

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук  
Научный центр нелинейной волновой  
механики и технологии РАН

**Международная конференция**  
**«МАШИНЫ, ТЕХНОЛОГИИ И**  
**МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СОВРЕМЕННОГО**  
**МАШИНОСТРОЕНИЯ»,**  
*посвященная 75-летию*  
*Института машиноведения*  
*им. А.А. Благонравова РАН*

21-22 ноября 2013 года

**Т Р У Д Ы К О Н Ф Е Р Е Н Ц И И**

**МОСКВА**

**2013**

## **Программный комитет:**

Академик Ганиев Р.Ф. (Председатель)  
Академик Козлов В.В.  
Академик Лагарьков А.Н.  
Академик Климов Д.М.  
Академик Каторгин Б.И.  
Академик АН Литвы Рагульскис К.М.  
Академик НАН Украины Мацевитый Ю.М.  
Академик НАН Белоруссии Мышкин Н.К.  
Член-корр. РАН Махутов Н.А.  
Член-корр. РАН Чернышев С.Л.  
Член-корр. РАН Ильгамов М.А.  
д.т.н. Романов А.Н.  
д.т.н. Рототаев Д.А.

## **Организационный комитет:**

Романов А.Н. (Председатель)  
Петюков Э.Н. (Зам. председателя)  
Косарев О.И. (Зам. председателя)  
Киреев И.Д. (Зам. председателя)  
Сухоруков Р.Ю. (Зам. председателя)  
Бозров В.М. (Ученый секретарь)  
Мугин О.О. (Зам. ученого секретаря)  
Ковалева Н.Л. (Зам. ученого секретаря)  
Асташев В.К.  
Бобровницкий Ю.И.  
Гранова Г.Н.  
Дроздов Ю.Н.  
Матвиенко Ю.Г.  
Москвитин Г.В.  
Разумовский И.А.  
Саберов Х.Ф.  
Украинский Л.Е.

## **Организаторы конференции**

Российская академия наук, Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН. РФФИ.

## Оглавление

М.И. Алеутдинова, В.В. Фадин, В.Е. Рубцов влияние содержания меди на формирование параметров зоны контакта металлических композитов при нагружении трением и электрическим током.....	10
А. К. Алешин, Н. Л. Ковалева, С. Д. Костерева Метод экспериментального определения масс и координат центра масс деталей машин и конструкций. ....	11
Р.С.Ахметханов Применение теории фракталов при анализе экспериментальных данных и диагностике технических систем .....	12
Б.М.Базров, А.М.Арзыбаев Элементная база средств технологического оснащения. ....	13
Л.Я.Банах, А.Н.Никифоров Исследование динамики и снижение уровня вибраций роторных систем за счет гидродинамического взаимодействия их элементов.....	14
Л.Я. Банах Математическое моделирование и способы редукции моделей составных механических систем. ....	15
О.М. Беломытцев О влиянии конструктивно-технологического исполнения опоры в гтд на долговечность цилиндрических роликоподшипников.....	16
Блохин М. А., Гаврюшин С. С., Прокопов В. С. Многопильная «коленчатая» пила - новые тенденции в деревообрабатывающем станкостроении.....	17
В.М.Бозров ,О.В.Гуз Оценка пропускных способностей соединительных каналов и потерь сжатого воздуха в объемных пневмомоторах на основе метода векторной идентификации.....	18
В.М.Бозров ,В.И.Ивлев , И.Л.Кривц Разработка методов повышения энергоэффективности для пневматических транспортных средств и других мобильных приложений. ....	19
Е.А. Брызгалов, С.С. Панин, В.С. Николаенко, В.А. Шувалов,Н.И. Яковенко, Д.В. Курменёв Динамика волнового резонансного смесителя для производства сыпучих материалов .....	20
Брысин А. Н., Синев А. В. Система «Гидропреобразователь – Джойстик Z3 – Оператор».....	21
И.А. Буяновский, В.Л. Левченко, А.Н. Большаков, Р.А. Бортко, М.Н. Зеленская, В.Н. Матвеевко, А.Г. Сипатров Граничная смазка стальных тел с твёрдыми углеродными покрытиями.....	22
А.Н. Варнавский Динамическая коррекция параметров движения транспортного средства при снижении надежности работы водителя.....	23
В.Г. Вереземский, О.А. Троицкий Вероятностный подход к обоснованию инициирования и развития трещин при нескольких циклических нагрузках, включая действие импульсов тока. ...	24
Н.М. Власов Внутренние напряжения и водородная проницаемость цилиндрических оболочек .....	25
И.И. Вульфсон Трансформация энергии и устранение пространственной локализации колебаний в исполнительных органах цикловых машин .....	26
Р.Ф. Ганиев, Н.А. Шамов. Исследования процесса коагуляции проницаемой породы в условиях волновых явлений в многофазных средах.....	27
О.Р. Ганиев, Л.Е. Украинский, И.Г. Устенко. Повышение нефтеотдачи продуктивных пластов с помощью ударных волн. ....	28

