

В докладе представлены результаты исследования возможностей расширения пространства диагностических признаков и глубины диагностирования машинного оборудования за счет использования векторных и скалярных статистических характеристик двумерного закона распределения вероятностей вибрационных процессов в дополнение к уже известным скалярным характеристикам: среднеквадратического значения (СКЗ), асимметрии, эксцесса, пик-фактора и векторным характеристикам одномерного закона и спектральным характеристикам [1-4]. Данная задача особенно актуальна в случае анализа нелинейных колебаний, возникающих вследствие развития деградационных процессов в подшипниках скольжения высокооборотных машин (турбин, компрессоров) в эксплуатационный период. Дано обоснование необходимости применения методов анализа статистических характеристик совместного закона распределения вероятностей вибросигналов, в том числе, параметров оценки вида стохастической связи колебательных процессов. Представлена информация о результатах использования вероятностных характеристик относительной вибрации вала в подшипниках скольжения в двух взаимно-перпендикулярных направлениях, в том числе векторов одномерных и двумерных законов распределения, вида взаимно-регрессионных функций, условной дисперсии и численных значений параметров стохастической связи вибрационных процессов [5]. На примере анализа виброакустических характеристик центробежного пятиступенчатого компрессора ЦК-1 в подшипниках скольжения, находящихся в предаварийном состоянии, и непосредственно после ремонта компрессорной установки, показана возможность диагностирования эксплуатационных повреждений контактирующих поверхностей подшипниковых узлов и качества их монтажа при проведении ремонтных работ.

Список литературы

1. ГОСТ ИСО 10816-3-2002 Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 3. Промышленные машины номинальной мощностью более 15 кВт и номинальной скоростью от 120 до 15000 мин⁻¹. М : Из-во стандартов, 2002.
2. Неразрушающий контроль. Справочник: В 7 т. Под общ.ред. В.В.Клюева. Т.7: В 2 кн. , Кн.2 « Вибродиагностика». – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
3. Сизарев В.Д., Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я. Поиск путей повышения эффективности вибромониторинга машинного оборудования на примере подвижного отражателя исследовательского ядерного реактора ИБР-2 / Новое в Российской энергетике //Ежемесячный научно-технический электронный журнал, № 7, 2016.- С. 6-22. ISSN 2312 055X.
4. Формирование вектора диагностических признаков на основе характеристической функции виброакустического сигнала / Костоков В.Н., Науменко А.П. и др./ Контроль. Диагностика, № 8, 2016.- С. 22-29.
5. Мирский Г.Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения.– М.: Энергоиздат, 1982. - 320 с.

РАННЕЕ ОБНАРУЖЕНИЕ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ СКРЫТЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ УЗЛОВ ГТД ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ НА КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ДВИГАТЕЛЯ

Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия, (E-mail: agsokolova@gmail.com).

Анализ статистики отказов газотурбинных установок (ГТУ) компрессорных газоперекачивающих агрегатов показал, что скрытые повреждения вращающихся и неподвижных элементов узлов агрегата типа эрозии, коррозии, прогаров соплового и лопаточного аппарата, износа элементов подшипников часто приводят к аварийной ситуации и обнаруживаются, как правило, на поздней стадии развития дефектов при визуальном осмотре во время планового технического обслуживания или при ремонтных работах после снятия машины с эксплуатации. Целью работы является разработка методов эффективного виброконтроля текущего технического состояния машинного оборудования, раннего обнаружения и локализации скрытых эксплуатационных повреждений машинного оборудования на основе анализа информации, содержащейся в характеристиках вибросигнала, чувствительных к выбросам и малым изменениям амплитуды вибрации.

При выборе характеристик вибросигнала, регистрируемого в точках на корпусе газотурбинного двигателя (ГТД) в условиях недоступности диагностируемого узла и высокого уровня помех, очень важны требования высокой чувствительности к диагностируемым дефектам и монотонности роста значений диагностических признаков неисправностей при ухудшении технического состояния узла. Этим требованиям не удовлетворяют стандартные энергетические параметры сигналов виброскорости типа среднеквадратического значения амплитуды, реализуемые в штатной системе вибромониторинга (и диагностики) оборудования.

В докладе приведена информация о результатах применения разработанного в ИМАШ РАН метода раннего обнаружения скрытых дефектов узлов ГТУ на базе авиационного ГТД ПС-90 и судового двигателя ДГ-90 по данным корпусных измерений вибрации [1]. В основе метода обнаружения скрытых дефектов лежит алгоритм вибромониторинга машинного оборудования на основе параллельного анализа трендовых характеристик многомерных S-дискриминантов клипированных по амплитуде вибрационных сигналов в нескольких, заранее определенных полосах частот, адаптированных к рабочему диапазону частот возбуждения объекта. Приведены примеры обнаружения и локализации эксплуатационных повреждений как вращающихся деталей, так и неподвижных элементов узлов ГТД в рабочих условиях газоперекачивающего агрегата. На рис.1 приведены фотографии нескольких типовых скрытых повреждений элементов оборудования ГТУ на базе авиационного газотурбинного двигателя ПС-90, обнаруженных разработанным в ИМАШ РАН методом [1, 2].

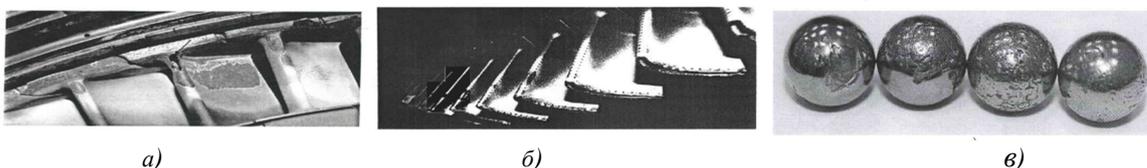


Рис.1. Фото сквозного прогара элементов ТВД: а) лопаток соплового аппарата и б) лопаток рабочего колеса; в) питтингованных тел качения подшипника

Разработанная методика позволяет сделать сравнительную оценку чувствительности вибросигналов, измеренных в штатных корпусных точках к ухудшению технического состояния узлов двигателя, определить ориентировочное местоположение дефектного узла, диапазон частот наибольшей виброреактивности и соответствующие ему источники возбуждения, установить временную и причинно-следственную связь развития различных неисправностей машинного оборудования.

Работа выполнена по программе фундаментальных исследований государственных академий наук (ГАН) на 2013-2020 г.г. №30 по теме 5-13.

Список литературы

1. Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я. Новая технология вибромониторинга машинного оборудования на основе многомерного дискриминантного анализа вибрации / Материалы XIV Международной научно-практической конференции, часть II, Диагностика и контроль промышленного оборудования, г.Димитровград, 27-29 марта 2012г., г.Димитровград, 2012 / С. 59-67.
2. Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я., Долаберидзе Г.В., Иванова М.А. О новой технологии вибромониторинга машин, обнаружения скрытых дефектов и их локализации / Контроль.Диагностика, № 2, 2015. - С.70-77. /Журнал Российского общества по неразрушающему контролю и технической диагностике – РОНКТД.

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ОБТЕКАНИЯ ВЗРЫВОРЕАКТИВНЫХ УСТАНОВОК

Соловьев В.О.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (solovievvo@yandex.ru)

Цель работы – поиск рациональных компоновочных схем и режимов работы взрывореактивных установок (ВУ).

Идея работы – численные исследования рациональных режимов импульсного обтекания ВУ.

Для выбора рациональных аэродинамических характеристик и компоновочных схем, разрабатываемых взрывореактивных установок (ВУ), а также режимов их работы при воздействии на них продуктов взрыва (ПВ), разрушенной породы и элементов конструкции, была разработана математическая модель, позволяющая численным методом изучать данные процессы [1, 2].

Под ВУ подразумеваются безоткатные изделия, способные серией управляемых взрывов осуществлять разрушение и проходку горных пород различной категории крепости с последующим разрушением кассет, набор которых составляет их рабочий орган с выносом их на поверхность скважины ПВ [3].

При работе ВУ возникают как подъемная сила - F_p , наличие которой приводит к откату и потере устойчивости изделия, так и реактивная сила - F_R , прижимающая изделие к забою и обеспечивающая его устойчивую работу. Поэтому, необходимым условием устойчивой работы ВУ является выполнение неравенства $F_R > F_p$.

Математическая модель имеет три независимых алгоритма для расчета силы сопротивления цилиндрических, конических и донных частей ВУ. В докладе представлены новые результаты, полученные автором после выхода первых публикаций [1,2].

Результаты численных расчетов с использованием разработанной математической модели процесса обтекания продуктами взрыва ВУ позволяют сделать следующие выводы:

1. Для расчетов температуры - T_i , давления - P_i и плотности - ρ_i набегающего потока ПВ целесообразно использовался комбинированный метод биекции и Моулера [4,5]. Вычисления по каждой итерации проводились до выполнения условия - ε , после чего определялось число Маха i -той итерации. Требуемая точность ε - является основным результатом разработанной модели и может выбираться двумя способами (математически - по правилам итерации вычислительного процесса или физически - если реально видима необходимая точность достижения требуемых результатов).

2. Установлен критерий для оценки расчетных режимов работы ВУ, определяющий условия срыва набегающего газодинамического потока и возникновения скачка уплотнения при обтекании тела с углом - α как функцию числа Маха - M и показателя адиабаты - k :

$$\frac{1}{M} \left(\frac{2}{k-1} \right)^{0,5} \leq \arcsin \alpha$$

3. Показано, что целесообразно исключить область значений числа Маха $0,8 \leq M \leq 1,8$, в которой коэффициент лобового сопротивления возрастает до 40%.

4. Получено, что сила сопротивления ВУ может быть снижена до 45%, а сила реактивной тяги (прижимающей изделие к забою) увеличена до 25%, т.е. устойчивость изделия возрастает до 70% при замене геометрии конической формы блока электрического инициирования ВУ на классическое сопло.

5. Установлена область $1,5 \cdot D_{po} \leq D \leq 2,5 \cdot D_{po}$, соответствующая наиболее устойчивой работе ВУ, где D – диаметр скважины образуемой ВУ, м; D_{po} – наружный диаметр кассет рабочего органа ВУ, м.

6. Разработанная модель позволяет проводить широкий спектр исследований газодинамических режимов обтекания изделия и осуществлять обоснованный выбор его аэродинамических характеристик. Использование данной модели в совокупности с другими (так, например, влияние разлетающихся осколков на металлические конструкции, влияние компоновки изделия и т.п.) позволяет рассчитывать достаточные толщины защитных элементов конструкции ВУ и осуществлять оптимальную компоновку изделия.

Список литературы

1. Соловьев В.О., Стечкин Б.С., Модель процесса импульсного обтекания взрывореактивной установки // Проблемы машиностроения и автоматизации. Международный журнал. М., №1, 2002, с.30-38.
2. Соловьев В.О., Стечкин Б.С., Модели импульсного обтекания для взрывореактивных установок.- В сб.: «Современные проблемы механики сплошной среды». Всероссийская конференция, посвященная памяти академика Л.И.Седова в связи со столетием со дня его рождения. М., МИАН, 12-14 ноября 2007, с.150-151.
3. Соловьев В.О., Устройство для взрывореактивного бурения // МКИ: 6 E 21 B 7/00, Патент № 2064040, РФ, приоритет от 29.12.1992г. Опул. в Официальном бюллетене. «Изобретения. Полезные модели» №20 от 20.07.1996г., ФИПС РОСПАТЕНТ.
4. Березин И.С., Жидков Н.П., Методы вычисления. М.: Госиздат физ-мат литература, 1962, т. 1, 2.
5. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПЕРЕДЕЛЫ В ПЕРЕРАБОТКЕ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ ВЕЩЕСТВ МИНИ-ЗАВОДОВ ПУОС

Соловьев И.Г., Романов А.Н., Петушков В.А.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

Внедрение в производство промышленного оборудования по переработке углеродосодержащих веществ (включая отходы) на основе технологии ПУОС потребовало от разработчиков решения следующих вопросов:

- 1) улучшения качества и расширения ассортимента выпускаемой продукции;
- 2) повышения энергетического и эксергетического КПД производств;
- 3) создания универсальной технологии и оборудования, легко перестраивающихся под различное сырье (древесина, ТБО, бурые угли, резина и др.) без замены оборудования;
- 4) повышение физической долговечности оборудования ПУОС;
- 5) разработка основ расчета, конструирования и проектирования мини-заводов ПУОС.

Указанные вопросы на сегодня решены в следующих объемах:

- на основе внедрения в технологию термоллиза органического сырья методов физико-химической активации качество получаемых сорбентов доведено до высокого (например, $S_{уд} = 1700 \text{ м}^2/\text{г}$),

- путем разделения смол отстойных и растворных и неконденсирующихся газов методами совмещенного массопереноса-конденсации, а при дальнейшем применении экстракции удалось получить: масла, пек, судовое и котельное топливо, чистую воду, а также синтетический газ и на его основе тепловую и электрическую энергию. Испытания всех веществ дали положительные результаты;

- разработано инновационное оборудование, в котором используется вторичное тепло, дымовые газы топков, газы химических реакций для проведения высокотемпературных термохимических процессов без привлечения внешнего тепла. Наоборот, в результате использования когенерационных генераторов с их помощью доставляются в сети значительное количество тепловой и электрической энергии (десятки МВт);

- сконструировано реакционное оборудование с активным гидродинамическим режимом для двухфазных сред типа: газ – твердое, жидкость – газ, жидкость – твердое, позволяющее реализовывать как быстропотекающие процессы ($\tau < 1 \text{ сек.}$, при $\text{треак} \approx 10^{-4} \text{ сек.}$), так и медленные ($\tau \approx 5 - 10 \text{ мин.}$), необходимые для реакций деструкции, поликонденсации, активации, экстракции. Оборудование рассчитано как для полисырья, так и для моносырья, ТБО и древесины, соответственно, как для гранулированного, так и для дисперсного сырья, как для влажного, так и для высушенного;

- в настоящее время все высокотемпературные процессы ($t \geq 750^\circ\text{C}$) в реакторах ПУОС проводятся на оборудовании, выполненном из титановых сплавов, термохимические процессы – на оборудовании, изготовленном из жаростойких высоколегированных сталей. Для снижения стоимости оборудования и повышения его термохимической долговечности разрабатываются керамические материалы и конструкции оборудования из них;

- практически все процессы ПУОС, реакционные, массо-теплообменные, это высокоэнергетические процессы. С целью снижения затрат на их проведение выполнены экспериментально – теоретические работы по моделированию процессов, позволившие оптимизировать их основные характеристики путем минимизации затрат и потерь энергии на установках ПУОС; разработаны технологии регенерации (практически более 95%) экстрагентов – дорогих органических продуктов;

- разработка мини-заводов ПУОС различной мощности (от 1,5 тыс.т/год до 50 тыс.т/год) требует наличия единого алгоритма расчетов всех переделов комплексного процесса и оборудования для их реализации. Разработаны теоретические и полуэмпирические алгоритмы таких расчетов. Подготовлены техно-рабочие проекты некоторых образцов мини-заводов.

ПЛАНИРОВАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ

Статников И.Н., Фирсов Г.И.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (firsovgi@mail.ru)

Известно, что статистика говорит на языке вероятности [1]. Статистика занимается изучением неопределенностей самого разного происхождения. Большую трудность неопределенности вызывают в момент принятия решения по поводу результатов, полученных при изучении тех или иных динамических систем (ДС), которые окружают нас всюду и всю жизнь (да и сам человек – сложнейшая ДС). Функционирование ДС машин и механизмов описывается десятками и сотнями параметров J , оказывающих различное влияние на значения десятков требований (критериев), предъявляемых к ним. Конечно, при создании ДС сначала пытаются аналитически проанализировать свойства математической модели (ММ). Но все возрастающие сложности таких ММ по числу параметров J , входящих в модель, по числу критериев K , предъявляемых к ДС, делают невозможной полную детальную аналитическую проработку, и появляется необходимость в значительных упрощениях и, значит, снижается прогностическая сила рекомендаций, выработанных на детерминистической основе. Кроме того, уже при $K \geq 2$ можно говорить только о выборе приемлемых значений параметров ДС, т.е., о рациональных значениях параметров.

Начиная со второй половины XX века при решении задач создания современных ДС исследовательский акцент переносится на математическое моделирование в вероятностной постановке. При этом процесс сбора и обработки данных становится сложной проблемой как из-за проблемы получения их в больших количествах, так и возникающих по этой причине трудностей интерпретации результатов вычислительных экспериментов (ВЭ). Как объяснял Р. Фишер [2], первую проблему можно решить с помощью планирования экспериментов, а вторую – с помощью логики научного вывода.

В ИМАШ РАН появилась идея объединения статистического подхода и дискретного зондирования пространства параметров, входящих в ММ. Подходящим для реализации этой идеи оказались ЛП_τ – последовательности, описанные в [3], и теория планируемого эксперимента [4]. Так появился ППП-поиск – метод Планирования ЛП_τ-последовательностей [5,6].

Разработанный метод ППП-поиска дает возможность одновременно в значительной мере решать вышеобозначенные проблемы на вероятностной основе, т.е., степень достоверности результатов анализа (или синтеза) ММ определяется требуемой (задаваемой) вероятностью P_3 . Указанные свойства метода были апробированы на ряде задач проектирования ДС, описываемых ММ различной структуры [7-9] (во всех нижеуказанных примерах $P_3 \geq 0.95$, НДУ – нелинейное дифференциальное уравнение, ЛДФ – линейное дифференциальное уравнение, УРЧП – дифференциальное уравнение в частных производных):

1) Поворотный делительный стол с гидромеханическим приводом. ММ: 3 НДУ второго порядка. $J = 9$. $K = 3$. Результат: найдена область решений, объем которой составил ~0,2% от исходно заданной.

2) Пневморегулятор давления повышенной точности. ММ: 4 НДУ второго порядка. $J = 4$. $K = 1$. Результат: найдена область лучших решений с объемом в 0,5% от исходно заданной.

3) Пневмовстряхивающая машина. ММ: 4 НДУ второго порядка. $J = 8$. $K = 1$. Результат: определены 4 влияющих параметра; выделенная область составила 5% от исходно заданной.

4) Многоконтурная планетарная зубчатая передача. ММ: 23 ЛДУ неоднородных второго порядка $J = 25$. $K = 6$. Результат: определены 8 параметров, одновременно влиявших на все критерии.

5) Швейная машина. ММ: 5 ЛДУ неоднородных второго порядка. $J = 6$. $K = 5$. Результат: в выделенных областях построены регрессионные зависимости собственных частот от параметров ММ.

6) Трансмиссия главного привода рабочей клетки прокатного стана. ММ: 5 НДУ второго порядка. $J = 5$. $K = 5$. Результат: найдена область компромисса, составляющая ~3,5% от исходно заданной.

7) Теплообменный аппарат. ММ: 1 УРЧП. J от 8 до 18. $K = 4$. Результат: определены для каждого J существенные (релевантные) параметры и построены области компромисса.

Список литературы

1. Наука. Величайшие теории: выпуск 47: Возможно да, возможно нет. Фишер. Статистический вывод. М.: Де Агостини, 2015, 176с.
2. Fisher R.A. Statistical methods experimental, experimental design and scientific inference, Oxford University Press, 2003. 273 p.
3. Соболев И.М. Многомерные квадратурные формулы и функции Хаара. М.: Наука, ГРФМЛ, 1969, 288 с.
4. Налимов В.В. Теория эксперимента. М.: Наука, ГРФМЛ, 1982, 256с.
5. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Проблемы интеллектуальной обработки информации при решении задач проектирования и идентификации динамических систем. Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. AS'2011. VIII Всероссийская научно-практическая конференция. Труды. Новокузнецк: Изд. Центр СибГИУ, 2011, с.45-51.
6. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Интерактивное структурирование пространства параметров при проектировании динамических систем. Вестник Тамбовского государственного технического университета, 2015, № 1, с. 36-41.
7. Statnikov I.N., Firsov G.I. Using sobol sequences for planning experiments. Journal of Physics: Conference Series, 937, 2017, 012050, p. 1-3.
8. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Инструментальные возможности ППП-поиска. Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2011, Т.18, вып. 5, с.808.
9. Статников И.Н., Фирсов Г.И. Планирование вычислительного эксперимента в задачах многокритериального анализа динамических систем. Актуальные проблемы науки. Материалы международной научно-практической конференции. Выпуск XIII. Пенза: Издательство ПГУ, 2018, с.259-264.

ФОРМИРОВАНИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В МЕТАЛЛАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ

Сташенко В.И.¹, Троицкий О.А.¹, Скворцов О.Б.^{1,2}

¹ИМАШ РАН, Москва, Россия (vis20-11@gambler.ru);

²Научно-технический центр «Завод Балансировочных машин», Москва, Россия

В процессах воздействия импульсных токов на металлические образцы на материал последних действуют поперечные силы. Вопросам анализа таких процессов посвящены работы ряда авторов, перечисленных, например, в работе [1]. Механическое действие импульсного тока связано с моментами начала переднего и заднего фронтов импульсов тока [2] и проявляется в виде аналога механического удара. Виброакустические затухающие колебания от начальных моментов переднего и заднего фронтов, также как и колебания от других импульсов тока, накладываются и позволяют сформировать вибрационный процесс близкий к синусоидальному, как показано на рис. 1.

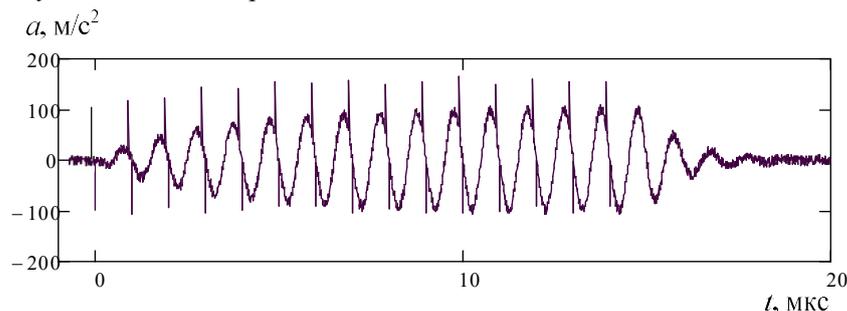


Рис. 1. Виброакустический отклик поверхности образца на пропускание последовательности из пятнадцати импульсов тока.

Такие процессы могут быть использованы для механического воздействия на материал образцов, например при электропластической обработке металлов. Изменением параметров импульсов тока можно возбуждать частоты близкие резонансным и обеспечить возбуждение требуемой моды колебаний образца [3]. Хотя «ударный» процесс формирует широкополосный спектр отклика, именно резонансные частоты проявляются в виде колебаний наиболее сильно. Используемый при экспериментах сигнал с датчика вибрации позволяет оценивать амплитуду и корректировать частоту с использованием процедуры фазовой автоподстройки частоты. При проведении экспериментов с образцами из различных металлов в виде стержней диаметром 2-8 мм и длиной 15 см диапазон частот колебаний находился в пределах от 1, 5 до 8 КГц. Оценка преобразования электрической энергии импульсов тока в энергию механических колебаний [3] показывает, что КПД такого преобразования относительно мал, а основная часть энергии преобразуется в выделяемое в образце тепло. Такая особенность может иметь практическое полезное значение, при использовании данного эффекта в процессе сварки с воздействием на свариваемые материалы в области шва для улучшения структуры металла [4].

Несмотря на относительно низкую эффективность преобразования электрической энергии в энергию механических колебаний и выделяемое при этом значительное количество тепла описываемые явления могут быть использованы в широком температурном диапазоне, что выгодно отличает их от аналогичных, обычно возможных только в диапазоне сравнительно низких температур.

Возбуждение высокочастотных колебаний в электропроводящих элементах может быть использовано при реализации диагностического неразрушающего контроля электротехнического оборудования [5-7].

Список литературы

1. Сазонов Ю.И. Электромагнитно-акустические эффекты в конденсированных средах и физические методы их использования // Научные технологии, № 9. 2009. – С.150-156.
2. Троицкий О.А., Скворцов О.Б., Сташенко В.И., Правоторова Е.А. Динамическое возбуждение колебаний в металлических проводниках при пропускании импульсных токов. // Современные тенденции развития науки и технологий, № 1-1, 2017 – С.137-139.
3. Troickij O.A., Skvortsov O.B., Pravotorova E.A., Stashenko V.I. Analysis of the Relationships for the Vibrational Response to the Excitation of Vibro-Acoustic Processes in Conductors from the Action of a Pulsed Current // 15th International School-Conference "New materials – Materials of innovative energy: development, characterization methods and application", KnowledgeE Life Sciences, 2017. P.541-548.
4. Troickij O.A., Skvortsov O.B., Stashenko V.I. Ultrasonic Vibroacoustic Processes, Excited by Heating by Impulse Currents of Metals // 15th International School-Conference "New materials – Materials of innovative energy: development, characterization methods and application", KnowledgeE Life Sciences, 2017. P.549-555.
5. Скворцов О.Б., Сташенко В.И., Троицкий О.А. Упругие деформации проводников при действии импульсов тока // Машиностроение и инженерное образование. № 1. 2018. – С.33-42.
6. Троицкий О.А., Сташенко В.И., Скворцов О.Б. Вибрации проводников при пропускании импульсного электрического тока и неразрушающий контроль // Инженерный журнал: наука и инновации № 3 (75) 2018. - С.1-16. [электронный ресурс] <http://engjournal.ru/articles/1741/1741.pdf>
7. Троицкий О.А., Скворцов О.Б., Сташенко В.И. Измерение вибраций, созданных импульсами тока в элементах электротехнических конструкций // Электротехника, 2018, № 3, стр. 8-12.

КЛАССИФИКАЦИЯ АЛГОРИТМОВ СИНТЕЗА БИОМОРФНЫХ КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Степанян И. В.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (neurocomp.pro@gmail.com)

Цель работы — классификационный анализ нейросетевых технологий синтеза биоморфных автоматических и автоматизированных систем управления интеллектуальными машинами, общим свойством которых является наличие оптимизационного алгоритма определения структуры нейронной сети. Биоморфизм в кибернетике — способ моделирования и разработки технических устройств на основе принципов биологической организации и функций [1], развиваемый в рамках научного направления бионики. Большой вклад в этом направлении сделали П. Л. Чебышев, И. М. Сеченов, П. К. Анохин и другие.

Структура синаптических связей искусственных нейронов сети, лежащей в основе нейросетевой реализации кибернетической системы является одним из ключевых факторов, от которого зависит надежность и качество функционирования, а также помехоустойчивость. Синтез структуры синапсов биоморфной кибернетической системы как правило является многопараметрической оптимизационной задачей и требует применения эвристических алгоритмов. Для систематизации алгоритмов синтеза биоморфных кибернетических систем проведен их обзор с рассмотрением нейрофизиологических прототипов и путей технической реализации.

Рассмотрены следующие группы биоморфных алгоритмов: коллективы самоорганизующихся решающих правил [2], нейроэволюционные алгоритмы [3], алгоритмы роста бионических нейронных структур [4-6]. Предложена классификация технологий, на основе которой проведен анализ нейросетевых решений. В качестве критерия классификации определены свойства нейронов, связанные с наличием или отсутствием в их архитектуре и базовых механизмах обучения операций с плавающей запятой.

Результаты и их краткое обсуждение. Из анализа следует, что класс непрерывных биоморфных моделей (которые широко применяются на практике и имеют высокие показатели по качеству распознавания) остается требовательным к вычислительным ресурсам в связи с наличием необходимости решения многопараметрических оптимизационных задач для их синтеза и обучения. С другой стороны, дискретные модели биоморфных кибернетических систем, которые относятся к отечественной школе нейрофизиологии и нейрокибернетики [1, 5, 7 и др.] демонстрируют свойства, где обучение и дообучение происходят непосредственно в процессе функционирования и формирования сети при обработке потока информации из внешней среды. Так, характерной чертой нейросемантического подхода [5] для синтеза биоморфной нейронной структуры является возможность обучения по прецедентам, что выгодно отличает данный подход от группы методов с непрерывными функциями активации.

Аппаратная реализация класса дискретных нейросетевых технологий хорошо адаптирована под специфику цифровой схмотехники за счет принципов работы бинарных нейронов, механизмов их обучения и возможности проектирования алгоритмов их функционирования на счетчиках и триггерах. В связи с этим, отсутствие необходимости применения процедур многопараметрической оптимизации для обучения и синтеза нейросетевых структур выгодно отличает дискретный подход. В качестве примера приведена информационная система автоматизированного проектирования бионических нейронных сетей [7] с возможностью автоматической генерации кода на языке Verilog. Отметим также, что алгоритмы нейросемантической автоструктуризации сходны с алгоритмами динамического синтеза кортикальных сетей на базе спайковых и импульсных нейронов [8].

Проведенный анализ нейросетевых технологий синтеза моделей биоморфных кибернетических систем отражает их современное состояние и пути развития. Дискретные модели требуют дальнейшего изучения, в том числе с применением специализированных языков программирования и аппаратных решений. Полученные результаты могут быть использованы при выборе и проектировании аппаратно-цифровой архитектуры интеллектуальных машин, нейросетевых алгоритмов и платформ для разработки систем технической кибернетики.

Список литературы

1. Савельев А. В. Онтологическое расширение теории функциональных систем // Журнал проблем эволюции открытых систем. Казахстан, Алматы. 2005. № 2(7). С. 101–110.
2. T. Kohonen, *Self-Organizing Maps* (Third Extended Edition), New York, 2001, 501 pages. ISBN 3-540-67921-9
3. Holland, J. H. [1975]. "Adaptation in Natural and Artificial Systems," University of Michigan Press, Ann Arbor.
4. Dileep George, Jeff Hawkins. Towards a Mathematical Theory of Cortical Micro-circuits. October 9, 2009 PLoS Computational Biology, Edited by Karl J. Friston, vol. 5, issue 10, p. E1000532
5. Бодякин В.И., Степанян И.В. Адаптивный высококомпрессионный канал передачи данных на базе нейросемантического подхода // Нейрокомпьютеры: разработка и применение. – 2011. – №9. – С. 61-64.
6. Степанян И.В., Зипел Н.Н. Растущие сверточные нейроподобные структуры для задач распознавания статических образов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2018. № 5. С. 4-11.
7. Мишустин И.А., Преображенский Н.Б., Жданов А.А., Степанян И.В. Аппаратная реализация нейроподобной сети с возможностью распознавания зашумленных образов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2018. № 6. С. 19-25.
8. Ponulak, Filip (2010). «Introduction to spiking neural networks: Information processing, learning and applications.» Acta neurobiologiae experimentalis 71: 409-433.

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА НА СТРУКТУРУ И ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ СВЕРХПРОВОДНИКА NbTi

Столяров В.В., Фролова А.В.

Институт машиноведения РАН, г. Москва, Россия (vlstol@mail.ru).

Сверхпроводник из сплава NbTi традиционно изготавливается путем сборки многоволоконной заготовки из одножильных проводов и дальнейшей обработки, которая включает дробную холодную деформацию и низко-температурное старение между циклами [1]. При этом, в процессе изготовления, в сверхпроводнике должна сформироваться наноструктура с равномерным распределением высокодисперсных выделений фазы α -Ti в сверхпроводящей матрице, за счет чего достигается высокая плотность критического тока, необходимая для возникновения сверхпроводимости в проводах [2,3]. В работах [4,5] было показано, что совмещение деформации с импульсным током для различного вида материалов приводит к снижению напряжений течения, измельчению микроструктуры, а также повышает деформируемость, микротвердость (H_v) и другие механические характеристики материала.

Цель данной работы заключалась в исследовании совместного влияния деформации и импульсного тока на структуру и деформационное поведение в сверхпроводящем сплаве Nb-47вес.%Ti. Прокатка осуществлялась при комнатной температуре с постоянной скоростью 50 мм/с, в ступенчатом режиме. Плотность тока составляла $j=100$ А/мм², а длительность импульса $\tau=120 \cdot 10^{-6}$ с. Статические испытания на растяжение с применением импульсного тока проводились для выявления особенностей проявления деформационного поведения. Прокатка с током и постдеформационный отжиг при 400°C приводит к более однородной и измельченной структуре, в которой размер зерен основной фазы составляет менее 100 нм. В процессе прокатки с импульсным током H_v растет с 2402 МПа ($\epsilon=0,50$) до 3182 МПа ($\epsilon=4,40$). При этом микротвердость при прокатке с током почти в 2 раза превышает значения H_v после холодной прокатки. На рис. 1 приведены диаграммы растяжения с током и без тока образцов после прокатки с током и последующего отжига.

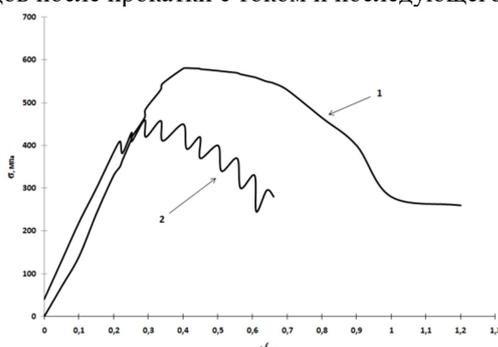


Рис. 1. Инженерные кривые растяжения «напряжение – деформация» сплава NbTi после прокатки с током и отжига: 1 - без тока; 2 - с током.

Из сравнения двух кривых видно, что введение в образец одиночных импульсов тока приводит к появлению скачков напряжения «вниз», а также снижает предел текучести и прочности металла на 100-130 МПа. Прыжки напряжения составляют 40-60 МПа и с увеличением деформации их амплитуда так же увеличивается при одинаковой плотности тока, $j=100$ А/мм². Причем, прыжки при подаче импульсов тока появляются на стадии пластической деформации, что подтверждает физическую природу электропластического эффекта, выявленную ранее [4, 6].

Таким образом показано, что введение импульсного тока при прокатке позволяет получить нанокристаллическую структуру в сплаве не подавляя эффект сверхпроводимости, позволяет повысить микротвердость и снизить деформирующие напряжения.

Список литературы

1. Потанина Л.В. Исследование качества двойных NbTi и тройных NbTiTa сплавов и разработка сверхпроводников на их основе для различных технических применений: Автореф. дисс. канд-та тех. наук / Всероссийский научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара. – М., 2006. – 175 с.
2. Chernyi O.V., Andrievskaya N.F., Ilicheva V.O. et al. The microstructure and critical current density of Nb-48 wt.%Ti superconductor with very high α -Ti precipitate volume and very high critical current // AIP Conf. Proc. – 2002. – Vol.48. – P. 883-890.
3. Ксенофонтов В.А., Лазарева М.Б., Мазилова Т.И. и др. Локальное распределение элементов в β -фазе сверхпроводящего сплава ниобий-титан // Физика низких температур. № 11, т.34. – 2008. – С.1127-1130.
4. Федоткин А.А., Столяров В.В. Особенности деформационного поведения наноструктурных титановых сплавов при растяжении под действием импульсного тока // Машиностроение и инженерное образование. №1. – 2012. – С.28-35.
5. Потапова А.А., Столяров В.В. Структурные изменения при электропластической прокатке и отжиге в прутке сплава TiNi // Известия ВУЗов. Черная металлургия. №10. – 2010. – С. 68-71.
6. A. V. Frolova and V. V. Stolyarov, "Effect of Pulse Current on Deformability, Structure, and Properties of NbTi Alloy Superconductor," Journal of Machinery Manufacture and Reliability, vol. 42 (4), pp. 325–330, 2013.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАСКАТНЫХ СТАНОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В., Ибрагимов А.Р., Кошавцев Н.Ф., Раков Д.Л., Морозов С.В.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (labutps@yandex.ru)

Изготовление ответственных деталей ГТД, отвечающих требованиям прочности и жаропрочности является одной из важнейших задач, стоящих перед авиационной отраслью [1]. Разработка новых технологических решений предшествовали их этапы анализа и синтеза и выбора наиболее рациональных, проведение моделирование и экспериментальной отработки [2]. В настоящей работе рассматриваются перспективы создания производственных и интеллектуальных технологий изготовления деталей ГТД методом изотермической раскатки.



Рис. 1. Экспериментальные образцы станов для раскатки дисков из жаропрочных сплавов СРЖД-800 (а), АЛРД-800 (б) и полых валов СРВ (в).

Технология формообразования деталей ГТД методом изотермической раскатки защищена патентами. Эта технология имеет ряд преимуществ, позволяет обеспечить конкурентоспособность изготовления ответственных деталей в авиадвигателестроении:

- обеспечение оптимальных усилий для реализации изотермической раскатки дисков из титановых и никелевых сплавов не менее 150 кН;
- повышение механических свойств материала деталей за счет высокой степени однородности структуры и последующей термообработки;
- повышение производительности в 2-3 раза за счет реализации единого цикла процесса раскатки с применением рабочей печи, обеспечивающей температуру до 1200°C с поддержанием ее в пределах $\pm 5^\circ\text{C}$, и печи для предварительного нагрева и термообработки заготовки (3 камеры);
- повышение КИМ в 3-5 раз за счет снижения трудоемкости механообработки заготовкой;
- повышение надежности работы АЛРД-800 за счет применения отдельных гидравлических станций для основных узлов (кареток, роли ков, пинолей);
- использование эффективной системы охлаждения пинолей, обеспечивающих зажим и вращение заготовки, а также охлаждения в подшипниковых опорах роликов-инструментов;
- наличие системы определения касания роликами заготовки по перемещению пинолей (гидравлическая схема позволяет в автоматическом режиме кроме точного позиционирования заготовки выполнять операцию ее обжатия);
- обеспечение мониторинга параметров раскатки и состояния основных узлов системой контроля режимов.

В результате выполнения фундаментальных и прикладных исследований академическими институтами ИПСМ РАН, г. Уфа и ИМАШ РАН, г. Москва, АО «НПЦ газотурбостроения «Салют» и др. в области развития технологии изотермической раскатки деталей ГТД из жаропрочных сплавов разработана конструкторская и эскизная документация на оборудование и технологию, изготовлены автоматизированные экспериментальные станы (СРЖД-800, СРВ), промышленный образец автоматизированной линии АЛРД-800, получены образцы деталей (дисков, полых валов) из применяемых жаропрочных сплавов, исследованы макро- микроструктура материалов образцов после изотермической раскатки, разработаны научные основы проектирования технологических процессов и систем управления. Создан научно-технический задел для разработки и внедрения в авиадвигателестроении производственных интеллектуальных технологий изготовления деталей ГТД из жаропрочных сплавов.

Список литературы

1. Burlakov I.A., Zabel'yan D.M., Morozov S.V., Valitov V.A., Ganeev A.A., Utyashev F.Z., Sukhorukov R.Y. Modeling the structure formation during hot deforming the billets of the parts of gas-turbine engines made of heat-resistant nickel alloy. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2016. T. 45. № 5. С. 469-475.
2. Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В. Анализ и оценка технологий и оборудования для изготовления заготовок длинномерных полых валов газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых и титановых сплавов на базе морфологического подхода. //Проблемы машиностроения и автоматизации. -2015. -№3.-С.136-143.

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ В ЗАГОТОВКАХ И ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ РАСКАТКИ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В., Ибрагимов А.Р., Кощавцев Н.Ф., Раков Д.Л.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (labutps@yandex.ru).

Одной из важнейших задач стоящих при производстве новых изделий в авиационной промышленности является изготовление газотурбинных двигателей (ГТД), и в частности разработка новых технологий для изготовления ответственных деталей – дисков, лопаток и т.п. [1,2]. После проведения этапов анализа и синтеза технологических решений и выбора рациональных проводится их моделирование и экспериментальная отработка[3]. В настоящей работе рассматриваются методы математического и физического моделирования процессов формирования ультрамелкозернистой структуры в заготовках деталей ГТД.

Перспективным способом изготовления осесимметричных деталей типа диск или полый вал ГТД является изотермическая раскатка в состоянии сверхпластичности на специализированных раскатных станах, при проектировании которых необходимо определить термомеханические энергосиловые параметры. Для определения этих параметров эффективным методом является математическое моделирование. Для определения напряженно-деформированного состояния и характера течения металла в процессе изотермической раскатки заготовки использовано математическое конечно-элементное моделирование на основе системы уравнений с помощью функционала Маркова, представляющего собой разность мощности пластической деформации и мощности внешних сил, приложенных к объекту, принимающему минимальное значение на истинном поле скоростей.

Конечно-элементная модель заготовки представляет собой жесткое-пластичное тело с нелинейным упрочнением, объем которого разбит на определенное количество тетраэдральных элементов. Математическое моделирование выполнено на основе построения трехмерной конечно-элементной модели процесса изотермической раскатки полого вала и включает в себя следующие этапы:

- создание геометрической модели процесса раскатки (исходная заготовка и формообразующий инструмент).
- построение конечно-элементной модели заготовки и ее взаимодействие с инструментом-роликом.
- построение реологической модели материала заготовки.