М.Е.Герц, М.М.Герц Влияние привода на эффект вибрационного поддержания вращения. ....	29
В.А. Глазунов Возможные применения механизмов параллельной структуры.....	30
Ю. П. Глухов, В.П. Ляшенко Математическое моделирование волновых процессов в конструктивных элементах машин .....	31
В.В.Гриб. Вибродиагностические модели износа узлов трения .....	32
С.Н. Григорьев, Ф.З. Утяшев, Р.Ю. Сухоруков, А.Р. Ибрагимов, Р.Р. Мулюков, Н.Ф. Кощавцев. Принципы создания современного оборудования для раскатки высокоточных колец и обечаек больших диаметров из жаропрочных сплавов.....	33
С.Н. Григорьев, Ф.З. Утяшев, А.А. Назаров, В.В. Морозов, Р.Р. Мулюков, Н.Ф. Кощавцев, Р.Ю. Сухоруков. Развитие дискораскатных станков для изготовления высокоточных заготовок из современных жаропрочных сплавов.....	34
Ю.И. Густов, И.В. Воронина Исследование трибомеханических показателей рабочих органов и сопряжений строительной техники.....	35
С.М. Демидов, В.А. Глазунов Кинематический анализ механизмов параллельной структуры ...	36
А.А. Джомартов, Г. Уалиев Моделирование динамики батанного механизма ткацкого станка стб-180пн на simulationx .....	37
Ю.Н. Дроздов, П.И. Маленко Оценка структурно-фазовых превращений в поверхностных слоях никотрированных теплостойких сталей в условиях трения скольжения со смазочным материалом.....	38
А.П. Евдокимов Несущая способность резинокордных оболочек на повышенных частотах вращения.....	39
А.Ю. Евдокимов Экологические проблемы трибологии.....	40
Е.В. Зеньков Расчетно-экспериментальное моделирование циклической прочности железнодорожных колес в условиях сложного напряженного состояния .....	41
С.Д. Иванов Инновационные оптические методы исследования остаточных напряжений в машиностроительных конструкциях .....	42
З.В.Игнатьева, М.М. Хрущов 1) В.А.Левченко, В.Н.Матвеев Морфология поверхностного разрушения углеродных покрытий при трении .....	43
Камалов Ф.Я., Жильников Е.П. Расчет подшипников авиаагрегатов при переменных условиях нагружения .....	44
А.В. Козырев, В.А. Глазунов Анализ жесткости манипулятора параллельной структуры с помощью метода конечных элементов .....	46
А.В. Кондрашина Особенности механизма разрушения стали Р6М5.....	47
В.И. Кормилицын, О.В. Шмырков, Н.Б. Юшков Исследования кавитационных явлений в плоском волновом генераторе проточного типа .....	48
В.М. Королев Особенности износа каналов стволов стрелкового оружия при стрельбе одиночными выстрелами.....	49
Краснов А.П., Буяев Д.И., Юдин А.С., Афоничева О.В. Формирование поверхности трения в современных армированных полимерных материалах.....	50

В.Л. Крупенин Модели вибропередачи и фильтрации сильно нелинейных волновых процессов .....	51
В.Л. Крупенин ИМАШ РАН и становление теории виброударных систем .....	52
Л.А. Куркина О влиянии времени диффузионного насыщения при борировании на изменение размеров образцов углеродистых сталей.....	53
Л.Н. Лесневский, С.В. Иванова, М.А. Ляховецкий Повышение фреттингостойкости алюминиевых и циркониевых сплавов фрмированием защитных покрытий методом микродугового оксидирования.....	54
С.Б Макаров, Н.В Панкова, М.Д Перминов Создание многочастотных гасителей колебаний на комплексе «ABAQUS».....	55
С.И. Малафеев, А.А. Малафеева, В.И. Коняшин Экспериментальное исследование сил трения при прокатке металлов.....	56
С.И. Малафеев, А.И. Копейкин, Ю.В. Тихонов Компьютерная система для экспериментальных исследований электромеханических колебательных систем .....	57
М.И. Маленков О некоторых трибологических проблемах при создании системы крепления и развертывания бортового манипулятора ОК «БУРАН» .....	58
Е.А.Марченко, Т.А.Лобова, И.А.Буяновский, И.П.Чулков Перспективы использования диселенидов вольфрама и молибдена для создания новых композиций на основе жидких и пластичных смазочных материалов .....	59
Ю.Г. Матвиенко Модели и критерии механики разрушения в современных проблемах прочности .....	60
В.М. Матюнин, А.Ю. Марченков Механические свойства металла в структурных зонах концентрации напряжений элементов конструкций и машин .....	61
Н.А. Махутов, В.В. Баранов Управление безопасностью и эффективностью деградирующих систем .....	62
Н. А. Махутов, И. В. Макаренко, Л. В. Макаренко. Распределение и перераспределение напряжений и деформаций в зонах полуэллиптических наклонных трещин циклического нагружения. ....	63
А.Н. Мельситов, В. А., Петушков Эрозионноеповреждениеконструкцииивпотокекавитирующейжидкости.....	64
А.А. Мерзляков, Н.А. Серков Выбор базовых метрологических показателей контроля и диагностирования механизмов и машин.....	65
Ю.Ф. Мигаль Моделирование трибологических процессов на атомном уровне .....	66
Л.И. Миронова Экстремальная температурная задача предельного термоупругого состояния конструкции при локальном тепловом нагружении.....	67
У.В. Михайлова, С.А. Кургузов Эффективность применения штампов с эластичными элементами при изготовлении метизов .....	68
В.В. Морозов, С.В. Морозов. Методы расчета сил деформирования при раскатке дисков из жаропрочных сплавов на автоматической линии АЛРД-800 .....	69

Г.В. Москвитин. Методы повышения прочности и ресурса деталей современных машин и элементов конструкций .....	70
Е.А. Мотова, Н.Е. Никитина Экспериментальное исследование акустическим методом процесса усталости конструкционных материалов .....	71
О.О. Мугин Испытания системы виброизоляции механизмов на основе виброизоляторов с внутренними инерционными трансформаторами .....	72
О.О. Мугин К вопросу снижения структурной вибрации и шума, передаваемой поездами метрополитена в окружающую среду .....	73
Ф.Г. Нахатакян, О.И. Косарев Аналитическое определение контактной податливости роликовых подшипников .....	74
Н.Е. Никитина, С.В. Казачек Комплекс национальных стандартов по применению метода акустоупругости в промышленности и на транспорте .....	75
В.С. Николаенко, Г.С. Филиппов, Б.Ю. Яценко Использование нелинейных волновых процессов в диспергирующих устройствах при создании аэрозольных экранов.....	76
Н.Ю. Носова В.А. Глазунов Пространственный манипулятор параллельной структуры с пятью степенями свободы .....	77
Б.И. Павлов Динамика кулачковых предохранительных муфт. ....	78
В.П. Павлов, А.Ю. Ахпашев Структурно-параметрический синтез рабочего оборудования одноковшового экскаватора .....	79
С.С. Панин, В.С. Николаенко, Е.А. Брызгалов, Н.И. Яковенко, Д.В. Курменёв Волновые смесители высоковязких жидких сред.....	80
М.Я. Пановко Влияние динамического нагружения на параметры точечного упругогидродинамического контакта.....	82
С. Д. Пичугин Послойные рентгенофотоэлектронные исследования медьсодержащей пленки в динамике пути трения сопряжения.....	83
П.А. Побегайло Манипулятивность и некоторые другие геометрические свойства рабочего оборудования одноковшовых гидравлических экскаваторов .....	84
О.Н. Поболь, Г.И. Фирсов Коэффициент потерь элементов конструкции как интегральная характеристика динамической модели машины .....	85
И.А.Разумовский Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твёрдого тела: история, проблемы и перспективы развития.....	86
Ю.П. Ракунов Управление показателями износостойкости деталей машин на основе синергетического подхода к финишной отделочной обработке.....	87
Д.О.Резников Нормативный, вероятностный и основанный на управлении риском подходы к обеспечению защищенности сложных технических систем .....	88
M.G. Rosenblum Phase synchronization of chaotic systems; from theory to experimental applications .....	89
О.А. Ряховский, А.С. Марохин Метод получения геометрических параметров планетарного ролико-винтового механизма .....	90

Б.Л.Саламандра, Л.И.Тывес, К.Б.Саламандра, Г.К.Корендясев, Ф.И.Батырь, Г.Н.Орлова Разработка современных машин-автоматов: задачи и решения .....	91
К.Б. Саламандра Особенности многоскоростных двух- и трехпоточных коробок передач транспортных средств .....	92
А.В. Сахаров. Методика определения технологических возможностей металлорежущих станков .....	93
Н.А. Серков, И.С. Шлесберг, А. А. Мерзляков, И.В. Никуличев. Комплексная оценка жесткости многокоординатных машин с ЧПУ .....	94
Н.А. Серков. Повышение геометрической точности многокоординатных машин с ЧПУ методами цифровой коррекции .....	95
Б.М. Силаев, Е.Н. Мальцев. Моделирование процессов разрушения пленки загрязнений при разработке системы очистки проточной части ГТД в условиях эксплуатации.....	96
Скворцов С.А., Глазунов В.А., Костерева С.Д. Механизм тренажера для подготовки водителей автотранспортных средств и пилотов воздушных судов .....	97
И.Г. Соловьёв, В.А. Петушков, В.И. Луцик, Ю.В. Чурсанов, В.Ф Соколов. Новые процессы и оборудование переработки углеродосодержащих отходов .....	98
Л.А. Сосновский, П.А. Витязь, В.А. Гапанович, В.В. Комиссаров, Н.А. Махутов, Н.В. Псырков. ....	99
Сталь и чугун: конкуренция продолжается в области высокопрочных состояний .....	99
Л.А. Сосновский, С.С. Щербаков. Механотермодинамические системы и их состояния .....	100
Л.А. Сосновский, С.С. Щербаков. Трибофатические системы: обобщенный закон трения.....	101
Статников И.Н. ПЛП-ПОИСК – эвристический метод рационального проектирования машин и механизмов.....	102
В.В. Столяров. Нано структурирование материалов методами экстремальных внешних воздействий .....	103
А.Г. Суслов. Научноёмкие функционально-ориентированные технологии окончательной обработки рабочих поверхностей деталей машин .....	104
С.Ю. Тарасов, В.Е. Рубцов, А.В. Колубаев, В.В. Горбатенко. Анализ макроскопических полей деформаций в условиях трения скольжения.....	105
В.С. Терещук, А.А. Ковалев. Электролизер на морской воде для двигателей широкого применения .....	106
В.А. Тихонов, А.Г. Чистяков. Разработка систем виброизоляции патрубков высокого давления и транспортных средств .....	107
И.А. Тодер, А.Е. Миронов. Влияние вторичных структур, образующихся на поверхностях трения многокомпонентных трибосистем на их триботехнические характеристики .....	108
Ю. Торбек, Д.Л. Раков. Структурный синтез перспективных транспортных технических систем .....	109
О.А. Троицкий, В.И. Сташенко. Преимущества импульсного тока перед другими видами при осуществлении электропластической деформации металлов .....	110
Уалиев Г., Уалиев З.Г. Обратные задачи динамики механизмов независимого движения. ....	111