Рис. 1. Геометрическая модель раскатки диска (а) и полого вала (б).

Результаты математического моделирования позволили определить термомеханические и энергосиловые параметры при разработке технологии и оборудования, необходимые для раскатки осесимметричных деталей. В результате моделирования получены графики зависимости деформирования на ролике-инструменте в процессе изотермической раскатки по ходу его перемещения от ступицы до периферии диска.

Физическое моделирование раскатки заключается в экспериментальной апробации или воспроизведении реального процесса на модельной оснастке в масштабе с применением модельного материала для заготовки, близкого по физико-механическим свойствам при комнатной температуре к свойствам сплава, используемого в реальных условиях. В качестве модельного сплава используется сплав Вуда. Физическое моделирование дополняет результаты математического при выборе оптимальной геометрии и формы заготовки, траектории движения инструмента – ролика, скорости вращения заготовки, величины подачи инструмента и т.п.

Список литературы

1. Shakhov R.V., M.I. Nagimov, Sh.Kh. Mukhtarov, F.Z. Utyashev, Sukhorukov R.U., Sidorov, A.A. Numerical simulation of superplastic roll-forming of a hollow shaft out of nickel-based superalloy. Materials physics and mechanics №33 2017, p 171-177. DOI: 10.18720/MPM.3312017_1
2. Bardenhagen, L. V. Gavrilina, B. M. Klimenko, M. A. Pecheykina, D. L. Rakov, I. N. Statnikov. A comprehensive approach to the structural synthesis and evaluation of engineering solutions in the design of transportation and technological systems. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. ISSN 1052-6188, 2017, Vol. 46, No. 5, pp. 453–462
3. Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В. Анализ и оценка технологий и оборудования для изготовления заготовок длинномерных полых валов газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых и титановых сплавов на базе морфологического подхода.//Проблемы машиностроения и автоматизации. -2015. -№3.-С.136-143

РАЗРАБОТКА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ РЕЖИМОВ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ РАСКАТКИ ДЕТАЛЕЙ ГТД ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В., Ибрагимов А.Р., Морозов С.В.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (labutps@yandex.ru)

Разработка систем управления оборудованием для изотермической раскатке проведена на основе анализа и синтеза технологических решений, выбора наиболее рациональных с учетом их моделирования и экспериментальной отработки. Одной из важнейших задач стоящих при производстве новых изделий в авиационной промышленности является изготовление газотурбинных двигателей (ГТД), и в частности разработка новых технологических решений ответственных деталей – дисков, лопаток и т.п. [1,2]. После этапов анализа и синтеза технологических решений и выбора рациональных проводится их моделирование и экспериментальная отработка[3].

В настоящей работе рассматривается создание систем контроля режимов изотермической раскатки деталей ГТД из жаропрочных сплавов для автоматизированного оборудования.

Разработанная АСУ выполнена в виде многоуровневой распределенной системы управления:

- верхний уровень - контроллеры, управляющие ходом технологического процесса в целом и обеспечивающие человеко-машинный интерфейс.

- средний уровень - контроллеры, выполняющие в режиме online вычисления параметров скорости вращения роликов и шпинделей пинолей, а также синхронизацию их работы, корректировку скоростей перемещения раскатных головок в зависимости от изменения нагрузок на роликах.

- нижний уровень - PLC-контроллеры, управляющие скоростями вращения шпинделей пинолей и роликов, а также контроллеры, управляющие перемещением кареток с раскатными головками.

Программная реализация обмена данных производится посредством протокола обмена данных Modbus RTU



Рисунок 1. Образцы дисков, раскатанных из титанового сплава VT-9.

Система управления должна обеспечивать контроль и поддержание следующих параметров:

- температуры заготовки на всех стадиях, с момента начала ее установки в печь и до ее удаления с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$ в диапазоне от 200°C до 1140°C ;
- время выполнения каждой операции и полного технологического цикла;
- величины перемещений, подачи инструмента (с точностью $\pm 0,5\%$);
- скорости вращения заготовки (с точностью $\pm 1\%$) в диапазоне от 0,05 до 4 об/мин;
- скорости вращения каждого из 4-х инструментальных роликов (с точностью $\pm 0,1\%$) в диапазоне от 0,1 до 8 об/мин;
- согласование в заданных пределах скоростей вращения роликов и заготовки (рассогласование не более $\pm 1\%$);
- усилие зажима заготовки в пинолях до 400 кН (с точностью $\pm 1\%$).

Список литературы

1. Гаврилина Л.В., Печейкина М.А., Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю. Структурный синтез и анализ при разработке инновационных технологических процессов на базе прогрессивного морфологического подхода. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2017. № 4. С. 137-145.
2. Bardenhagen, L. V. Gavrilina, V. M. Klimentko, M. A. Pecheykina, D. L. Rakov, I. N. Statnikov. A comprehensive approach to the structural synthesis and evaluation of engineering solutions in the design of transportation and technological systems. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. ISSN 1052-6188, 2017, Vol. 46, No. 5, pp. 453–462.
3. Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В. Анализ и оценка технологий и оборудования для изготовления заготовок длинномерных полых валов газотурбинных двигателей из жаропрочных никелевых и титановых сплавов на базе морфологического подхода.//Проблемы машиностроения и автоматизации. -2015. -№3.-С.136-143

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕГКОГО В ПРИЛОЖЕНИИ К СПИРОГРАММЕ

Терещук В.С.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия

Цель данной работы - создание спирографа, которого нет за рубежом. Спирографа нового поколения на основе математической модели легкого.

Устройство позволит на порядок ускорить проведение диагностики легких у пациентов, заменить флюорографию при массовых обследованиях населения.

Преимущества — увеличение производительности, надежности и безопасности обследования при снижении его стоимости, исключение рентгеновского облучения.

Способ клинически опробован и показал хорошую совместимость с врачебной диагностикой.

Предложена математическая модель легкого в виде эластичной сферы, нагружаемой упругими силами различного происхождения, с переменной площадью выпуска. Получено простое математическое представление спирограммы выдоха (в виде относительного текущего объема воздуха в легких в зависимости от времени τ):

$$\bar{V}_t = V_t / GEL = (1 - FEL / GEL)^{n-K \ln \tau}$$

где GEL -жизненная емкость легких, FEL - форсированная емкость легких (объем воздуха, выдыхаемый за 1 с), n и K - показатель эластичности легких.

При своей простоте полученная зависимость достаточно универсальна для нормы ($n=2$ и $K=0$) и патологии ($0,1 < n < 1,3$; $-0,7 < K < 0,84$ - для исследованных групп больных). По величине коэффициентов (для которых выявлен физический смысл) можно судить о характере отклонений от нормы (О состоянии больного), что позволяет воспользоваться компьютерными системами при массовых обследованиях населения.

Кроме того, с помощью предложенной математической модели легкого в приложении к спирограмме аналитически найдены следующие временные характеристики в процессе выдоха: темп расхода, объемная скорость воздушной струи, давление в легких, показатель эластичности легких, поведение голосовой щели и т.п., что дополнительно позволяет судить о состоянии больного.

Согласно разработанной модели, впервые указано на важность выявления темпа расхода как основного сигнализатора поведения различных органов дыхания.

ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ЗВУКОПОГЛОТИТЕЛЕЙ И ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ ИЗ МЕТАМАТЕРИАЛОВ

Томилина Т.М.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (tatiana@imash.ac.ru)

Появление аддитивных технологий в настоящее время оказало существенное влияние на развитие других областей знаний, например, можно говорить об открытии новой области технической акустики – создание принципиально нового класса композиционных материалов для управления акустическими и вибрационными полями, уникальные свойства которых обусловлены сложной внутренней структурой таких метаматериалов.

Аддитивные технологии (АТ), призванные воспроизводить различные объекты по их компьютерным 3D моделям, начали развиваться как альтернатива традиционным методам разработки и изготовления промышленных изделий для повышения их эффективности. Пока их развитие идет по пути совершенствования технических устройств – 3D принтеров и создания порошковых материалов (композиций) со свойствами, аналогичными известным материалам. Имеются отдельные примеры изготовления функциональных изделий по их прототипам, полученным по традиционным технологиям. Однако АТ практически не используются для создания принципиально новых материалов и изделий, изготовление которых в рамках традиционных технологий невозможно, в том числе для создания искусственных материалов и сред с необычными свойствами. Основная причина в том, что в отличие от традиционных технологий и материалов с хорошо известными характеристиками (например, механическими), исходя из которых проектируется изделие с заданными свойствами, в аддитивных технологиях материал и изделие создаются одновременно, так что прогнозировать свойства готового изделия практически невозможно. Опыт использования 3D печати в отделе теоретической и прикладной акустики ИМАШ РАН для изготовления образцов звукопоглотителей из акустических метаматериалов совместно с Центром аддитивных технологий Самарского университета показал, что для корректного воспроизведения сложной внутренней структуры образцов необходимы специализированные методики. Такие методики были разработаны для технологии послойного синтеза изделий из фотополимерных материалов Polyjet (пластик) и технологии SLM (металл), учитывающие конструктивные особенности изделий. Получены новые результаты по использованию этих технологий для синтеза многопрофильных тонкостенных конструкций в части определения оптимальных параметров технологического процесса, при которых выращенный образец не имеет дефектов формы. Два примера напечатанных функциональных изделий приведены на рисунке 1: образец резонансного акустического метаматериала – эффективного поглотителя звука в диапазоне частот 200-500Гц, габариты – высота 50мм, диаметр 90мм, диаметр внутренних трубочек 10мм, длина 25-30мм; и образец эффективного виброизолятора, имеющего прототип, изготовленный по традиционным технологиям и успешно функционирующий на борту орбитального космического аппарата НАСА «Марс Одиссей» с Российским прибором ХЕНД.



Рис.1 Образец прототипа метаматериала из фотополимера для исследований акустических свойств на установке «труба Кундта» (слева) и образец виброизолятора в виде набора тонких пластинок «шайб», соединенных в шахматном порядке, с шунтирующими свойствами в диапазоне частот 400-600Гц (справа).

Работы по исследованию особенностей использования аддитивных технологий для изготовления функциональных изделий выполнялись в кооперации с Самарским университетом в рамках успешно завершённого трёхлетнего проекта РНФ № 15-19-00284 и продолжаются в настоящее время.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ РАЗНООБРАЗИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЯ

Троицкий А.А.

Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова Российской академии наук, г. Москва Россия.

При оценке технологичности важное значение имеет оценка разнообразия элементов изделия, однако на сегодня из-за наличия определенных недостатков получается, что при одних и тех же значениях коэффициентов стандартизации, унификации, повторяемости и типизации трудоемкость изготовления у изделия может существенно различаться, а следовательно будет разным и уровень технологичности изделия. В соответствии с изложенным актуальной задачей является совершенствование отмеченных коэффициентов технологичности. Совершенствование перечисленных коэффициентов технологичности должно начинаться с установления видов трудоемкости производимых работ, на которые они влияют.

Полная трудоемкость изготовления изделия складывается из трудоемкости конструкторской подготовки производства, трудоемкости технологической подготовки производства и трудоемкости технологического процесса изготовления. Учитывая перечисленные виды трудоемкости, было установлено влияние элементов конструкции изделия на соответствующие виды трудоемкости.

Вместо известного коэффициента стандартизации $K_{СТ}$ предлагается ввести следующий коэффициент:

$$K_{СТ} = \frac{a_c D_c + a_{c.з} D_{c.з} + a_{c.пок} D_{c.пок}}{N},$$

где D_c – число стандартных элементов изделия; $D_{c.з}$ – число стандартных заимствованных элементов изделия; $D_{c.пок}$ – число стандартных покупных элементов изделия; $a_c, a_{c.з}, a_{c.пок}$ – коэффициенты учитывающие степень влияния стандартных элементов изделия на трудоемкость; N – число элементов в изделии.

Вместо известного коэффициента унификации K_y предлагается ввести следующий коэффициент:

$$K_y = \frac{a_y D_y + a_{y.з} D_{y.з} + a_{y.пок} D_{y.пок}}{N},$$

где D_y – число унифицированных элементов изделия; $D_{y.з}$ – число унифицированных заимствованных элементов изделия; $D_{y.пок}$ – число унифицированных покупных элементов изделия; $a_y, a_{y.з}, a_{y.пок}$ – коэффициенты учитывающие степень влияния унифицированных элементов изделия на трудоемкость;

N – число элементов в изделии.

При совершенствовании коэффициента повторяемости $K_{пов}$ надо иметь ввиду, что если элементы изделия будут повторяемыми, то их значения $T_{кп}, T_{тп}$ для одного элементов изделия данной группы наименований должно делиться, на количество элементов данной группы, следовательно, его формула будет иметь следующий вид:

$$K_{пов} = \frac{a_{c.п} D_{c.п} + a_{c.з.п} D_{c.з.п} + a_{у.п} D_{у.п} + a_{у.з.п} D_{у.з.п} + a_{о.п} D_{о.п}}{N},$$

где $D_{c.п}$ – число стандартных повторяемых элементов изделия; $D_{у.п}$ – число унифицированных повторяемых элементов изделия; $D_{c.з.п}$ – число стандартных заимствованных повторяемых элементов изделия; $D_{у.з.п}$ – число унифицированных заимствованных повторяемых элементов изделия; $D_{о.п}$ – число оригинальных повторяемых элементов изделия; $a_{c.п}, a_{у.п}, a_{c.з.п}, a_{у.з.п}, a_{о.п}$ – коэффициенты учитывающие степень влияния стандартных, унифицированных и оригинальных элементов изделия на трудоемкость; N – число элементов в изделии.

При совершенствовании коэффициента типизации K_T , следует учитывать, что если элементы изделия будут типовыми, то их значения $T_{тп}$, будет общее для всех элементов изделия данной группы, следовательно, его формула будет иметь следующий вид:

$$K_T = \left(\sum_{i=1}^n (a_{c_1} C_1 + a_{y_1} Y_1 + a_{o_1} O_1) + (a_{c_2} C_2 + a_{y_2} Y_2 + a_{o_2} O_2) + \dots + (a_{c_n} C_n + a_{y_n} Y_n + a_{o_n} O_n) \right) / N$$

где C_1, Y_1, O_1 – группа типовых элементов изделия; C – стандартные типовые элементы изделия; Y – унифицированные типовые элементы изделия; O – оригинальные типовые элементы изделия;

$a_{c_1}, a_{y_1}, a_{o_1}, a_{c_2}, a_{y_2}, a_{o_2} \dots a_{c_n}, a_{y_n}, a_{o_n}$ – коэффициенты, учитывающие степень влияния стандартных, унифицированных и оригинальных элементов изделия на трудоемкость. N – число элементов в изделии.

Использование предложенных коэффициентов технологичности позволяет повысить точность оценки уровня технологичности конструкции изделия.

МЕТОДИКА ИЗУЧЕНИЯ ВИБРАЦИЙ ПРОВОДНИКА В СОБСТВЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА

Троицкий О.А.¹, Сташенко В.И.¹, Скворцов О.Б.^{1,2}, Журиков Р.Н.³, Курьяков Р.А.³

¹ИМАШ РАН, Москва, Россия (oatroitsky@mail.ru);

²Научно-технический центр «Завод Балансировочных машин», Москва, Россия;

³Филиал ФГБУ «46ЦНИИ» Минобороны России, Мытищи, Россия.

В процессах электропластической деформации металлов при обработке металлов давлением в той или иной мере участвуют пондеромоторные силы пинч-эффекта, характерные для действия импульсного тока на проводник. Они вызывают колебания узлов кристаллической решетки [1, 2] по типу влияния ультразвука на деформацию металла, а также макроскопическую вибрацию (вздрагивание) всего образца, что легко регистрируется с помощью, например, пьезоэлектрических трехкомпонентных акселерометров АП20 [3, 4]. Как показали многочисленные эксперименты одновременно с указанными вибрационными и электродинамическими процессами в проводнике появляются механические напряжения, а также их колебания с частотой следования импульсов тока. Согласно теоретическим оценкам величина возникающих механических напряжений и средний уровень сдвиговых механических напряжений в металле могут достигать высоких значений, поскольку пинч-эффект пропорционален квадрату величины тока. При высоких значениях тока, может возникнуть пластическая деформация трубчатого образца в радиальном направлении, и он превратится в искореженный стержень. Тепловое действие тока меньшей величины при этом может быть незначительным, если в экспериментах применять длительность импульсов порядка 10^{-4} сек. Это не приведет к существенно нагреванию проводника, если частоту следования импульсов выбрать низкой.

Для регистрации вибрации образца пьезоэлектрические трехкомпонентные акселерометры АП20 крепятся на образце. К краям образца подключают шины от генератора импульсов тока. Выходы акселерометров подключены к входам модуля сбора данных NI USB 4431, реализующего совместно с компьютером и программным пакетом Lab VIEW виртуальную измерительную систему [3].

Система обеспечивает контроль составляющих вибрации: радиальной и осевых, а также измерение магнитной индукции собственного магнитного поля тока. Выходное напряжение этого датчика находится в линейной зависимости от величины магнитного поля. Датчик выполнен в виде печатной платы и микросхемы реализующего контроль величины магнитной индукции на основе эффекта Холла, обеспечивая измерение в диапазоне $\pm 0,25$ Т.

Изменением расстояния от образца до датчика несложно регулировать возможности контроля тока по результатам измерения магнитного поля в широком диапазоне значений.

Процессы в образце при пропускании импульса тока можно разделить на два этапа. Первый связан с активным воздействием импульса. На этом этапе происходит нарастание и тока и затем его перераспределение по окончании влияния скин-эффекта. Второй этап связан с появлением затухающих механических колебаний в образце, как следствие деформаций возникающих на первом этапе. Длительность второго этапа может существенно превышать время действия импульса тока и в значительной степени определяется свойствами образца, материалом, геометрическими размерами, наличием дефектов и особенностями его крепления.

В каждом измерительном канале проводилась оценка амплитуды (пиковое значение) контролируемого параметра. Оценки выполнялись для каждого импульса тока задаваемого в образце. Для повышения точности такие оценки усреднялись для каждого значения заданного тока. Общие погрешности результата менее 5%. Приведены исследования зависимости вибрационного отклика и производной от величины магнитного поля тока. Получены результаты механического отклика на пропускание тока через образцы различных материалов (медь, серебро и золото), различных диаметров. Максимальные изменения магнитного потока на зависимости соответствуют пиковым значениям величины ускорения во время активного воздействия импульса тока.

Получены результаты зависимости пиковых значений вибрации от тока для различных диаметров образца и для различных материалов образцов с одним диаметром. Увеличение диаметра образца при постоянной плотности тока приводит к увеличению ускорения. Более высокие уровни вибрационного отклика типичны и для образцов из металлов с более высокой плотностью, для рассматриваемой группы металлов с близкими магнитными свойствами.

При постоянной амплитуде импульсов тока пиковое значение вибрационного отклика больше для образцов с меньшим диаметром и для материалов с более высокой удельной плотностью. При постоянной амплитуде плотности тока пиковое значение ускорения вибрационного отклика больше для образцов с меньшим диаметром поперечного сечения. Во время активного действия импульса тока пиковые значения амплитуды ускорения вибрационного отклика близки к моментам максимального значения производной значения магнитного поля.

Список литературы

1. Троицкий О.А., и др. Физические основы и технологии обработки современных материалов (теория, технологии, структура и свойства), том I и том II Изд. АНО ИКИ (Москва - Ижевск) 2004 г., 563 с. и 467 с.
2. Троицкий О.А., Пластическая деформация металла, вызванная пинч-эффектом. Изв. АН СССР, сер. № 6, 1977, с.118 – 122.
3. Федосов В.П. Цифровая обработка звуковых и вибросигналов в LabView. Справочник функций системы NI Sound and Vibration LabVIEW. М., ДМК Пресс, 2010, 1296 с.
4. Engineer. John Wiley & Sons, Inc., 2012,

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГЛАВНОГО РАБОЧЕГО МЕХАНИЗМА КРИВОШИПНОГО ПРЕССА НА БАЗЕ РЫЧАЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ ВЫСОКИХ КЛАССОВ

Тулешов А.К., Джомартов А.А., Дракунов Ю.М., Джамалов Н.К.

¹Институт механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова, Алматы, Казахстан;
(dgpimmash@mail.ru).