Ф.З. Утяшев, А.Р. Ибрагимов, А.А. Назаров. Математическое моделирование технологического процесса раскатки дисков для газотурбинных двигателей нового поколения. ....	112
В.В. Фадин, М.И. Алеутдинова, В.Е. Рубцов. Изменение фазового состава поверхности трения металлических графитсодержащих композитов при скольжении с токосъёмом.....	113
М.С. Фельдман. Применение преобразования гильберта в анализе вибрации .....	114
Л.А. Хаджиева, А.Б. Умбеткулова, А.С. Сергалиев. Анализ динамики буровых штанг при больших деформациях .....	115
И.Ю. Цуканов. Конструкторско-технологическое обеспечение долговечности современных винтовых передач скольжения .....	116
О.И. Челябинна. Моделирование термонапряжений на основе аналогового и фотоупругого методов .....	117
О.И. Челябинна. Моделирование термонапряжений на основе аналогового и фотоупругого методов .....	118
А.С.Чернятин. Применение современных компьютерных технологий для оценки нагруженности, дефектности и трещиностойкости элементов натуральных конструкций на основе обработки экспериментальных данных.....	119
И. Б. Чудаков, Н. М. Александрова, С. Ю. Макушев. Специальные свойства новых конструкционных высоко демпфирующих сталей массового применения. ....	120
А.В. Чумаевский, С.Ю. Тарасов), Д.В. Лычагин, Е.А Колубаев, С.А. Беляев. Локализация сдвига в монокристаллах меди при испытаниях на сжатие и трение. ....	121
А.В. Чумаевский, С.Ю. Тарасов), Д.В. Лычагин, Е.А Колубаев, С.А. Беляев.Макрофрагментация деформационного рельефа монокристаллов при трении по схеме «ДИСК-ПАЛЕЦ» и одноосном сжатии.....	122
О.В. Шмырков, Н.В. Гун. Исследование процесса кавитации в проточном генераторе вихревого типа. ....	123
А.А.Шульженко, М.Б.Модестов, Б.М.Модестов. Некоторые особенности теплового взаимодействия тканых нагревателей и человека при контактом обогреве. ....	124
Л.Ш. Шустер. Пути решения проблем высокотемпературной трибологии .....	125
Н.И. Яковенко, С.С. Панин, Е.А. Брызгалов, Д.В. Курменев. Применение акустических генераторов для интенсификации процессов измельчения в струйно-вихревых мельницах. ....	126
З.В. Игнатьева, М.М. Хрущов, В.А. Левченко, В.Н. Матвеевко. Морфология поверхностного разрушения углеродных покрытий при трении .....	128
А.Б. Кыдырбекулы, Л.А. Хаджиева. Колебания сжато-скрученной буровой штанги с учетом начальной кривизны. ....	129
Н.А. Махутов, В.В. Зацаринный. Анализ взаимосвязей вероятностей разрушения и запасов...130	
П.С. Ланда. Некоторые нерешаемые задачи и методы их решения. Срыв вихрей при плохом обтекании и печальные последствия такого срыва .....	131
С.Д. Иванов. Инновационные оптические методы исследования остаточных напряжений в машиностроительных конструкциях. ....	132
А.В. Кондрашина. Особенности механизма разрушения стали марки Р6М5 .....	133