Как в каждой технологической машине, в кривошипном прессе [1] имеется рабочее звено – ползун, с помощью которого перемещается обрабатывающий инструмент – штамп. Ползун является последним звеном главного рабочего механизма (ГРМ). Ползун, перемещающий штамп в кривошипных прессах, совершает заданное возвратно-поступательное движение при работе ГРМ на базе рычажных механизмов.

В настоящее время широкое распространение для штамповки изделий получили кривошипные прессы на базе плоских рычажного механизмов 2-го класса [2]. Одной из больших проблем данных прессов является перекосы ползуна под воздействием эксцентричного приложения деформирующей силы и суммарной линейной упругой деформации звеньев пресса и штампов под нагрузкой. Перекосы ползуна кривошипного пресса уменьшают точность штамповки и вызывают его заклинивание и приводят к его поломке. Перекосы при эксцентричном приложении нагрузки меньше у кривошипных прессов, ГРМ которых содержит два шатуна, благодаря лучшему направлению ползуна и меньшим нагрузкам на направляющие по сравнению с кривошипными прессами с одним шатуном.

Для уменьшения перекосов ползуна, необходимо уменьшить эксцентриситет прилагаемой нагрузки или увеличить мощность пресса. В случае кривошипного пресса, ГРМ которого содержит два кривошипа, эффект от смещения нагрузки будет меньше по сравнению с ГРМ с одним шатуном.

Кривошипные прессы ГРМ с двумя шатунами имеют большие преимущества по сравнению с прессами ГРМ с одним шатуном, благодаря лучшему распределению сил на ползун и соответственно меньшими нагрузкам на направляющие ползуна. Недостатками типовых кривошипных прессов с двумя шатунами является сложность конструкции, увеличение габаритов, металлоемкость из-за наличия дополнительного кривошипа и шатуна.

Для устранения данных проблем, в работе предлагается для проектирования ГРМ кривошипных прессов использовать плоские рычажные механизмы высоких классов [2]. В работе получены различные схемы плоских рычажных механизмов IV класса [3], для проектирования новых кривошипных прессов.

Синтезирован новый ГРМ кривошипного пресса на базе плоского рычажного механизма IV класса и был изготовлен его прототип. Проведены испытания прототипа нового ГРМ кривошипного пресса.

Работа выполнена по проекту № AP05134959 по бюджетной программе 217 «Развитие науки», подпрограммы 102 «Грантовое финансирование научных исследований»

Список литературы

1. Свистунов В.Е. (2008) Кузнечно-штамповочное оборудование, Кривошипные прессы: Учебное пособие. М.: МГИУ. ISBN 978-5-2760-1589-7
2. Артоболевский И.И. Теория механизмов и машин. – М., «Наука», 1975, 639 с.
3. Джолдасбеков У.А. Графо-аналитические методы анализа и синтеза механизмов высоких классов. – Алма-Ата: Наука, 1983. – 256 с.

ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ НЕЗАВИСИМОГО ДВИЖЕНИЯ

Уалиев З.Г.

Казахский Национальный педагогический университет имени Абая, г.Алматы, Казахстан
(e-mail: z.ualiyev@mail.ru)

Во многих быстроходных машинах-автоматах применяются шарнирно-стержневые или кулачково-рычажные механизмы с существенно упругими (конечные линейные деформации) звеньями. Раскручивания деформированных валов и расжатия упругих пружин осуществляются под действием потенциальных энергий деформированных упругих тел. Движение таких исполнительных механизмов в этом переходном процессе, где осуществляется заданная технологическая работа, не зависит от движения двигателя. Эти механизмы носят название – механизмы независимого движения [1]. В данной работе приводятся некоторые принципы составления математических моделей передаточных и исполнительных механизмов независимого движения с существенно упругими звеньями. Полный цикл движения этих механизмов рассматривается как отдельные периоды, в которых упругие звенья представляются как связи, так и источники движения. Необходимо отметить, что в каждом периоде движения изменяется характер внешних нагрузок и сил сопротивления. Таким образом, указанные механизмы независимого движения являются механизмами переменной структуры с упругими звеньями и связями. Исследование движения механизмов и машин связано с построением сложных моделей механических систем. Составление дискретных моделей многомассовых механических систем начинается с выделения инерционных и упругих элементов. Учет различных видов нелинейности, упругости элементов механической системы решается в каждом конкретном случае, исходя из целей изучения динамических процессов. Зачастую сначала учитывают податливость валов и упругих муфт на кручение, податливость шпоночных, шлицевых и фланцевых соединений, гибких связей в ременных и цепных передачах. При необходимости учитывают податливость зубчатых зацеплений, винтовых и червячных передач и трение в кинематических парах. Будем предполагать, что все эти элементы обладают «линейными» характеристиками, т.е. при их деформации возникают упругие силы или моменты, пропорциональные деформации, и диссипативные силы или моменты, пропорциональные скорости деформации. Жесткости упругих элементов определяют экспериментально или рассчитывают по известным формулам. При таком выделении упругих элементов инерционные элементы обычно оказываются системами с одной степенью свободы. В процессе движения механизмов переменной структуры (МПС) изменяется число подвижных звеньев, степень свободы, вид и класс механизма. Это позволяет использовать их в качестве устройств для выполнения сложных технологических процессов и механизмов ударного действия. Отрицательной стороной МПС является появление дополнительных ударных нагрузок в момент изменения структуры механизма. Математической моделью механизма переменной структуры является дифференциальное уравнение с разрывными коэффициентами, в частности, приведенный момент инерции является кусочно-непрерывной и положительно определенной функцией положения. Определение законов движения таких механизмов связано с решением дифференциальных уравнений движения с конечно-разрывными коэффициентами. В основном, в многозвенных механизмах переменной структуры правая часть уравнения – обобщенная сила - представляет собой непрерывную функцию положения и времени. Задача заключается в определении закона движения звена приведения механизма переменной структуры в окрестности точки разрыва инерционных параметров. В работе [2] предложена методика определения закона движения звена приведения механизмов переменной структуры с нелинейными функциями положения с одной степенью свободы.

Список литературы

1. Уалиев Г., Уалиев З.Г. Математическое моделирование динамики механических систем с переменными характеристиками, Алматы, 2007 г.,-332 с.
2. G. Ualiyev, Z. Ualiyev. Dynamic of multiloop lever mechanisms with elastic links. Scientific journal of International Federation for the Promotion of Mechanism and Machine Science «Problems of mechanics», International conference Mechanics 2014, Tbilisi Georgia, p. 68-72.

ГИДРОДИНАМИКА В ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТАХ ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН И ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С УЧЕТОМ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Урманчиев В.И.¹, Кузнецов Р.Ю.², Шакиров Р.А.³

¹Институт машиноведения РАН, г. Москва, Россия

²Gazprom International, г. Санкт-Петербург, Россия

³АО НТФ «ПерфоТех», г. Москва, Россия

В докладе рассмотрен вопрос гидродинамики в продуктивных пластах при бурении скважин и эксплуатации месторождений с учетом флюидодинамических процессов, служащий основой предсказательного подхода при строительстве скважины, который позволяет не только обеспечить стабильную ее работу на весь срок службы месторождения, но и сохранить вышележащие пласты от изменений.

Из анализа влияния различных факторов на проникновение твердой фазы в пласты-коллекторы (кольматация) в процессе строительства скважин следует, что изменение фильтрационной характеристики коллектора в призабойной зоне продуктивного пласта при проникновении бурового раствора является следствием совокупного действия множества факторов. Проведенный анализ влияния концентрации глинистых частиц, температуры окружающей среды и интенсивности излучения на процессы фильтрации промывочной жидкости и кольматации на образцах кернов показал, что основными факторами, влияющими на процесс взаимодействия составных частей промывочной жидкости с проницаемыми пластами, являются направление потока промывочной жидкости относительно стенки скважины, концентрация частиц в промывочной жидкости, энергия активации, температура окружающей среды.

Задача получения необходимой степени кольматации может решаться следующими путями:

- изменением интенсивности воздействия;
- повышением концентрации твердой фазы. Ограничивающими факторами могут быть повышение плотности и вязкости промывочной жидкости, приводящее к ее поглощению и росту реологических показателей;
- увеличением времени воздействия. Однако это положение справедливо только для статических и динамических условий. В волновом поле формирование кольматационного экрана проходит в течение нескольких секунд.

Процессы кольматации происходят и внутри продуктивного пласта при его эксплуатации методами «заводнения». В связи с этим поставлена задача изучить механизм создания кольматационного экрана частицами различного происхождения (реликтовое, техногенное) в процессе разработки месторождений, перемещаемыми вместе с фильтрационными потоками. Это приводит к созданию кольматационного экрана (блокированию) на границах между высокопроницаемыми малоглинистыми коллекторами и низкопроницаемыми высокоглинистыми участками.

С целью решения этой проблемы в работе рассмотрены теоретические аспекты изменения структуры порового пространства коллектора в процессе разработки месторождения, приводящие к сосредоточению остаточных запасов в низкопроницаемых высокоглинистых коллекторах терригенного комплекса и их экранированию.

ВИБРОАКУСТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССА ПОВЕРХНОСТНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Федоров С.В., Козочкин М.П., Маунг Тхеин Хту, Зыкова М.А.
МГТУ СТАНКИН

Исследования процессов поверхностного легирования материалов с использованием концентрированных энергетических потоков показали возможность создания износостойких поверхностных слоев. Однако нестабильность параметров импульсного электронного пучка и процесс его взаимодействия с обрабатываемым материалом приводит к довольно значительным случайным изменениям, которые происходят спонтанно, независимо от системы управления.

Эксперименты показали, что в этой ситуации метод акустической эмиссии может оказать существенную помощь. Регистрация виброакустического сигнала позволяет контролировать, стабилизировать и оптимизировать процесс нанесения покрытий.

Процесс поверхностного легирования был изучен на установке "RITM-SP". Рабочий стол агрегата был заменен нитридным образцом стали 08Cr17Ti. Ряд пластин был покрыт магнетронным напылением сплавом Nb70Hf22Ti8, который впоследствии использовался в качестве материала для поверхностного легирования. Облучение вызывает диссоциацию нитридов железа. Выделяющиеся атомы азота вступают в экзотермическую химическую реакцию с материалом покрытия с образованием тугоплавкой нитридной фазы на основе Nb и Hf.

Для регистрации виброакустических сигналов, плата была подключена к акселерометру через волновод (рис.1). Для получения информации о процессе регистрируемый виброакустический сигнал подвергали частотно-временному анализу. Проведено сравнение спектров вибросигналов, полученных для различных временных интервалов с момента возникновения импульса, и записей эффективных значений сигналов в различных частотных диапазонах.

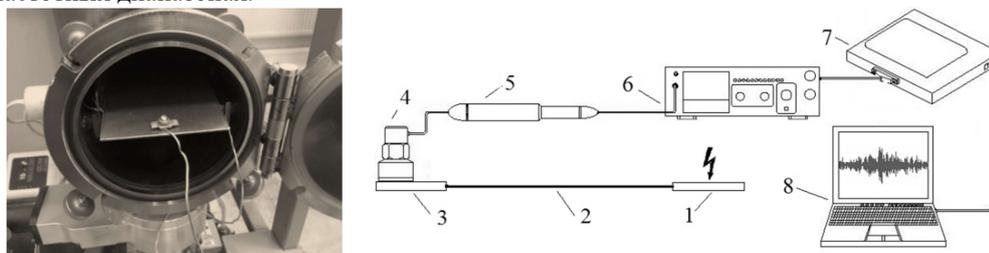


Рис. 1. Схема канала регистрации виброакустических сигналов: 1-тестовый образец; 2-проводной волновод; 3-приемная пластина; 4-акселерометр KD-35 с магнитом; 5-предусилитель PM-3; 6-усилитель VSHV-003; 7- ADC E440; 8-записывающий компьютер.

Установлено, что происходит резкое увеличение амплитуды виброакустического сигнала при высоких значениях зарядного напряжения, которое связано с интенсификацией процесса испарения. Это позволяет найти рациональные режимы облучения для электронно-лучевого легирования поверхности, предполагающие максимально возможное энергоснабжение, ограниченное испарением пленки с легирующими компонентами.

Для виброакустического сигнала с облученной азотированной пластиной, покрытой легирующим покрытием, после 10 мс наблюдается резкое увеличение амплитуды, что свидетельствует о возникновении процесса с высокой виброакустической активностью. Можно утверждать, что такая активность связана с образованием фазы нитрида в результате экзотермической химической реакции, которая находится в хорошем согласии с данными рентгеноструктурного анализа (рис. 2).

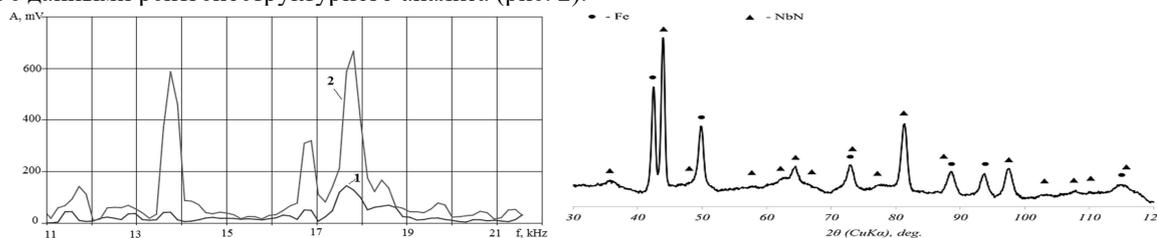


Рис. 2. Сравнение спектров виброакустического сигнала в диапазоне частот 11-22 кГц для интервала до 10 мс (график 1) и для интервала в области 15 мс (график 2), дифракционной картины от образца.

ИЗНОС ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ПЛАСТИН ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА С ПОВЕРХНОСТНЫМ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Федоров С.В., Мин Хтет Со, Кузнецова А.П.
МГТУ СТАНКИН

Для экспериментов использовались фрезерные пластины с немелованным мелкозернистым сплавом H13A производства Sandvik (N 15, S 20, K 25). Для фрезерных работ использовались пластины без покрытия 345R-1305E-KL (режущая группа K). Модифицированные вставки в ходе экспериментов сравнивали со вставкой 345R13T5E-ML (режущая группа M), имеющей фирменное износостойкое покрытие.

Некоторые вставки подвергались легированию приповерхностного слоя перед нанесением износостойкого покрытия. Обработку проводили с помощью станции RITM-SP. Нанесение тонкого слоя карбидообразующих химикатов (в данном случае мишеней из сплава $Nb_{70}Hf_{22}Ti_8$ alloy) на поверхность инструмента перед его обработкой электронным пучком позволяет достичь модифицированной структуры на режущих поверхностях за счет тепловыделяющей реакции между металлом пленки и углеродом, содержащимся в твердом сплаве. Внешний слой обогащен γ -WC и (NbHf) с высокоплавкими карбидными фазами. Максимально достижимые толщины с доработанной структурой составляли 4 мкм.

Окончательно инструмент был покрыт на установках Platit $\pi 80$. Многослойное покрытие TiAlN-ML (фирменное название) состоит из чередующихся нитридных фазовых слоев с различным содержанием Al и Ti и выращивается на клеевом слое олова.

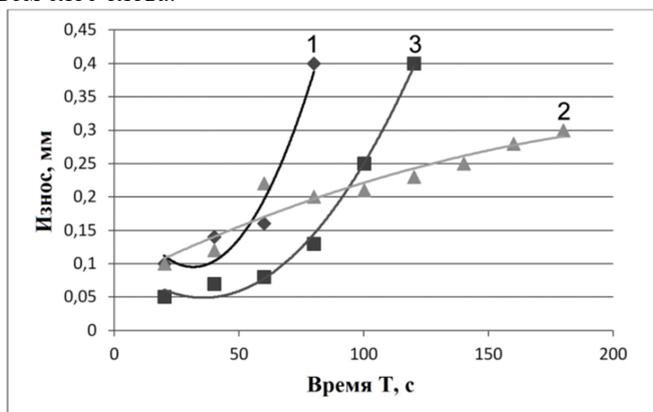


Рис. 1. Износ задней поверхности сменных пластин H13A при торцевом фрезеровании сплава $NiCr_{20}TiAl$. 1 – TiAlN-ML покрытая вставка, 2 – TiAlN-ML покрытая и поверхностно микро – сплавленная вставка, 3 – (AlTi)N вставка Sandvik Coromant с покрытием. $v = 95$ м/мин, $t = 0.2$ мм, $s = 0.1$ мм/зуб

Изучено влияние электронно-лучевого легирования поверхности на работу сменных вставок при торцевом фрезеровании кованой заготовки из никротового сплава твердостью 330 НВ. Фрезерование проводили с помощью вертикальной фрезерно-консольной машины VM 127 м, по симметричной схеме.

При сравнении линий 1 и 3 (рис. 1), эффективность работы поверхностного антифрикционного слоя в покрытии вставок Sandvik можно отчетливо определить. Стойкость вставки в два раза превысила вставку, имеющую аналогичное покрытие (TiAlN-ML) и характеризовалась значительным наростом обрабатываемого материала на участках, прилегающих к режущей кромке. В зоне катастрофического износа, где эффект антифрикционного слоя нивелируется, преобладает абразивный износ инструмента, а кривые ведут себя почти одинаково.

Несколько иное явление можно наблюдать при фрезеровании инструментом, подвергнутым комбинированной обработке поверхности (линия 2). Благодаря легированию приповерхностного слоя, лежащего в основе покрытия, вставка значительно лучше противостоит абразивному износу. При указанных выше режимах резания его стойкость в два раза выше, чем у пластины Sandvik, и в три раза выше, чем у пластины с покрытием TiAlN-ML, несмотря на то, что легированная вставка теряет прочность на начальной стадии износа. Следует отметить, что это значительное преимущество инструментов, подвергаемых только поверхностному легированию, которое показывает существенное повышение износостойкости.

Мы с благодарностью отмечаем финансовую поддержку этой работы Министерством образования и науки Российской Федерации, в рамках выполнения государственного задания в области научной деятельности МГТУ "СТАНКИН" (№11.1817.2017/4.6).

ОБ ИЗМЕНЕНИИ ЖЕСТКОСТИ ПОЛКИ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ГНУТОГО ПРОФИЛЯ

Филимонов В.И.¹, Джанаев Ш.Р.²

¹Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия; (E-mail: fwiumz@mail.ru).

²Ульяновское Конструкторское Бюро Приборостроения, Ульяновск, Россия.

При изготовлении гнутых профилей методом интенсивного деформирования, в котором формовка элементов осуществляется одновременно, жесткость подгибаемых полок изменяется весьма существенно [1]. В свою очередь, жесткость подгибаемых полок влияет на процесс формирования в целом и на потерю устойчивости заготовки в межклетьевом пространстве профилировочного станка в частности. Так, при превышении предельного угла подгибки в каком-либо переходе может наблюдаться «закусывание» заготовки или излом полки, что приводит к неисправимому браку формируемого профиля и необходимости корректировки технологии. Цель работы – выявление изменения жесткости полки при формовке профиля с элементами жесткости, формируемого по схеме уголкового профиля.

Рассмотрим пример формообразования F-образного профиля 40.5x34.4x0.7 по режимам, установленным согласно работе [2]. Схема формообразования указанного профиля представлена на рис. 1,а, а режимы подгибки несущей левой полки составляли: 0-5-10-25-50-70-88-108, а несущей правой полки : 0-5-16-26-52-52-72. Для оценки жесткости подгибаемых полок выбирали локальные системы координат, начало которых размещали на базовом элементе (в данном случае – срединная зона изгиба). Базовым элементом обычно служит элемент, наименее подверженный смещению в вертикальной плоскости каждого из переходов. В выбранных таким образом локальных системах координат рассматривали характеристики жесткости левой и правой полок с помощью утилиты МЦХ программы «Компас-3Д» (аналогичные утилиты имеются в AutoCad) для каждого из переходов. Результаты расчетов для левой полки представлены на рис. 1,б, где видно, что момент сопротивления полки относительно оси ОХ монотонно увеличивается, а момент сопротивления относительно оси ОУ сначала несколько увеличивается, а затем резко уменьшается.

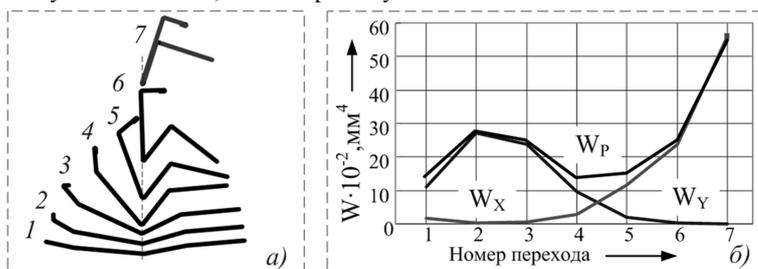


Рис. 1. Схема формообразования (а) и изменение моментов сопротивления левой полки профиля (б): 1-7 – номера переходов.

Однако для оценки жесткости полки при формообразовании профиля в каждом переходе необходимо привести моменты сопротивления к осям, одна из которых совпадает с несущей полкой. Именно относительно этой оси следует выполнять расчет несущей способности полки при действии на нее формирующего валька последующего перехода (сосредоточенная нагрузка на свободном конце, перпендикулярная плоскости подгибаемой полки); в расчетной схеме надлежит брать консольное защемление полки на предыдущем переходе, а зону изгиба, примыкающую к базовому элементу, считать шарнирно закрепленной. Такое представление расчетной схемы в наибольшей степени соответствует реальному процессу формообразования гнутого профиля в вальках. Выполнение расчетной процедуры для каждого из переходов позволяет выявить склонность полки к потере устойчивости в форме излома. Этот вид потери устойчивости характерен для полок с элементами жесткости, которые как бы подкрепляют периферийный элемент. Если же рассматривать правую полку обсуждаемого профиля, то здесь периферийный элемент достаточно широкий и для него потеря устойчивости проявляется в виде кромочной волнистости. В этом случае следует выполнять оценку потери устойчивости по методике работы, использующей критерий в виде индикаторной функции [1, 2], для чего нужно предварительно определять продольные деформации подгибаемых полок относительно базового элемента, например, по модифицированной модели Чанга. В обоих случаях потери устойчивости угол подгибки в текущем переходе служит нагрузочным параметром. Однако следует иметь в виду, что в большинстве случаев изменение углов подгибки ведет к изменению текущей конфигурации подгибаемой полки в соответствующем межклетьевом пространстве, а в более широком смысле приводит к изменению числа переходов. Кстати, при разработке технологии производства нового профиля и соответствующего этой технологии профилировочного станка можно изменять число переходов (обычно в сторону увеличения) для предотвращения потери устойчивости. Однако при ориентации технологии на оборудование, имеющееся у заказчика, такая возможность отсутствует и можно только перераспределять углы подгибки с итерационной оценкой несущей способности полки по обсуждаемым здесь характеристикам (моментам сопротивления). В критических случаях возможно применение межклетьевых проводок [3].

Список литературы

1. Филимонов А.В., Филимонов С.В. Изготовление полузакрытых гнутых профилей в роликах методом интенсивного деформирования / Под ред. проф. В.И. Филимонова. Ульяновск: УлГТУ, 2010. 206 с.
2. Лапин В.В. Совершенствование технологии и инструмента для изготовления в роликах гнутых профилей с краевыми элементами жесткости. Ульяновск: УлГТУ, 2016. 225 с.
3. Лапин В.В., Филимонов В.И. Конструкции и изготовление профилегибочного оборудования. Ульяновск: УлГТУ, 2012. 239 с.

МНОГОСКВАЖИННОЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РЕГИОНА.

Филиппов О.С., Рослякова А.С.

МГУ им. М.В. Ломоносова

Актуальной задачей, связанной с разработкой и эксплуатацией месторождений углеводородов, является расчет устойчивости скважины. Решение этой задачи наиболее важно для горизонтальных скважин и скважин с повышенной вероятностью аварии. Для предотвращения аварий возникает необходимость в многоскважинном геомеханическом моделировании ствола и окрестностей стволов скважин.

Данная работа посвящена построению многоскважинной геомеханической модели напряженного состояния месторождения и в окрестностях стволов скважин. Метод построения модели состоит из четырех основных этапов. Это построение модели упругих и прочностных свойств (МУПС), построение модели напряженно-деформированного состояния до бурения (МНДС до бурения), после бурения (МНДС после бурения) и корреляция данных по всем рассчитанным скважинам. Данный метод основан на имеющихся данных бурения, каротажных и геологических сведениях. Полученные значения калибруются с использованием данных, полученных при бурении замеров, лабораторных испытаний. Построение многоскважинной модели было реализовано в программном пакете Eiler1D.

Апробирование метода было произведено на примере Шапшинского месторождения Западной Сибири. Были построены геомеханические модели скважин, построена модель проектируемой скважины. Параметры, полученные в результате моделирования, показали сходимость с лабораторными данными.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О СКОРОСТЯХ ДЛЯ МЕХАНИЗМА С ПЯТЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ВЕРТЕБРАЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ

Филиппов Г.С., Ласточкин А.Б., Гаврилина Л.В.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

В работе рассмотрен механизм параллельной структуры с пятью степенями свободы для проведения вертебральных операций. Решена задача о положениях и задача о скоростях.

В настоящее время получает все большее распространение малоинвазивная хирургия[1], когда операцию на внутренних органах проводят через небольшой разрез величиной 5-10 мм. Подобного рода операции невозможны без роботизированного рабочего инструмент. В работе предлагается механизм параллельной структуры для проведения таких операций на позвоночнике – вертебральных операций рис.1.

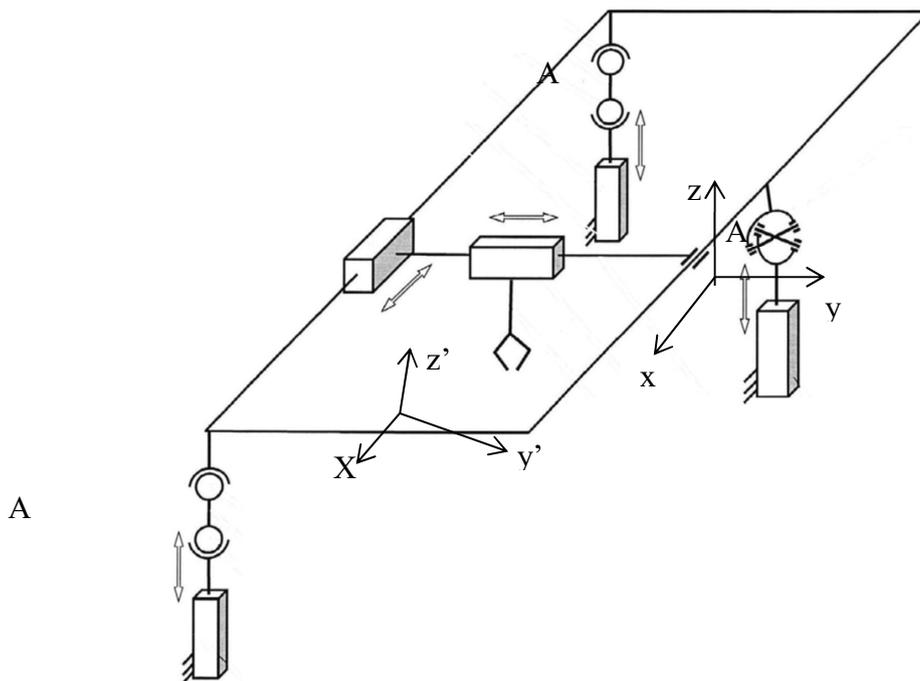


Рис. 1. Схема механизма с пятью степенями свободы для проведения вертебральных операций.

Решение задачи о скоростях основано на методике К. Госслена и Д. Анджелеса – уравнения связи переписываются в неявном виде дифференцируются по времени и группируются таким образом, что получается зависимость обобщенных скоростей в приводах от абсолютных скоростей выходного звена.

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F1}{\partial \alpha} & \frac{\partial F1}{\partial \beta} & \frac{\partial F1}{\partial x} & \frac{\partial F1}{\partial y} & \frac{\partial F1}{\partial z} \\ \frac{\partial F2}{\partial \alpha} & \frac{\partial F2}{\partial \beta} & \frac{\partial F2}{\partial x} & \frac{\partial F2}{\partial y} & \frac{\partial F2}{\partial z} \\ \frac{\partial F5}{\partial \alpha} & \frac{\partial F5}{\partial \beta} & \frac{\partial F5}{\partial x} & \frac{\partial F5}{\partial y} & \frac{\partial F5}{\partial z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial F1}{\partial q1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial F2}{\partial q2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial F3}{\partial q3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial F4}{\partial q4} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial F5}{\partial q5} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{q1} \\ \dot{q2} \\ \dot{q3} \\ \dot{q4} \\ \dot{q5} \end{pmatrix}$$

Используя решение задачи о положениях, и задав скорость в приводах или выходного звена можно найти скорость выходного звена или в приводах соответственно.

Список литературы

1. Гаврилина Л.В., Демидов С.М., Орлов И.А., Шалохин К.А., Шарапов И.Б., Швец П.А. Разработка роботов параллельной структуры портального типа для ортопедических операций/ Медицина и высокие технологии. 2017. № 3. С. 55-61
2. Angeles J. The Qualitative Synthesis of Parallel Manipulators. / Journal of Mechanical Design, 2004, v. 126, pp. 617-624.
3. G. V. Rashoyan, A. B. Lastochkin, and V. A. Glazunov Kinematic Analysis of a Spatial Parallel Structure Mechanism with a Circular Guide. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2015, Vol. 44, No. 7, pp. 54–60. Allerton Press, Inc.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕРМООБРАБОТКИ СПЛАВОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Хасьянов У., Хасьянова Д.У.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

(E-mail: dinara.khasyanova@mail.ru)

Применение термической обработки для конструкционных материалов имеет большое значение в современном машиностроении. Как правило, термическая обработка является конечной операцией технологического процесса при переработке материалов для обеспечения высоких физико-механических и эксплуатационных характеристик.

Для материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) термическая и термомеханическая обработка связана с получением необходимых физико-механических и температурных характеристик. [1] Вследствие указанных особенностей для данного материала необходимо выделить следующие типовые группы термической обработки:

- формирование, закрепление вида и конфигурации заготовки, которую должна иметь готовая деталь в процессе ее эксплуатации. Например, изготовление пружины из проволоки;

- корректировка температур мартенситного превращения (МП) в некоторых пределах. Этот процесс происходит за счет растворения или коагуляции интерметаллидов (Ti_2Ni или $TiNi_3$) из сплава $TiNi$, которые прецизионно корректируют соотношение компонентов в матрице и, как следствие, температуры МП. Исходя из соотношения компонентов и наличия дополнительного легирования матрицы (Fe, Co или Cu) проявляется R-превращение и эффект сверхупругости, который может распространяться до температур Md (верхний предел температуры эксплуатации). [2]

- обработка на способ воспроизводства «односторонней памяти». ЭПФ проявляется за пределами температур эксплуатации, когда деталь принудительно деформируется в охлажденном состоянии и восстанавливает свои первоначальные размеры при нагреве [3];

- формирование обратимого ЭПФ (ОЭПФ). В данном случае деталь при охлаждении самопроизвольно деформируется в одном направлении, а при нагреве восстанавливает самопроизвольную деформацию;

- формирование двустороннего ЭПФ (ДЭПФ). В данном случае деталь при охлаждении самопроизвольно деформируется в одном, затем в противоположном направлении, а при нагреве та же деформация осуществляется в обратном порядке.

- обработка на повышение термомеханических характеристик.

Следует отметить, что для сплавов с содержанием Ni более 50,5ат% (или дополнительно легированных Fe, Cu, Co) осуществляется нагрев до 800°C с последующим «старением» при 400-500°C. [4]

Список литературы

1. Хасьянова Д. У. Технологическое обеспечение качества изготовления муфт ТМС и сборки трубопроводов. Диссертация на соиск. уч. степ. канд. наук. МГУПИ, Москва, 2012, 103 с.
2. Лотков А.И., Гришков В.Н. Никелид титана. Кристаллическая структура и фазовые превращения. Москва. Известия вузов. Физика, №5, 1985. 78 с.
3. Лихачев В.А., Петрова Н.Н. Структурный механизм накопления деформации при мартенситном превращении в $TiNi$. Ленинград. Издательство ФТИ им. Иоффе, 1984. 11 с.
4. Прокошкин С.Д., Капуткина Л.М., Хмелевская И.Ю. Структурообразование при ВТМО и свойства сплавов на основе никелида титана. Москва, Технология легких сплавов, №4, 1990. с. 34-39.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СПЛАВА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Хасьянова Д.У.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;
(E-mail: dinara.khasyanova@mail.ru)

Формоизменение – увеличение или уменьшение исполнительных размеров муфт, является завершающим технологическим процессом создания соединений, определяющим стабильность сборки. [1]

Низкотемпературные узлы трения в среде жидкого азота, для предотвращения процессов схватывания, требуют применения специальной смазки или разделительной среды. Смазка должна отвечать следующим требованиям – низкая температура замерзания; химическая инертность; низкая адсорбционность к влаге; хорошие теплопередающие свойства. Применение жидких или пастообразных смазок зависит от температуры затвердевания, ниже которой трение со смазкой превышает коэффициент трения без смазки – в среде жидкого азота недопустимы. В этом случае при высоких удельных нагрузках, в вакууме или в криогенных жидкостях, применяются гальванические покрытия, которые выполняют роль разделительного смазочного материала. К недостаткам данного метода относится ограниченный ресурс и невозможность при износе восстановления покрытия.

Температурное поле в зоне контакта во многом влияет на условия, происходящие в очаге деформации. Наблюдаются нарушения монотонности температурной зависимости коэффициента трения. Структура металлического покрытия и его свойства претерпевают существенные изменения. В результате происходит мгновенный местный нагрев металла, а при выходе из контакта – резкое охлаждение. Скорости нагрева и охлаждения, для слоя материала толщиной 100 мкм, соответственно составляют $4 \cdot 10^5 - 10^4$ и $10^3 - 10^4$ С/сек. В условиях кратковременности процессов трения и низкой теплопроводности материала, в теплопоглощении участвуют малые объемы покрытия.

Большая интенсивность теплового потока и малая глубина слоя участвующая в теплопоглощении ведут к тепловому удару способному к оплавлению. Цинковое покрытие обладает значительными преимуществами. Разделительная среда в виде цинкового покрытия величиной $2 \div 8$ мкм позволяет осуществлять качественное, без задигов и схватываний, формоизменение двух – трех муфт. Было установлено, что при напряжениях, не превышающих предела прочности материала покрытия, коэффициент трения не зависит от толщины покрытия, действует клиновой эффект, если эта величина не превышает 10 мкм. При превышении указанной толщины пропадает клиновой эффект и покрытие снимается “чулком”. С целью увеличения ресурса действия разделительной среды, до гальванического покрытия, на рабочие поверхности пуансона наносятся углубления в пределах $10 \div 15$ мкм. На поверхность пуансона, имеющего высокую твердость, методами поверхностно пластического деформирования (ППД) (алмазное выглаживание, вибронакатывание и т.д.) наносятся углубления определенной конфигурации. Возможные виды конфигураций, получаемые методами ППД, представлены на рис 1 [2].



Рис. 1. Виды конфигураций при нанесении углублений с помощью метода поверхностно пластического деформирования (ППД).

Мягкие металлические покрытия, находящиеся в углублениях, в процессе деформирования, постепенно вытесняются, выполняют роль разделительного слоя.

Список литературы

1. Хасьянова Д. У. Технологическое обеспечение качества изготовления муфт ТМС и сборки трубопроводов. Диссертация на соиск. уч. степ. канд. наук. МГУПИ, Москва, 2012, 103 с.
2. Хачин В.Н. и др. Структурные превращения, физические свойства и эффекты памяти в никелиде титана и сплавах на его основе. ФММ. вып.3, 1978. №6. – с. 98 -103.

ХРОМУГЛЕРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ-НАНОКОМПОЗИТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ МАГНЕТРОННЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ

Хрущов М.М.¹, Марченко Е.А.¹, Атаманов М.В.², Левин И.С.¹, Антонова О.С.^{1,3}, Рэйляну М.Д.⁴, Авдюхина В.М.⁴, Образцова Е.А.⁵

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (michel_x@mail.ru);

²ООО «ИНАКОТЕК Центр», Москва, Россия;

³Институт металлургии и материаловедения РАН, Москва, Россия;

⁴Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, Москва;

⁵Институт общей физики РАН, Москва, Россия.

Проведено сравнительное исследование структурно-фазового состояния, микроструктуры и функциональных характеристик хромуглеродных покрытий двух различных типов: легированных хромом алмазоподобных покрытий (Cr-DLC), полученных реактивным магнетронным распылением в аргоне и смесях ацетилена с азотом, и покрытий, полученных распылением в аргоне изготовленной спеканием смеси хромового порошка и наноалмазов детонационного синтеза (Cr-НА) мишени.

Изучение особенностей структуры, микромеханических, прочностных и трибологических свойств металлуглеродных наносистем представляет интерес, как с практической точки зрения, так и в фундаментальном аспекте. В работе ставилась задача сравнительного изучения и оценки влияния особенностей структурно-фазового состояния покрытий Cr-DLC и покрытий, полученных магнетронным распылением Cr-НА мишеней, на функциональные свойства (коэффициент трения и длительность стабильной работы фрикционного контакта с покрытием в условиях высоких контактных давлений, механические свойства, адгезионная прочность).

Технология и условия получения покрытий Cr-DLC была описана ранее в [1], покрытий на основе Cr-НА мишеней – в [2]. Покрытия Cr-DLC и покрытия, полученные распылением Cr-НА мишеней, подвергали комплексному исследованию структурных, механических и трибологических характеристик (использованные методики и режимы испытаний описаны в [1, 2]). Исследования адгезионной прочности методом царапания проводили на скретч-тестере REVETEST ф. CSM International (Швейцария). Полученные царапины изучали, используя оптическую и растровую электронную микроскопию. Результаты исследования покрытий приведены в табл. 1 и на рис. 1.

№ обр.	Тип мишени	Условия напыления	[C], ат.%	Фазовый состав	D _{Cr} , нм	H, ГПа	L _{C→A} , Н	f	N*
Cr-DLC									
1	Cr	Ar+C ₂ H ₂	80,4	Cr+Cr ₂₃ C ₆ +a-C:H	8,1	10	33,3	0,15	3500
2	Cr	Ar+C ₂ H ₂ +N ₂ (80:20)	64,3	Cr+Cr ₂₃ C ₆ +a-C:H	8,7	12,9	41,1	0,08	2400
3	Cr	Ar+C ₂ H ₂ +N ₂ (20:80)	27,4	Cr+Cr ₇ C ₃ +CrN+a-C:H	13,4	29,1	15,9	0,12	1000
Cr-НА									
4	Cr+НА	Ar	40,6	Cr+Cr ₇ C ₃	13	29,6	36	0,29	4100

Таблица 1. Условия нанесения, химический и фазовый состав, размеры областей (ОКР) хрома, нанотвердость, пороговая нагрузка L_{C→A} перехода от когезионного к адгезионному разрушению, коэффициенты трения f и числа циклов до разрушения N покрытий (контактное давление ~ 450 МПа).*

В результате рентгеноструктурных исследований в [2] было показано, что Cr-НА покрытия имеют двухфазную структуру, в которой субзерна (ОКР) хрома и карбида Cr+Cr₇C₃ имеют одинаковый размер ~ 13-14 нм. Линий алмазной фазы при этом не обнаружили, что позволяет говорить о малом ее содержании. Микроструктура Cr-НА покрытий отличается от наблюдаемой для наноккомпозитных АПП a-C:Cr и a-C:H:Cr, в которой включения хрома и его фаз внедрения размером ~ 2...15 нм хаотически распределены в аморфной матрице на основе аморфного углерода a-C или твердых углеводородов [1]. Данные [1] по размеру включений в Cr-DLC согласуются с результатами просвечивающей электронной микроскопии [3]. Таким образом, в случае легированных хромом покрытий аморфного углерода и хром-наноалмазных покрытий речь, фактически, идет о разных типах наноструктурированных металл-углеродных покрытий.

Анализ результатов испытаний покрытий на адгезионную прочность показал, что процесс разрушения при царапании с растущей нагрузкой можно разделить на пять стадий: (1) образование тонких трещин → (2) образование локальных сколов на поверхности покрытия → (3) образование множественных трещин в объеме покрытия → (4) локальное вскрытие подложки, связанное с развитием процессов истирания покрытий → (5) полное вскрытие (обнажение) подложки. На стадиях (1)–(3), процесс разрушения ограничен объемом покрытия и, согласно [4], является «когезионным», а на стадиях (4)–(5) в него оказываются вовлечены граница раздела с подложкой и ее материал, и разрушение становится «адгезионным». Нагрузку, связанную с обнажением подложки при истирании покрытия, можно рассматривать как критическую для перехода от когезионного к адгезионному (C→A) разрушению. В целом, покрытия 1–4 ведут себя сходно, однако в последней стадии (2), связанной с образованием локальных сколов, нет.