Л.И. Миронова. Экстремальная температурная задача предельного термоупругого состояния конструкции при локальном тепловом нагружении.....	134
L. Papic, M. Pantelic, I. Z. Aronov. Maintainability-related safety analysis for mining equipment. ....	135
Т.М.Томилина, Б.Н.Бахтин, А.С.Гребенников, М.М.Лактионова, С.Н.Пономарева. Теоретическое и экспериментальное исследование динамических свойств конструкций при создании современных научных космических приборов .....	136
Ю.И. Бобровницкий. Проблема акустического «STEALTH»: Состояние, Перспективы .....	137
А.К. Скворчевский, Е.И. Воробьев, К.А. Скворчевский, А.М. Сергеев. Стратегия развития технических средств реабилитации (тср) людей с ограниченными физическими возможностями за счет комплексного использования биопротезов и биороботов нового поколения.....	138
Е.И.Воробьев, А.К. Скворчевский, А.М. Сергеев, Н.С. Ковалев, А.А. Акентьев. Исследования алгоритмов управления антропоморфными биопротезами, разработанными на искусственных мышцах.....	139
К.А. Скворчевский, Е.И.Воробьев, А.К.Скворчевский, А.М. Сергеев, Т.В.Силова. Исследование биологической светочувствительности активных точек тела человека для определения возможности управления биопротезами и биороботами. ....	140
С.В.Петухов, К.А.Скворчевский, А.А.Акентьев. Исследование конструктивных вариантов функциональных аналогов вестибулярного аппарата человека для использования их в киберпротезах и киберроботах нового поколения.....	141
Артамонов В.Ю., Шамонов Н.А., Султанов Д.Р. Использование волновых процессов в обработке многофазных растворов. ....	142
С.Р. Ганиев, Ю.С. Кузнецов, Н.А. Шамонов. Перспективы разработки и применения волнового оборудования для очистки скважин от проблемных отложений.....	143
Д.Л. Ревизников, Л.Е. Украинский, И.Г. Устенко. Аппаратура и методика для функциональной диагностики артериальной системы методами волновой механики. ....	144
С.В.Петухов, В.И.Свирин, И.В.Степанян, Л.В.Хазина. Биомеханика движений и генетические модели наследуемых волновых и циклических процессов .....	145
С.В.Петухов, В.И.Свирин, И.В.Степанян, Л.В.Хазина. Биологические спирали и проекционные операторы генетической биомеханики.....	146
И.С. Явелов, А.В. Рочагов. Развитие программно-аппаратных средств для исследования кардиомеханосигналов человека .....	147
Х.М.Алиев, Е. С. Корпачева, А.С.Кахидзе Биомеханический способ снятия стресса и оздоровления человека.....	148
Ю.В. Богданова, А.М. Гуськов. Численное моделирование задачи позиционирования инструмента хирургического робота-манипулятора при движении по заданной траектории ...	149
С.И. Тулупов. Интерактивное дистанционное управление шагающими машинами на основе аналогии с человеческим телом .....	150
С.И. Тулупов Разработка экзоскелета нижних конечностей человека .....	151
С. Ю. Мисюрин, Г. В. Крейнин. Проблемы динамики и управления приводных систем с двигателями различных типов. ....	152

А.А. Назаров, А.А. Самигуллина, Р.Р. Мулюков, Ю.В. Царенко, В.В. Рубаник. Влияние ультразвуковой обработки на микроструктуру и механические свойства наноструктурных металлов, полученных деформационными методами. ....	153
А.С.Корнеев. Математическое моделирование гидродинамических генераторов колебаний. .	154
Б.В.Лушников, А.В.Мальчиков, Е.С.Тарасова, С.Ф. Яцун. Моделирование движения трехзвенного плавающего рыбоподобного робота.....	155
Наумов Г.С., Яцун С.Ф.(Курск, ЮЗГУ). Динамические особенности поведения ползающего змееподобного робота. ....	156
М.С. Понедельченко, С.Ф. Яцун. Реабилитационное устройство опорно-двигательных конечностей человека.....	157

# ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ МЕДИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ КОНТАКТА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ТРЕНИЕМ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

М.И. Алеутдинова<sup>1,2</sup>, В.В. Фадин<sup>1</sup>, В.Е. Рубцов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, Томск,

<sup>2</sup>Северский технологический институт НИЯУ МИФИ, Россия, г. Северск

Микрогеометрия поверхности контакта влияет на его характеристики, в первую очередь, на износостойкость. Поверхность трения материала при скользящем токосъёме имеет морфологические особенности, также влияющие на электропроводность и износостойкость контакта. Целью настоящей работы является изучение взаимосвязи морфологического вида поверхности трения и износостойкости и электропроводности контакта.