Приведенные на рис. 1 результаты указывают на возможное наличие корреляции между содержанием в

исследованных покрытиях углерода, числом циклов, предшествующих обычно связываемому с фрикционно-усталостным разрушением материала резкому возрастанию коэффициента трения, и характеристиками адгезионной прочности.

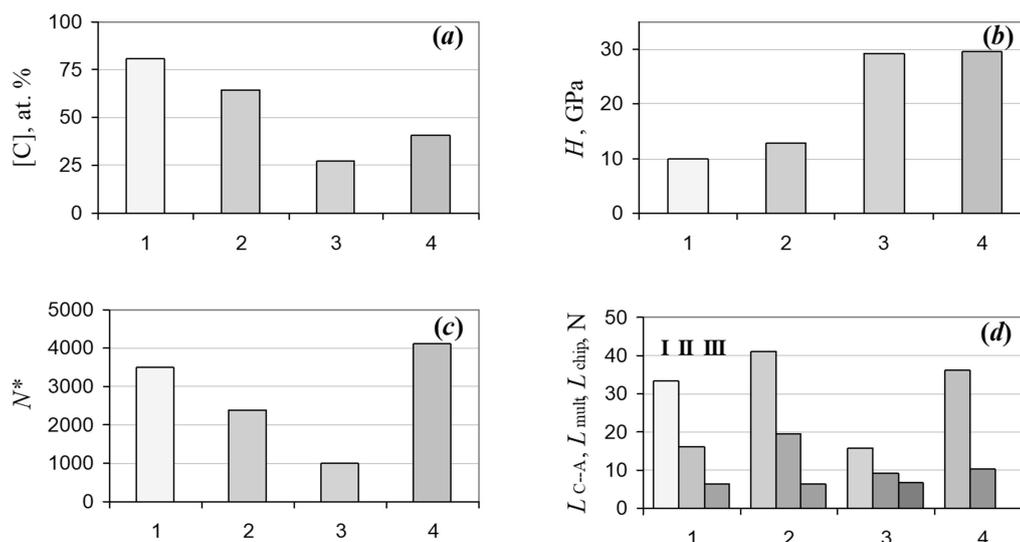


Рис. 1. Свойства покрытий Cr-DLC (обр. 1–3) и Cr-NA (обр. 4): (a) – содержание углерода; (b) – нанотвердость; (c) – число циклов N^* до возникновения нестабильности силы трения, при контактом давлении 450 МПа; (d) – величины, характеризующие адгезионную прочность: $L_{C \rightarrow A}$ (I) – пороговая нагрузка локального вскрытия подложки (переход от когезионного к адгезионному разрушению), L_{mult} (II) – пороговая нагрузка образования множественных трещин и L_{chip} (III) – образования локальных сколов.

Также был изучен вопрос о характере углеродной фазы в Cr-NA покрытиях. Исследование спектров комбинационного рассеяния (КР) Cr-NA покрытий показало, что характер распределения в них углерода существенно отличается от наблюдаемого в АПП, легированных хромом, где аморфный углерод выступает в роли матрицы, в которой распределены «армирующие» ее наноразмерные включения хрома и его фаз [1]. В Cr-NA покрытиях твердый углерод имеет вид достаточно больших сферических частиц и их агломератов ~ 2–10 мкм с разным типом графито- и алмазоподобной структуры, в которых отношение sp^3/sp^2 для отдельных частиц может меняться в очень широких пределах. Также при КР-исследовании дорожек трения было установлено наличие вблизи них большего количества углеродного материала, свидетельствующее о возможных процессах графитизации на фрикционном контакте в процессе трения. Такие микронного размера частицы углерода с меняющейся в широких пределах степенью графитизации способны играть роль твердой смазки, слой которой, образовавшийся в процессе трения, будет защищать поверхность Cr-NA покрытия и предотвращать его износ.

Таким образом, аморфный углерод в алмазоподобных покрытиях выполняет роль матричной фазы, которую «армируют» наноразмерные включения хрома и его фаз внедрения, тогда как в случае хромуглеродного покрытия, полученного с использованием хром-наноалмазной мишени, фазовый состав матрицы – хрома и его карбид, а углерод присутствует в виде достаточно больших, микронного размера, агломератов и образует при трении защитный слой, играющий роль твердой смазки. Установлено также наличие корреляции между содержанием углерода в покрытиях, их работоспособностью в условиях тяжело нагруженного контакта и пороговыми нагрузками начала различных типов локального разрушения при испытаниях на адгезионную прочность. При трении легированных хромом алмазоподобных покрытий число циклов N , при котором начинается разрушение или нарушаются условия стабильности работы фрикционного контакта, и пороговая нагрузка, при которой начинается локальное разрушение поверхности покрытий при испытаниях на адгезионную прочность, значительно снижается с увеличением содержания азота в реактивной смеси ацетилен-азот. Одновременно с этим коэффициент трения снижается, и антифрикционные свойства покрытий при этом улучшаются.

Список литературы

1. Хрущов М.М., Атаманов М.В., Марченко Е.А., Петржик М.И., Левин И.С. Алмазоподобные нанокompозитные покрытия а-С:H:Cr – структурное состояние, механические и трибологические свойства // Известия РАН. Серия физическая. 2014. Т. 78. С. 1257-1265.
2. Хрущов М.М., Атаманов М.В., Шевченко Н.В., Марченко Е.А. и др. Хромуглеродные покрытия на основе хрома и детонационных наноалмазов: Получение методом магнетронного распыления, особенности фазового состава и трибологические свойства // Пробл. машиностр. и надежности машин. 2018. № 2. С. 44-52.
3. Gassner G., Patscheider J., Mayerhofer P.H. a.o. Structure of sputtered nanocomposite CrCx/a-C:H thin films // J. Vac. Sci. Technol. B. 2006. V. 24. P. 1837-1843.
4. Bull S.J. Failure mode maps in the thin film scratch adhesion test // Tribology Intern. 1997. V. 30. P. 491-498.

ТВЕРДЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПОКРЫТИЯ, ЛЕГИРОВАННЫЕ ПЕРЕХОДНЫМИ МЕТАЛЛАМИ И КРЕМНИЕМ: ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-ФАЗОВОГО СОСТОЯНИЯ НА ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА

Хрущов М.М.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (michel_x@mail.ru).

На протяжении последнего десятилетия в отделе конструкционного материаловедения ИМАШ РАН проведены многочисленные исследования в области твердых углеродных покрытий трибологического назначения, в том числе, алмазоподобных, получаемых различными методами вакуумной ионно-плазменной технологии. Такие покрытия представляют интерес, прежде всего в силу необычной комбинации функциональных свойств – высокая твердость и износостойкость в них сочетается с хорошими антифрикционными свойствами [1-3]. Кроме того, в отделе трения ИМАШ РАН И.А. Буяновским и др., проводятся исследования особого типа покрытий, так называемых «углеродных покрытий-ориентантов» [4]. Идея этих работ состоит в том, чтобы добиться повышения уровня ориентированности молекул смазки в граничном слое не применением поверхностно-активных присадок, а путем использования упорядоченной структуры поверхности покрытия для ориентации молекул смазочного материала на границе твердой и жидкой фаз. Для этого на рабочие поверхности трущихся тел методом ионного осаждения из углеродной плазмы наносят покрытия, имеющие гомеотропно-ориентированную двумерно-упорядоченную линейно-цепочечную структуру, обеспечивающую образование высокоупорядоченного ориентированного граничного слоя, способствующего повышению антифрикционных свойств трибосопряжения в достаточно широком температурном интервале. Исследование всех указанных типов покрытий представляет интерес, как научной, так и с практической точки зрения.

В докладе обсуждаются результаты выполненных в отделе конструкционного материаловедения комплексных исследований структуры, химического и фазового состава, микромеханических и трибологических свойств ряда алмазоподобных покрытий, легированных химическими элементами, склонными к образованию карбидов и других фаз внедрения при взаимодействии с химически-активными газами, применявшимися при синтезе покрытий. Для изучения покрытий использовали рентгеновскую дифрактометрию, оптическую и растровую электронную микроскопию, энергодисперсионный микроанализ для анализа химсостава, инструментальное наноиндентирование, спектроскопию комбинационного рассеяния света для уточнения состояния углеродной структуры в покрытиях. Трибологические испытания проводили на воздухе в паре с нитридом кремния на шариковом трибометре для испытаний на фрикционную усталость. Обработку рентгенограмм покрытий проводили по методике, предложенной в [5].

Изученные покрытия были получены методом магнетронного распыления и плазменно-стимулированного осаждения в среде кремнийорганических прекурсоров. В качестве легирующих элементов использовали хром, молибден, вольфрам, кремний [6-8]. Также рассмотрен иной, не алмазоподобный, тип твердых углеродных покрытий [9], получаемый с использованием составных мишеней на основе хрома и наноалмазов детонационного синтеза. Показано, что в данном случае механизмы, определяющие трибологическое поведение таких покрытий иные, чем в легированных хромом алмазоподобных покрытиях, и связаны с характером распределения и особенностями состояния углерода в этих покрытиях.

В заключение, обсуждаются недавно полученные результаты структурных и трибологических исследований покрытий, легированных титаном и кремнием и полученных реактивным магнетронным распылением в смесях ацетилена и азота. На основе результатов обсуждения сформулированы возможных направления исследований в области легированных твердых углеродных покрытий для работы в условиях сухого и граничного трения.

Список литературы

1. Tribology of Diamond-like Carbon Films: Fundamentals and Applications / Ed. by C. Donnet, A. Erdemir. N.Y.: Springer. 2008. 675 p.
2. Семенов А.П. Трибологические свойства и вакуумные ионно-плазменные методы получения алмазных и алмазоподобных покрытий // Трение и износ. 2009. Т. 30. № 1. С. 83–102.
3. Хрущов М.М. Легированные алмазоподобные покрытия триботехнического назначения // Современные технологии модифицирования поверхностей деталей машин / Под ред. Г.В. Москвитина. М.: ЛЕНАНД. 2013. С. 78-113.
4. Буяновский И.А., Левченко В.А., Игнатъева З.В., Матвеев В.Н., Большаков А.Н. Трибологические характеристики углеродных алмазоподобных покрытий стальных деталей, функционирующих в смазочных средах // Современные технологии модифицирования поверхностей деталей машин / Под ред. Москвитина Г.В. М.: Ленанд. 2013. С.37-66.
5. Хрущов М.М., Свешников С.В. К методике рентгеновского исследования диффузного фона тонких аморфных и наноструктурированных покрытий, конденсированных на подложки // Нанотехнологии. 2012. № 8. С. 37-40.
6. Khrushchov M.M., Levin I.S., Marchenko E.A., Avdukhina V.M., Petrzikh M.I. Effect of structure and deposition technology on tribological properties of DLC coatings alloyed with VI A group metals // J. Phys. Conf. Series. 2016. V. 729. 0102016.
7. Левин И.С., Хрущов М.М., Марченко Е.А., Авдохина В.М. Влияние легирования на структуру и особенности трибологического поведения вакуумных алмазоподобных покрытий // Вестник Московского ун-та. Серия 3. 2016. № 2ю С. 46-52.
8. Хрущов М.М., Атаманов М.В., Марченко Е.А., Петржики М.И., Левин И.С. Алмазоподобные нанокompозитные покрытия а-С:Н:Сг – состояние, механические и трибологические свойства // Изв. РАН. Серия физич. 2014. Т. 78. С. 1257-1265..
9. Хрущов М.М., Марченко Е.А., Атаманов М.В., Левин И.С., Антонова О.С., Рэйлян М.Д., Авдохина В.М., Образцова Е.А. Хромуглеродные покрытия-нанокompозиты, полученные магнетронным распылением // Международная конференция «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», посвященная 80-летию ИМАШ РАН, Москва, 21–22 ноября 2018. Сборник материалов. М.: ИМАШ РАНМ. (статья в наст. сборнике).

ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ ПРИ ЛИСТОВОЙ РЕЗКЕ НА МАШИНАХ С ЧПУ

Ченцов А.Г.^{1,2}, Петунин А.А.^{2,1}

¹Институт математики и механики им. Н.Н.Красовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия;

²Уральский Федеральный университет, Екатеринбург, Россия; (e-mail: a.a.petunin@urfu.ru)

Исследуемая задача оптимальной маршрутизации (the tool path problem) [1] возникает при проектировании управляющих программ машин листовой резки с числовым программным управлением (ЧПУ) и заключается в формировании траектории инструмента (маршрута резки), который обеспечивает вырезку заготовок из листового материала в соответствии с полученной раскройной картой. Основные компоненты траектории инструмента приведены на Рис.1.

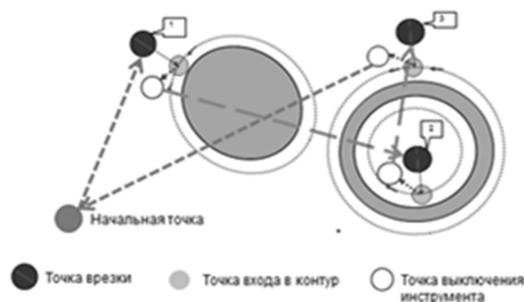


Рис. 1. Компоненты траектории (маршрута) резки.

В качестве критериев оптимизации решения используются время резки и стоимость процесса резки. В частности, время резки для сформированного маршрута резки рассчитывается по следующей формуле: $t_{cut} = L_{on} / V_{on} + L_{off} / V_{off} + N_{pt} \cdot t_{pt}$, где L_{off} – длина переходов с выключенным режущим инструментом (холостой ход); L_{on} – длина реза с включенным режущим инструментом; V_{off} – скорость холостого хода; V_{on} – скорость рабочего хода режущего инструмента; N_{pt} – количество точек врезки; t_{pt} – время, затрачиваемое на одну точку врезки.

В качестве математической модели предложено использовать дискретную модель задачи о последовательном обходе мегаполисов [2], которая предполагает конечный набор возможных точек врезки. Для построения оптимального решения задачи применена специальная схема динамического программирования, в рамках которой не предусматривается построение всего массива значений функции Беллмана (используются условия предшествования, присутствующие в исходной содержательной постановке задачи, поскольку существуют технологические ограничения на порядок вырезки контуров деталей). Предлагаемая процедура на основе технологического программирования позволила учесть эти ограничения. Кроме того, приходится учитывать технологические ограничения, связанные с термическими и механическими деформациями материала, возникающие при термической резке материала (лазерной, плазменной, газовой), что может вызвать искажение геометрии при резке деталей на машине с ЧПУ. Этот тип ограничений (т.н. «динамические» ограничения) также удалось формализовать [2-3]. Были разработаны соответствующие версии программного обеспечения для построения маршрута резки с учетом и этих дополнительных ограничений.

Таким образом, использованная математическая постановка существенно обобщает известную труднорешаемую задачу коммивояжера в форме обобщенной задачи курьера с дополнительными ограничениями. Использование условий предшествования значительно сокращают время получения точного решения. Так уникальной особенностью разработанного алгоритма решения задачи является возможность получения глобального экстремума для диапазона размерностей до 35 контуров, описывающих геометрию деталей. Отметим, что применение точных алгоритмов для решения сформулированной задачи не описано в научной литературе. Для задач большей размерности также возможно применение динамического программирования в режиме локальной оптимизации [5].

Список литературы

1. Dewil, R., P., Vansteenwegen, and D., Cattrysse. 2016. "A Review of Cutting Path Algorithms for Laser Cutters." The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 87: 1865-1884.
2. Ченцов А.Г. Экстремальные задачи маршрутизации и распределения заданий: вопросы теории: Москва-Ижевск. Регулярная и хаотическая динамика, 2008, 238 с.
3. Chentsov, P. A., & Petunin, A. A. (2016). Tooling routing for CNC plate cutting machines. IFAC-PapersOnLine, 49 (12), 645-650. doi: 10.1016 / j.ifacol.2016.07.762
4. Chentsov A.G., Chentsov P.A., Petunin A.A., Sesekin A.N. Model of megalopolises in the tool path optimization for CNC plate cutting machines // International Journal of Production Research, 2018. Vol. 56, Issue 14. pp. 4819-4830.
5. Petunin, A.A., Chentsov, A.A., Chentsov, A.G., Chentsov, P.A.: Elements of dynamic programming in local improvement constructions for heuristic solutions of routing problems with constraints. Automation and Remote Control 2017, 78 (4), pp. 666-681.

К ОЦЕНКЕ НАГРУЖЕННОСТИ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ ИНДЕНТИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛЕЙ ОСТАТОЧНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Чернятин А.С.^{1,2}

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (E-mail: cas@inbox.ru)

²ООО «НИИ Транснефть», Москва, Россия

В докладе содержатся результаты развития методики исследования нагруженности натуральных элементов конструкций, а также параметров деградации свойств материала способом вдавливания сферического индентора. Основы соответствующего подхода изложены в работе [1], где показана возможность определения искомых параметров модели P_i^* (поверхностных напряжений и предела текучести материала) на основе минимизации расхождения между массивом экспериментальных данных о полях поверхностных остаточных перемещений e_i^* ($i = 1, \dots, N_e$), возникающих после удаления индентора, и соответствующим массивом расчетных результатов e_i , полученных путем численного решения серии краевых задач механики деформированного твердого тела при текущих значениях P_j . При этом мерой расхождения является целевая функция $I = I(e, e^*)$, в качестве которой рассматривается среднее квадратичное отклонение. В качестве способа регистрации полей остаточных нормальных или тангенциальных перемещений точек поверхности исследуемого объекта, рассматривается высокочувствительный метод электронной цифровой спекл-интерферометрии (цена полосы интерференции $\sim 0,1$ мкм).

Расчет e при различных значениях параметров P , варьируемых в процессе минимизации целевой функции I , может производиться на основе численного решения (с применением МКЭ) контактной упругопластической задачи о вдавливании индентора (нелинейной и многоэтапной задачи). При этом в процессе минимизации целевой функции I – при варьировании P и расчете текущего e – для сокращения значительных вычислительных и временных затрат в работе [2] предложено использовать так называемый «банк откликов», который отражает кусочно-функциональную взаимосвязь $e_i = F_i(P_j)$ через предварительно построенные сплайновые гиперповерхности на основе серии численных расчетов краевых задач при различных значениях параметров P_j (далее – базовых задач).

Особенно возрастают требования к вычислительным мощностям компьютеров при реализации наиболее перспективного для практики способа нагружения натуральных объектов – динамического индентирования, открывающего возможность создания автономного специализированного оборудования для получения заданных энергетических характеристик процесса индентирования. С другой стороны, в этом случае задача моделирования процесса формирования поля остаточных перемещений значительно усложняется.

В связи с этим представляется перспективным для выстраивания взаимосвязи $e_i = F_i(P)$ использование искусственной нейронной сети (ИНС). При правильно определенной структуре ИНС может обеспечить более качественную зависимость F при сопоставимом количестве предварительно решенных базовых задач, результаты которых используются при обучении сети. Но главное преимущество ИНС в сравнении с процедурой восстановления сплайновой гиперповерхности каждой компоненты e_i для каждого текущего значения вектора P является быстроедействие в сочетании с возможностью одновременного определения всего массива e .

В работе приводится пример построения и использования ИНС в виде многослойного перцептрона – для задачи индентирования сферического штампа. Проводится выбор оптимальной структуры и способа обучения, обеспечивающих получение расчетного вектора e с заданной точностью. Для обучения используются результаты большого количества численных моделирований задачи индентирования, что потребовало разработки полностью автоматизированного вычислительного комплекса, объединяющего ПО ANSYS и MATLAB. Выполнена оценка точности определения P через решение задачи минимизации I с привлечением разработанной ИНС: показано влияние погрешности ИНС и исходных данных e_i^* .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-19-00351

Список литературы

1. Чернятин А.С., Разумовский И.А. Метод индентирования как способ оценки нагруженности и деградации механических характеристик материала технических объектов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. №4. С. 40–48.
2. Разумовский И.А., Чернятин А.С. Методология и программа для исследования напряженно-деформированного состояния с использованием интерференционно-оптических и численных методов // Машиностроение и инженерное образование. 2009. № 4. С. 42–51.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЕВ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКЕ В ГАЗОПОРШКОВОМ ПОТОКЕ ПРИСАДОЧНОГО МЕТАЛЛА

Чунихин Н.Н.

РТУ МИРЭА - Российский технологический университет, Москва, Россия (nchunihin@rambler.ru).

Известно [1,2], что импульсные лазеры используются для наплавки. Импульсную лазерную наплавку применяют для ремонта, восстановления и нанесения слоев с особыми свойствами на поверхности различных изделий машиностроения. На рисунке 1 приведена схема импульсной лазерной наплавки в газопорошковом потоке присадочного материала (ППМ).

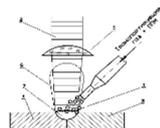


Рис. 1. Схема импульсной лазерной наплавки в газопорошковом потоке присадочного материала
1 – Частицы порошкового присадочного металла; 2- Лазерное излучение; 3,4 - Основной металл;
5 - Объектив сварочной установки; 6 - Струя парогазового факела; 7 – Сварочная ванна.

Ввод в сварочную ванну дополнительного металла позволяет увеличивать объем расплава, что обуславливает образование единичной точечной наплавки. Расположение таких единичных точечных наплавки по определенному закону позволяет формировать непрерывные валики и слои, наплавленные на поверхность изделия. При этом наплаваемый слой состоит из совокупности единичных точечных наплавки, расположенных на поверхности по определенному закону.

Анализ результатов исследований показывает, что изменение поверхностного рельефа в диаметральном сечении единичной точечной наплавки может быть аппроксимировано косинусоидой. Таким образом, из принятой аппроксимации высоту профиля поверхности единичной наплавки — R_z^h можно определить из выражения

$$R_z^h = A(1 + \cos \frac{\pi \cdot x}{r}), \quad (1)$$

где A - постоянная для данного металла, зависящая от массового расхода ППМ, m ; r - радиус точки, m ; x - текущая переменная, m .

При импульсной лазерной наплавке непрерывные валики получают при однокоординатном перемещении наплаваемых деталей. В этом случае скорость наплавки $U_n = dt * f * K_p$, m/c , где f - частота следования импульсов, $Гц$; K_p - коэффициент перекрытия точек, $K_p = S / dt$, здесь S - шаг перемещения поверхности деталей относительно лазерного излучения, m . Оптимальная величина шага при условии минимальной шероховатости поверхности и максимальной скорости наплавки может быть определена теоретически. Из геометрических соображений поверхность наплавки должна иметь минимальную шероховатость при условии $R_z^h = 2(R_z^h - R_y)$. В общем случае $R_z^h = A(1 + \cos 0) = 2A$, поэтому

$$A + (1 + \cos \frac{\pi \cdot x}{r}) + A[1 + \cos \frac{\pi(x-S)}{r}] = 2A, \quad (2)$$

где $0 \leq x \leq g$.

Уравнение (2) обращается в тождество при $S = r = dt/2$. Из этого следует, что минимальная шероховатость поверхности может быть обеспечена при перекрытии единичных точечных наплавки $P = 50\%$, что также подтверждается экспериментальными исследованиями. Исходя из этого, максимальная скорость наплавки $U_n \max = dt f / 2$, m/c . Полученные закономерности справедливы и при наплавке тонких слоев, т.е. в тех случаях, когда используется двух координатное перемещение поверхности металла относительно лазерного излучения (рис. 2).

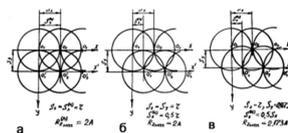


Рис. 2. Схемы перекрытия единичных точек при двух координатном перемещении наплаваемой детали

Приведенные результаты могут быть использованы при автоматизации процесса импульсной лазерной наплавки, что обеспечит существенное повышение производительности и качества наплавочных работ.

Список литературы

1. Гладков Э.А., Шиганов И.Н., Ластовирия В.Н. Управление процессами сварки концентрированными потоками энергии. М.: Изд-во МГТУ им Баумана. 2017. -114 с.:ил.
2. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 1. Физические основы технологических лазеров: Учеб. пособие для вузов./В.С. Голубев, Ф.В. Лебедев; Под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Высш. шк.,1987. 191с.: ил.

АКТУАЛЬНЫЙ ИЗНОСОМЕТР (WEARMETER) СО СХЕМОЙ ТРЕНИЯ КОЛОДКА-РОЛИК

Чхегиани П.Д.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (Pavelnew1@yandex.ru).

Известно, что в процессе трибоиспытаний с использованием наиболее распространенных до настоящего времени машин трения Амслер рабочие поверхности роликов из цилиндрических превращаются в граненные. Уже в первой половине XX века [1] отмечали: «...превращением их в многогранники; отсюда возникает рост вибраций и ударов». Наряду с "многогранниками", указанное явление известно также как "рифление".

Наиболее полно описываемое явление проанализировано в [2]. Автор испытывал ролики из материалов, предназначенных для пары "колесо-рельс" на машинах трения типа Амслер - МИ-1, СМЦ-2 и 2070 СМТ-1 и назвал это явление волнообразным износом. Отмечено, что причиной волнообразного износа является неравномерное вращение валов, обусловленное: «... наличием в силовом контуре резиновых соединительных муфт, а также люфтов в муфтах и зубчатых соединениях». И далее: «...крутильные колебания валов испытательной машины, которые вносили неучитываемую колебательную составляющую силы трения». К этому перечню следует также добавить недостаточный крутящий момент на валах стандартных машин трения [3] и, самое главное - непрерывный процесс торможения ролика, инициируемый измеряемой силой трения и ее последующее преодоление...

При неизбежной конической прецессии, имеющей место даже в наиболее точно изготовленных шпиндельных узлах машин трения, одним из определяющих условий, обеспечивающих корректность трибоиспытаний, является постоянство микро- и макрогеометрии одного и того же контрообразца в течение всего времени, необходимого для испытаний заданного количества образцов материалов.

В настоящей работе, опираясь на безусловный приоритет износостойкости перед антифрикционностью, машина трения 2070 СМТ-1 из трибометра - устройства для измерения силы трения, была модернизирована в износометр (wearmeter) - устройство для непрерывного измерения износа материала колодки.

Поставленная задача была решена следующим образом:

1. Контрообразец - ролик и ведомый шкив нештатной зубчато-ременной передачи закрепляются на противоположных концах одного и того же вала, имеющего высокую крутильную жесткость, при этом штатный силоизмеритель демонтируется;

2. Ведомый шкив зубчато-ременной передачи диаметром почти 500 мм. и массой свыше 17,5 кг., наряду с редукцией, достигающей 10,7 единиц, взамен штатных 2-х, выполняя также функцию маховика, обеспечивает равномерное вращение ролика. Крутящий момент при этом возрастает более чем в 5,3 раза;

3. Износометр (wearmeter) устанавливается на три опоры, предотвращающие негативное влияние на измеряемый износ избыточных связей, характерных для корпусов (станин) машин трения, традиционно устанавливаемых на четыре опоры.

Список литературы

1. Зайцев А.К. Основы учения о трении, износе и смазке машин. Часть II. Износ материалов. Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. Москва - Ленинград, 1947 - 220с.
2. Марков Д.П. Трибология и ее применение на железнодорожном транспорте/ Труды ВНИИЖТ. - М.: Интекст, 2007 -408с.
3. Алифов А.А., Фролов К.В. Взаимодействие нелинейных колебательных систем с источниками энергии. - М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. - 328с.

ПРИНЦИПЫ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С КИНЕМАТИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКОЙ

Шалюхин К.А., Глазунов В.А., Алешин А.К., Рашоян Г.В., Скворцов С.А.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия (E-mail: constmeister@gmail.com)

Кинематическая развязка придает особую специфику задачам разработки пространственных механизмов параллельной структуры. Это свойство механизма, в котором каждый привод обеспечивает только одно простое движение выходного звена (угловое или поступательное) в системе координат, связанной с неподвижным основанием.

Синтез подобных механизмов – это путь к построению таких структур с 6 степенями свободы, которые позволяют получить решение задач кинематики в явном виде, и, как следствие, значительно упростить кинематический анализ механизма и построение необходимых законов управления.

На первом этапе синтеза подобных механизмов происходит вычленение из шестистепенного манипулятора двух отдельных манипуляторов, на каждый из которых приходится по три степени подвижности, последовательно связанных между собой. На следующем этапе синтеза, основываясь на свойствах замкнутых групп винтов, присущих этим отдельным манипуляторам, формируется такая структура кинематических цепей, в которой все приводные двигатели вынесены на неподвижное основание. В первоначально синтезированных схемах приводы сферического механизма расположены на подвижной платформе, увеличивая ее массу и тем самым ухудшая динамические свойства механизма.

Теоретически доказана возможность переноса приводов на основание при сохранении свойства кинематической развязки.

ЗОНДОВАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Шалюхин К.А., Филиппов Г.С., Глазунов В.А., Ульянов Е.Е.
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

В настоящее время зондовая диагностика плазменных потоков активно применяется и развивается, поскольку зондовая теория и методика зондовых измерений применима не только в авиации, но и при исследованиях струй, истекающих из технологических плазмотронов различного назначения: для сварки, резки и сверления металлов, при плазменном напылении покрытий и выращивании монокристаллов, при воздействии импульсных разрядов на нефтеносные и газоносные пласты, в плазмохимии и других технологических процессах.

Одними из важнейших областей применения зондовой теории является моделирование потока разреженной плазмы, истекающей из электроракетного двигателя с соплами разных форм, взаимодействие потока разреженной плазмы с поперечным магнитным полем (для управления электромагнитным вектором тяги), исследование радиофизических параметров пристеночной плазмы вблизи гиперзвуковых летательных аппаратов различного класса и других задачах авиации и космоса.

Разработка и подтверждение теории неразрывно связано с экспериментальными исследованиями, созданием новых методик проведения зондовых экспериментов и обработки вольт-амперных характеристик (ВАХ). В свою очередь, снятие показаний на натурных электроракетных двигателях сопряжено с рядом трудностей: ограниченным временем проведения эксперимента, высоким требованиям к точности измеряемых данных, минимальному влиянию измерительного оборудования на плазменный поток.

Для обеспечения проведения зондовых экспериментов на высоком современном уровне, при одновременном решении обозначенных выше проблем, была разработана схема устройства параллельной структуры (рис. 1) [1]. Разработанный механизм с пятью степенями свободы и пятью двигателями имеет возможность снимать экспериментальные ВАХ с потоков разреженной плазмы, истекающих из электроракетных двигателей с соплами разных форм. Конструкция обеспечивает минимальное влияние на плазменный поток, а возможность ориентировать зонд в пространстве в контролируемом к плазменному потоку положении обеспечивает высокую точность экспериментальных исследований.

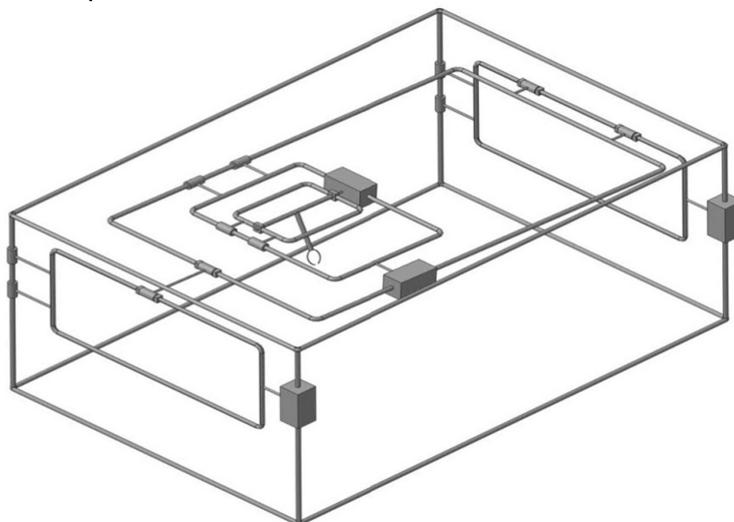


Рис. 1. Механизм параллельной структуры с пятью степенями свободы.

Список литературы

1. Филиппов Г.С., Глазунов В.А. Перспективы применения механизмов параллельной структуры в аддитивных технологиях изготовления центрального тела сопла турбореактивного двигателя, высокопрецизионных хирургических манипуляциях, зондовой диагностике плазменных потоков // Проблемы машиностроения и автоматизации, 2018. Т.3. СС.121-128.

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОЙ БАЛАНСИРОВКИ НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Шаталов Л.Н., Дронова Е.А., Ченцова Н.А., Шитова Л.И.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Одной из наиболее сложных и актуальных проблем в области балансировки является создание автобалансирующих устройств (АБУ), предназначенных для устранения дисбаланса изделия в процессе его изготовления или работы.

Создание АБУ, отвечающих современным требованиям производства, стало возможным благодаря прогрессу физики и техники в последние годы в области генерирования высоких и сверхвысоких энергий.

Впервые в мировой практике в ИМАШ РАН разработаны и проведены экспериментальные исследования АБУ на основе импульсного магнитного поля (ИМП), электрогидравлического эффекта (ЭГЭ) и пьезоэффекта [1].

Управляемая импульсная энергия используется для получения ударных импульсов в исполнительном органе (ИО) АБУ, под действием которых происходит выброс дискретных порций балансирующего вещества и их нанесение на поверхность балансируемого изделия.

На основании проведенного комплекса теоретических и экспериментальных исследований были изготовлены лабораторные образцы АБУ. Структурная схема ИО с ЭГЭ представлена на рис. 1.

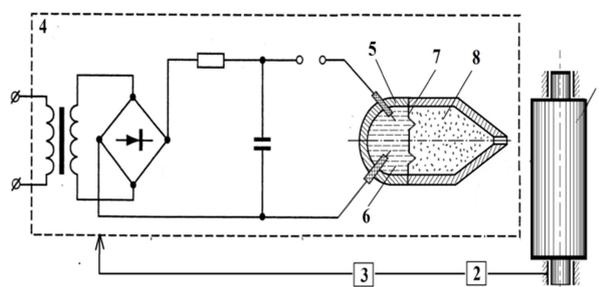


Рис. 1. Исполнительный орган АБУ с ЭГЭ

1 – балансируемый ротор; 2 – датчик вибраций; 3 – блок управления; 4 – генератор импульсных токов; 5 – корпус исполнительного органа; 6 – камера с электродами; 7 – подвижный элемент; 8 – камера с балансирующим веществом.

Теоретическое изучение взаимодействия вязкой дискретной порции в виде капли или струи с потоком газа представляет собой одну из сложных задач механики сплошных сред.

Анализ экспериментальных данных показывает:

- на образование сателлитов при выбросе дискретных порций влияют точность и чистота обработки сопла.

- динамика дискретных порций при воздействии аэродинамических сил в большей степени определяется диапазоном изменений числа Вебера $W_e = \rho v^2 d / \sigma$ и в меньшей степени зависит от изменения числа Рейнольдса $Re = vd / \nu$, где ρ – плотность вещества; v – средняя скорость выброса; d – эквивалентный диаметр сопла; ν , σ – коэффициенты кинематической вязкости и поверхностного натяжения вещества.

Увеличение вязкости балансирующих веществ повышает устойчивость выбрасываемых порций.

Использование управляемой импульсной энергии большой мощности при создании автобалансирующих устройств является весьма перспективным, так как позволяет создать устройства для балансировки широкого класса роторов с высокой точностью и производительностью, а также полностью автоматизировать весь процесс балансировки.

Высокая точность и производительность балансировки достигается за счет одновременного измерения и устранения дисбаланса, а также пропорциональности наносимых дискретных порций корректирующих масс величине дисбаланса.

Проведенные экспериментальные исследования лабораторных образцов устройств для автоматической балансировки подтвердили перспективность выбранного научного направления при создании высокоэффективной технологии, а полученные технические характеристики по точности и производительности значительно превосходят известные мировые аналоги.

Материалы работ запатентованы в 12 странах.

Список литературы

1. Шаталов Л.Н. Некоторые вопросы создания систем автоматической балансировки. Тезисы доклада на международной научно-технической конференции «Проблемы машиноведения». Москва, 2008.

РЕАЛИЗАЦИЯ ВЗРЫВОРЕАКТИВНОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ БУРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ

Шведов И.М.

Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Москва, Россия;
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия. (svirell@mail.ru)

Целью работы является обоснование способа взрывореактивного бурения природных космических тел на основе идеи регулируемого режима детонации, техническая реализация которой осуществлена в переносном взрывореактивном комплексе (ПВРК).

Перспективное направление развития добычи полезных ископаемых из природных космических объектов, а также разработка методов защиты Земли от падения астероидов с использованием взрыва заглубленного ядерного заряда, ставят актуальной задачу обоснования способов эффективного процесса бурения поверхности космических тел. Эффективность такого процесса должна удовлетворять условию минимальной энергоёмкости, особых требований к массово-габаритным характеристикам, особенно при лимитированной грузоподъемности современных ракетоносителей [1-4].

Специфические условия ведения буровых работ определяют тенденцию технологических решений на основе новых физических принципов, одним из которых может быть использование взрывореактивного эффекта при бурении. Такой эффект бурения уже заложен в переносном взрывореактивном комплексе (ПВРК), разработанном ИМАШ РАН. Комплекс предназначен для ведения буровзрывных работ в сложных горно-геологических и климатических условиях, а также для решения оперативных задач ведения буровых работ в труднодоступных местах, например, при дроблении негабаритов.

ПВРК представляет собой модульное устройство с набором кассет, содержащих заряды ВВ, использующих кумулятивный эффект и инициирующее устройство. Отличительной конструктивной особенностью взрывных кассет является наличие в их нижней части специальных полостей-отражателей, имеющих сквозные отверстия для размещения средств инициирования. Особый режим инициирования детонации и геометрические характеристики отражателей позволяют реализовать эффект динамического прижатия взрывной установки к поверхности горных пород, что делает безоткатной работу ПВРК. Режим инициирования заключается в создании опережающей фазы волны детонации на отражателе прижимного заряда внешнего контура по сравнению с забойным зарядом на внутреннем контуре отражателя кассеты. Дополнительным преимуществом является регулируемый режим инициирования, создаваемый специальным разработанным электрическим детонатором мгновенного действия, делающим процесс взрывания управляемым за счет регулируемой частоты последовательных взрывов, не превышающем времени разрушения кассеты. Масса одной кассеты в ПВРК не превышает 1,5 кг, а модульная конструкция позволяет оптимизировать количество кассет в рабочем органе для конкретных задач (например, с учетом коэффициента крепости пород, требуемой глубине бурения и т.п.).

Явные преимущества ПВРК, такие как малые массово-габаритные характеристики, высокий КПД действия (за счет минимального рассеивания энергии), безоткатная работа, независимость от источников внешнего энергоснабжения, позволяют использовать заложенные принципы взрывореактивного эффекта при бурении природных космических тел с учетом необходимой доработки модулей для особых условий космического пространства [5-8].

Список литературы

1. Соловьёв В.О. Факторы, влияющие на КПД многоимпульсных взрывных устройств с отражателями. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2002, № 3, с.50-55.
2. Кутузов Б.Н., Орлов Ю.Н., Соловьёв В.О. Создание малогабаритного взрывореактивного комплекса и области его применения. Горный журнал. 2008, № 5, с.50-53.
3. Solov'ev V.O., Shvedov I.M. Development of new mining and engineering construction works for the development of remote Northern Regions and Far East. Communications in dependability and quality management. An International Journal. 2014, Vol. 17, no.4, pp. 34-41.
4. Соловьёв В.О., Пащок В.В., Шведов И.М. Эффективность применения переносных взрывореактивных комплексов при проведении инженерно-строительных работ в сложных горно-геологических условиях Дальнего Востока. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2014, № 3, с.99-109.
5. Перминов М.Д., Соловьёв В.О., Панкова Н.В. и др. Вибрационные процессы, виброзащита в машиностроении. Отчет о НИР по теме 6-13 (промежуточный). Часть 1, 2015, 207с. Номер гос. регистрации 01201355403.
6. Соловьёв В.О., Шведов И.М., Кельнер М.С. Применение твердотопливных кассетных взрывных устройств для уничтожения крупных астероидов. ГИАБ, 2016, № 1, с. 358-371.
7. Solov'ev V.O., Shvedov I.M. Portable complex for controlled explosive reactive drilling of rocks. International Journal of Engineering and Technology. Vol.7, no.2.23 (2018), pp. 140-142.
8. Соловьёв В.О., Шведов И.М. Применения взрывореактивного комплекса для динамической защиты Земли от столкновения с астероидами. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2018, № 2, с. 107– 113.

ОПЫТ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Шитов А.М., Кондратьев И.М.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия.

В результате лабораторных и цеховых исследований большого числа станков в ИМАШ были разработаны компьютерные системы, предназначенные для диагностирования станков при изготовлении и эксплуатации.