Спечённые материалы имели составы: **1.** 80%Cu+Гр+10%ШХ15, **2.** 50%Cu+Гр+40%ШХ15, **3.** Cu+20%ШХ15, где Гр – графит, ШХ15 – сталь ШХ15, переработанная из шлифовального шлама. Образцы спекали в вакууме при температуре 1100°C в течение 2 часов. В эксперименте применялись также литые материалы - **4.** медь М1, **5.** сталь ШХ15. Триботехнические испытания проведены в условиях скользящего токосъёма без смазки при давлении 0,13 МПа, скорости скольжения 5 м/с на машине трения СМТ-1. Нагружение осуществлено по схеме “вал-колодка”. Контртелом служила сталь 45 (50 HRC). Путь трения составлял 9 км.

Спечённые материалы 1 и 3 имели пористость менее 10%. Графитсодержащий материал 1, в отличие от материала 3, не формирует вторичные структуры, его трение характеризуется высокой адгезией к контртелу. Это обуславливает более низкие характеристики контакта. Материал 2, формирующий слой вторичных структур толщиной около 30 мкм, но имеющий высокую пористость (25%), имеет характер трения и характеристики контакта, аналогичные материалу 1. Удельное электросопротивление материалов 1, 2 и 3 имеет значения в пределах 0,15 мОм м. Высокие показатели контакта материала 3 обусловлены отсутствием графита в первичной структуре. Характеристики контакта материалов 4 и 5 близки к характеристикам контакта материала 3. Эти характеристики реализуются за счёт формирования поверхности контакта, имеющей после трения вид застывшей жидкости. Также поверхность трения содержит большое количество оксида FeO, который формирует покрытие типа шаржа, увеличивает сдвиговую устойчивость поверхностного слоя и снижает адгезию к контртелу. FeO имеет достаточно низкое удельное электросопротивление (около  $10^{-3}$  Ом·м [1]), поэтому электропроводность контакта значительно не уменьшается. Морфологический вид поверхности трения типа застывшей жидкости указывает на деформацию поверхностного слоя по механизму, аналогичному деформации вязкой жидкости. В общем случае, образование вязкой жидкости в поверхностном слое должно приводить к его сдвиговой неустойчивости и, следовательно, к низкой износостойкости. Однако высокая реальная износостойкость этого слоя поверхности указывает на его вязкоупругую деформацию. При этом ненулевой износ позволяет утверждать, что присутствует также вязкопластическая деформация.

*Работа выполнена по проекту III.23.2.4 программы III.23.2 фундаментальных исследований СО РАН и при финансовой поддержке РФФИ (грант 13-08-00076-а).*

Список литературы:

1 Физико-химические свойства окислов. Г.В.Самсонов и др. Справочник. Изд-во «Металлургия», 1978, 472 с.

## МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАСС И КООРДИНАТ ЦЕНТРА МАСС ДЕТАЛЕЙ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ.