Для повышения надежности, предотвращения износа и поломок деталей механизмов в случае перегрузки токарных многошпиндельных автоматов (ТМА) с едиными распределительными валами (РВ) разработана автоматизированная система диагностирования (АСД), основанная на измерении крутящих моментов. АСД осуществляет автоматический анализ изменения крутящего момента на РВ в функции угла поворота РВ и проводит сравнение с «эталоном» [1].

АСД является системой функционального диагностирования, которая базируется на использовании микропроцессорного модуля, оснащенного интерфейсными блоками для связи с датчиками, внешними устройствами и внешней ЭВМ. Предусмотрена возможность функционирования АСД в режимах диалога по запросу оператора и автоматическом при непрерывном наблюдении за состоянием объекта диагностирования (ОД). Программное обеспечение АСД включает системные программы и рабочие программы пользователя. В результате диагностирования сигналы (признаки) о состоянии ОД преобразуются в цифровой код, который затем используется для выбора диагноза из словаря диагностических сообщений. Словарь содержит 27 элементарных текстов диагнозов, которые позволяют оценить значительное число (более 100) состояний автомата. АСД является составной частью ТМА и связана с его механической системой, а также с системами электроавтоматики и ЧПУ. Данная разработка передана для внедрения на предприятие, изготавливающее ТМА.

В результате натурных исследований станков разного вида, в том числе токарных автоматов, шлифовальных и обрабатывающих центров разработана система сбора данных для оперативной диагностики шпиндельных узлов (ШУ) с подшипниками качения ВК-1И [2]. В составе системы используются микропроцессорный модуль, датчики вибраций, температуры, и угловой скорости. Система отслеживает состояние ШУ, развитие дефектов подшипников и обеспечивает защиту шпиндельного узла от аварийного разрушения. Разработаны оригинальные методы диагностики подшипников качения, которые используются в программном обеспечении системы. В системе реализована функция прогнозирования остаточного моторесурса: для этого используется метод экстраполяции тренда, т.е. продления в будущее тенденций, наблюдавшихся в прошлом и описанных посредством моделирующего уравнения. Система ВК-1И содержит шину USB для обмена информацией с компьютером высшего ранга. Она может применяться как встроенное в схему электроавтоматики станка средство или как внешнее средство проверки состояния ШУ, а также использоваться для оснащения испытательных стендов при контроле качества ремонта шпиндельных узлов.

Для универсальных токарных и фрезерных станков с неавтоматическим управлением разработана многофункциональная цифровая система диагностики ИМСКОД-01 построенная на базе платформы ПроЭмулятор, которая осуществляет контроль рабочих перемещений (по двум координатам), определяющих геометрию обрабатываемой детали, и параметров технического состояния станка (вибрация, температура, частота вращения ШУ) [3]. Система аппаратно-программных средств, созданная на основе современных компьютерных и оптических технологий, позволяет превратить традиционного рабочего (токаря или фрезеровщика) в квалифицированного компьютерного пользователя. Это достигается организацией отображения на экране монитора в реальном масштабе времени технического состояния станка, всех этапов изготовления детали и действий оператора-станочника. Система ИМСКОД-01 способна выполнять функции тренажера и виртуального технолога, подсказывающего оператору последовательность необходимых действий, осуществляет визуальное отображение и контроль их исполнения. Система позволяет проводить мониторинг обработки изделий и контроль загрузки производственных мощностей, определять эффективность эксплуатации оборудования и нормализовать проведение планово-профилактических мероприятий.

Список литературы

1. Шитов А. М., Щербаков В. В. // Система диагностирования токарных автоматов // Вестник машиностроения 1992. № 4. С. 15-20.
2. Кондратьев И.М., Орлов А.В., Шитов А.М. // Система сбора данных для оперативной вибродиагностики шпиндельных узлов // Проблемы машиностроения и автоматизации. № 2. С. 62-67. 2013.
3. Кондратьев И.М., Шитов А.М., Кудрашов Р.А., Янговский А.В. // Методика и аппаратно-программные средства обучения операторов станочников в области металлообработки. // Материалы VI Международной научно-практической конференции. Современные проблемы теории машин №6. С. 13-17. 2018.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАКЦИИ ЧЕЛОВЕКА ПРИ КОНТАКТНОМ ОБОГРЕВЕ

Шульженко А.А., Модестов Б.М.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

(E-mail: aa_shulzhenko.01@mail.ru);

С 1888 г. были известны два способа, позволяющие исследовать потовыделение. При использовании этих способов на поверхности кожи или измерялись межклеточные электрические потенциалы (метод Тарханова), или электрические сопротивления на поверхности кожи (метод Фере).

В 2014 году сотрудниками ИМАШ РАН была обнаружена возможность при использовании несколько иных физических принципов, а именно, за счет изменения теплового сопротивления в промежутке между тканым электронагревателем (далее «нагревателем») и телом человека, отслеживать через потовыделение реакцию человека на тепловой сигнал. При этом воздействие теплового сигнала осуществлялось путем контактного обогрева.

Температурные изменения, на поверхности нагревателя, полученные в результате экспериментов, показаны на рис. 1.

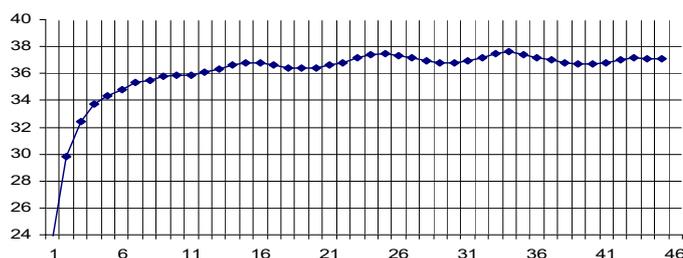


Рис. 1. График температуры нагревателя, производящего контактный обогрев человека, от времени, полученной экспериментальным путем.

В результате моделирования было выяснено, что при включении нагревателя, используемого для проведения эксперимента, температура нагревателя и температура на поверхности тела человека начинают плавно расти. При достижении уровня 32-33°C на поверхности тела человека срабатывают потовые железы. Происходит выброс пота. При этом происходит изменение теплового сопротивления в промежутке между телом человека и нагревателем. Температура на поверхности нагревателя и тела человека падает.

Как только пот выделился, сразу начинается процесс его испарения под действием температуры тела человека и нагревателя, то есть в маленьком зазоре между телом человека и нагревателем происходят процессы фазового превращения пота. Особенностью рассматриваемого фазового превращения является наличие неизвестной (свободной) границы фазового перехода. Для преодоления этого предполагалось, что в зазоре среда поддерживается изотропной, при этом постоянно меняется процентное соотношение между потом и воздухом. При испарении пота происходит изменение теплового сопротивления, то есть происходит рост воздушной (газовой) составляющей.

Следует отметить, что процесс нагрева нагревателя все время плавно продолжается, а температура у человека, при которой происходит включение потовых желез, остается той же. Поэтому следующий выброс пота будет происходить в зазор между нагревателем и телом человека, когда значение температуры на нагревателе будет более высокое по отношению к предыдущему, а пот в рассматриваемом промежутке еще полностью не испарится.

После выброса пот опять начинает испаряться и т.д. То есть процесс носит периодический характер. Проведено аналитическое описание процесса, происходящего на поверхности нагревателя (рис.2).

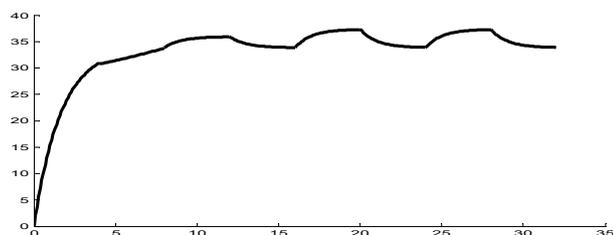


Рис. 2. График температуры нагревателя, производящего контактный обогрев человека, от времени, полученный аналитическим путем.

Даже приближенное математическое моделирование показало идентичность характера нестационарного теплового процесса, происходящего на поверхности нагревателя, с результатами, полученными в ходе проведенных экспериментов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МАГНИТНОЙ СМАЗКИ В ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧЕ

Щербаков Ю.И.

Институт Машиноведения РАН, Москва, Россия (shcherbakov_1949@mail.ru).

Анализ принципов обеспечения работоспособности тяжело нагруженных зубчатых передач с использованием твердых смазок по сравнению их с условиями работы с традиционными видами смазок показывает – причина малых ресурсов находится в методах применения твердых смазок, которым свойственно два кардинальных дефекта:

1. Отсутствие циркуляции смазки, т.е. принудительной многократной подачи частиц на поверхность трения.

2. Малые объемы смазки, размещаемые в механизме.

Одним из способов преодоления этих дефектов является использование магнитопорошкового метода смазки.

Целью данного исследования является определение потерь в зубчатой передаче с магнитной системой смазки. Для исследования использовалась цевочная передача, чтобы исключить заедания механизма при избыточной подаче смазочного материала. Исследовалась, как цевочная пара трения с передаточным соотношением $i=2$ с количеством зубьев шестерни $z_{ш}=16$, так и цевочный редуктор $i=1+z_3/z_1=1+48/16=4$. Установка, состоящая из цевочного редуктора, электромагнитного тормоза для задания нагрузки и измерительной аппаратуры, монтировалась на машины трения СМТ, МИ-1М и высокоскоростной стенд. В качестве смазочного материала использовался порошок дисульфида молибдена ДМ-1 с максимальной фракцией 4мкм и смесь в соотношении 1 к 3 порошков никеля электролитического ПНЭ-1 с фракциями 70% 1-4 мкм, 30% 7-12мкм и дисульфида молибдена.

Испытания цевочной пары показали, что введение в смазку порошка никеля до определенного предела не оказывает влияния на к.п.д. передачи.

При проведении испытаний цевочного редуктора фиксируются показания амперметра, из них вычитаются потери в подшипниках, и по полученной разнице по тарировочной кривой вычисляется входной момент M_1 .

Работоспособность цевочного зацепления рассматривается по к.п.д.

$\eta = M_n / iM_1$, где M_n - тормозной момент, нм.

Результаты испытаний представлены в таблице.

M_n , нм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
η	0,75	0,8	0,83	0,86	0,88	0,89	0,9	0,915	0,92	0,92

Таблица. Влияние нагрузки на к.п.д. цевочной передачи.

Как показывают результаты испытаний, при применении дисульфида молибдена в качестве смазочного материала, к.п.д. передачи и коэффициента трения зависят от нагрузки.

МЕТОДИКА АКТИВНОГО ГАШЕНИЯ И ВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ В МАШИНАХ И МЕХАНИЗМАХ

Эрлих Б.М.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия; (boriserlich@gmail.com).

В докладе излагаются основные положения методики гашения и возбуждения фрикционных колебаний с применением силового и параметрического воздействий. Работоспособность методики проверена на примерах построения конкретных структур таких воздействий. Полученные результаты можно использовать в станкостроении, разных областях машиностроения и техники при проведении расчетов и проектировании автоколебательных систем.

Автоколебательная система характеризуется следующими параметрами и функциями:

- частота колебаний ω_0 ;
- $f(x, \dot{x})$ функция линейной и нелинейных составляющих упругой и диссипативной сил.

В качестве функции $f(x, \dot{x})$ мы используем следующее выражение, которое для широких классов нелинейностей зависит только от скорости: $f(\dot{x}) = k_1 \dot{x} \text{abs}(\dot{x}) - k_2 \text{sign}(\dot{x}) + 2k_3 \dot{x} + k_4 \dot{x}^3$. Эта функция аппроксимирует довольно широкий спектр вариантов функции $f(x, \dot{x})$, что позволяет в реальных задачах определять параметры k_1, k_2, k_3, k_4 .

Кроме того в методике можно использовать действия внешних гармонических возмущающих сил с параметром B и периодических параметрических возмущений с параметром h .

Структуры законов силового $u(x, \dot{x})$ и параметрического $v(x, \dot{x})$ воздействий определены с применением методов линеаризации и теории оптимального управления. В этих законах собственная частота колебаний ω_0 и частота ω параметрического или силового воздействия может не совпадать.

Законы силового и параметрического воздействий, обеспечивающие возбуждение и гашение колебаний:

$$u(x, \dot{x}) = (\omega_0^2 - \omega^2)x + (f_2(A) - fhB) \dot{x}/\omega$$

$$v(x, \dot{x}) = 2/(\omega_0^2 A^2)[(\omega_0^2 - \omega^2)(\dot{x}^2/\omega^2 - x^2) - 2(f_2(A) - fhB)x\dot{x}/\omega] ,$$

где $f_2(A)$ - коэффициент гармонической линеаризации функции $f(\dot{x})$ с дополнительным параметром A , fhB коэффициент гармонической линеаризации внешних возмущений.

В этих формулах: $f_2(A) = 8k_1\omega^2 \frac{A}{3\pi} - \frac{4k_2}{\pi A} + 2k_3\omega + \frac{3k_4\omega^3 A^2}{4}$ $fhB = \omega_0^2 h/2 + B/A$.

Таким образом, в настоящей работе для гашения или возбуждения автоколебаний рассматриваются системы, описываемые дифференциальными уравнениями:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 (1 + h\cos(2\omega_0 t))x + k_1 \dot{x} \text{abs}(\dot{x}) - k_2 \text{sign}(\dot{x}) + 2k_3 \dot{x} + k_4 \dot{x}^3 = B\sin(\omega_0 t) + u(x, \dot{x})$$

$$\ddot{x} + \omega_0^2 (1 + h\cos(2\omega_0 t) + v(x, \dot{x}))x + k_1 \dot{x} \text{abs}(\dot{x}) - k_2 \text{sign}(\dot{x}) + 2k_3 \dot{x} + k_4 \dot{x}^3 = B\sin(\omega_0 t)$$

Условия $\omega_0 = \omega$, $f_2(A) - fhB = 0$ позволяют определить параметр A^* , при котором отсутствует параметрическое и силовое воздействие. С определения параметра A^* нужно начинать поиск оптимального дополнительного параметра A для гашения или возбуждения колебаний. Выбор дополнительного значения параметра $A > A^*$ обеспечивает увеличение амплитуды колебаний (т.е. возбуждение), выбор дополнительного значения параметра $A < A^*$ обеспечивает уменьшение амплитуды колебаний (т.е. гашение).

Оптимальное значение параметра A необходимо выбирать как минимум с учетом двух критериев: амплитуды колебаний и интегральной интенсивности воздействия. Для расчета величины интегральной интенсивности воздействий за время T используются формулы: $Iu = \int_0^T (u(x, \dot{x}))^2 dt$ $Iv = \int_0^T (\omega_0^2 v(x, \dot{x}))^2 dt$

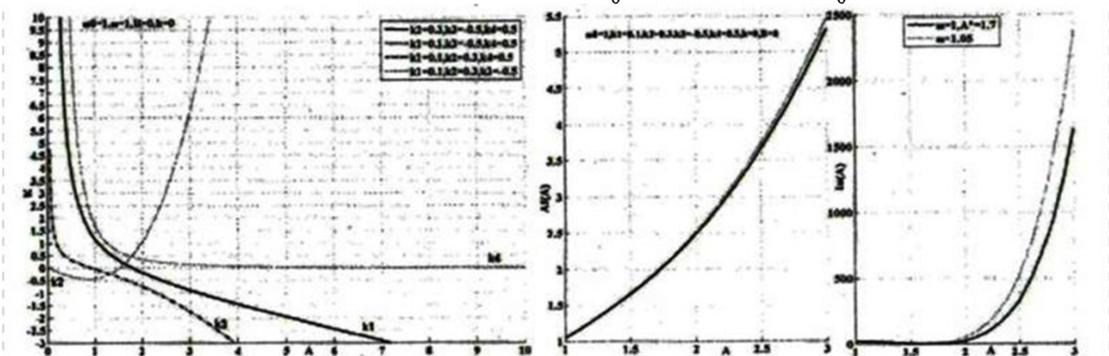


Рис. 1. Расчет параметра A^* , при котором отсутствует воздействие, и расчет влияния силового воздействия на его амплитуду и интенсивность.

УСПЕХИ МЕХАНОПУЛЬСОГРАФИИ

Явелов И.С., Жолобов А.В., Рочагов А.В., Федянин В.И., Мартынов С.Г.
Институт машиноведения РАН, Москва, Россия, (yishome@mail.ru).

Сердечно-сосудистая система человека есть сложнейшая многофункциональная сетевая система тепломас-сообмена. Ее особенностью является импульсный характер кровотока, обусловленный сокращениями сердца. Это определяет движение волн давления, называемых пульсовыми волнами (ПВ), которые могут быть найдены путем пальпации крупных артерий. Искусство определения пульса являлось основой восточной медицины и в настоящее время в значительной мере утрачено. Следует подчеркнуть, что будучи доступным биосигналом, ПВ крупных артерий могут стать не менее полезными в медицине, чем сигнал ЭКГ. С точки зрения метрологии проблемы при снятии показаний возникают из-за малого размера артерии и трудности попадания датчика на ее вершину. На сегодняшний день визуальное наблюдение сигнала пульсовой волны доступно немногим исследователям, а тонометр без манжеты пока остается недостижимой мечтой. Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской Академии наук (ИМАШ РАН) сделал определенные шаги в решении этой задачи [1-5].

На рисунке 1 показаны миниатюрные волоконно-оптические датчики пульсовой волны для мобильного медицинского устройства в виде наручных часов, разработанные в ИМАШ РАН. Такие датчики впервые были представлены в 1989 году, чему предшествовала многолетняя научно-исследовательская работа. Они решили проблему неискаженного измерения пульсовой волны и явились основой сфимографии высокого разрешения [4].



Рис. 1. Волоконно-оптические датчики пульсовой волны.

Длительное изучение ПВ с 1990 года позволило накопить значительную базу данных и создать таблицу трафаретов, представленных на рисунке 2. Таблица является авторским продуктом и может послужить для разработки в будущем диагностической системы, использующей анализ ПВ с распознаванием образа.

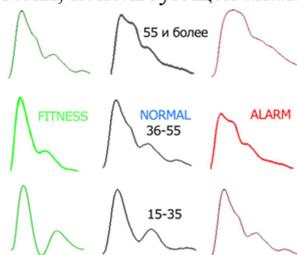


Рис. 2. Трафареты изменений формы ПВ в зависимости от возраста и состояния человека.

По вертикали расположены типовые ПВ, соответствующие возрастным группам от 15 до 55 лет и более. По горизонтали расположены ПВ одной возрастной группы в зависимости от изменения физиологического состояния (слева – направо) от благоприятного до опасного (повышены давление и периферическое сопротивление сосудов). Из рисунка 2 видно, что типовые изменения пульсовой волны заключаются в следующем: 1 – форма вершины из острой превращается в круглую; 2 – заглаживается задний скат и депрессируются дополнительные отклики. Подобные изменения есть результат утраты с возрастом эластичности сосудов и ослабления насосной функции сердца.

Перспективы развития данного направления состоят в следующем: развитие аппаратного, программного и функционального направлений. Первое направление касается создания более универсальных и миниатюрных многоточечных датчиков. Второе заключается в совершенствовании алгоритмов определения артериального давления безманжетным способом с точки зрения повышения точности расчетов и учета индивидуальных особенностей пациента. Третье направление связано с изучением природы меридиональной диагностики и терапии, биометрией и неинвазивным измерением уровня сахара в крови.

Список литературы

1. Явелов И.С., Гончаренко А.И., Израйлович М.Я., Катанов Д.Ш. Моделирование эффекта локального усиления кровотока // Медицинская техника. 2014. №1. С. 45-47.
2. Явелов И.С. Тайна пульсовой волны.-М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012.-256 с.
3. Явелов И.С., Израйлович М.Я., Эрлих Б.М., Рочагов А.В. Моделирование эффекта массажного воздействия на увеличение локального кровотока // Биомедицинская радиоэлектроника. 2017. № 3. С. 43-47.
4. Явелов И.С., Рогоза А.Н., Малыгин А.В., Рочагов А.В., Федянин В.И. Точность измерения аортального систолического давления с помощью волоконно-оптического сфимографа высокого разрешения // Биомедицинская радиоэлектроника. 2016. № 1. С. 70-75.
5. Yavelov IS, Stepanyan IV, Rochagov AV, Fedyanin VI, Zholobov AV (2017) Perspective Questions of Mechanopulsography. J Biomed Eng Med Devic 2: 125 DOI: 10.4172/2475-7586.1000125