А. К. Алешин, Н. Л. Ковалева, С. Д. Костерева

*ИМАШ РАН, Россия, Москва*

Известны и широко применяются методы определения момента инерции твердого тела на основе измерения периода его колебаний, как физического маятника. Предлагается развитие этих методов для определения массы и координат центра масс сложных по форме корпусных деталей и пространственных конструкций, которые не обладают достаточной собственной жесткостью. Задание таким объектам тестового колебательного движения приводит к тому, что исследуемая деталь или конструкция сама становится колебательной системой. Для устранения этого явления предлагается рассматривать движение исследуемого объекта в поле центробежных сил, а в качестве тестового движения ему задается равномерное плоскопараллельное движение. Это движение есть сумма равномерного поступательного движения по круговой траектории с радиусом  $r$ , пропорциональным центробежной силе, и равномерного вращательного движения [1]. Деталь устанавливается на планшайбу, которая равномерно вращается и кроме того способна смещаться на упругих опорах в радиальном направлении на радиус  $\bar{r}$ , пропорциональный центробежной силе. Для трех положений детали на планшайбе определяются радиус-векторы  $\bar{r}$ ,  $\bar{r}_1$ ,  $\bar{r}_2$  известным методом [2]. По этим данным определяются масса детали  $M$  и радиус-вектор оси  $\bar{R}_1$  положение центра масс:

$$M = \frac{m|\bar{r}_2 - \bar{r}_1|}{|\bar{r} - \bar{r}_2|}; \quad |R_1| = \frac{|\bar{r}_1| \times |k|}{|\bar{r}_2 - \bar{r}_1|}.$$

### ЛИТЕРАТУРА

1. Алешин А. К. Метод определения массы и координат центра масс тела в заданной плоскости // Проблемы машиноведения и надежности машин. – 2011. – № 2. – С. 9 ÷ 14.
2. Алешин А. К. Хронометрический метод определения величины и положения дисбаланса ротора // Изв. РАН МТТ. – 2008. – № 2. – С. 43 ÷ 48.

# ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ДИАГНОСТИКЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Р.С.Ахметханов

ИМАШ РАН, Россия, Москва

Доклад посвящен применению методов теории фракталов для анализа данных (временных рядов, изображений микрошлифов и других данных о структуре материалов) при экспериментальных исследованиях свойств конструкционных материалов и диагностике технических систем.

При анализе временных рядов и изображений микрошлифов применяются методы непосредственного определения фрактальной размерности и определения показателя Херста. При этом оцениваются как непосредственно фрактальные размерности для одномерных (временные ряды) и двумерных, трехмерных объектов, описывающих изображения микрошлифов, так и показатель Херста.

В докладе приведены результаты исследования временных рядов и изображений микрошлифов образцов при различном числе циклов нагружений. Этими исследованиями показано, что фрактальные оценки позволяют оценить состояние технической системы, чувствительны к накоплению микро разрушений на поверхности образца.

При анализе временных рядов оценивалась устойчивость динамического процесса по показателю Херста (персистентные и антиперсистентные процессы). При анализе микрошлифов проводились сравнительные оценки фрактальной размерности для всего изображения микрошлифа, по отдельности для фаз, границы между фазами (см. рис.1) и скелетной структуры (остова) изображения (см. рис.2). Приведенные результаты исследований показывают, что изменение значений фрактальной размерности происходит в пределах 15% при достижении критического числа циклов нагружений  $N_{кр}$  образца.

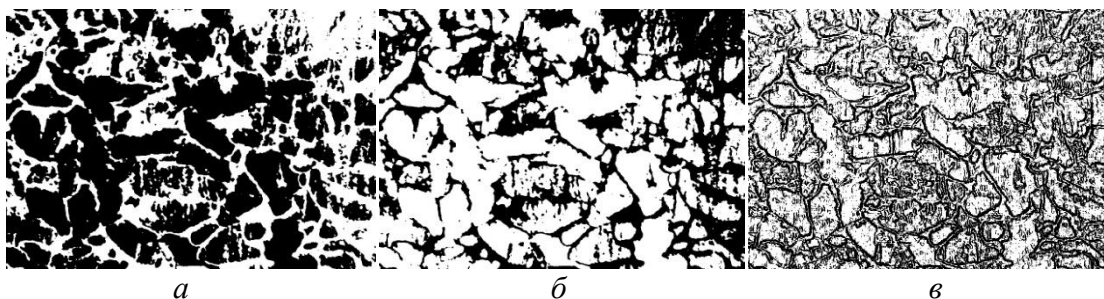


Рис.1. Изображение распределения зерен 1-ой(а) и 2-ой(б) фазы и границы между ними (в)

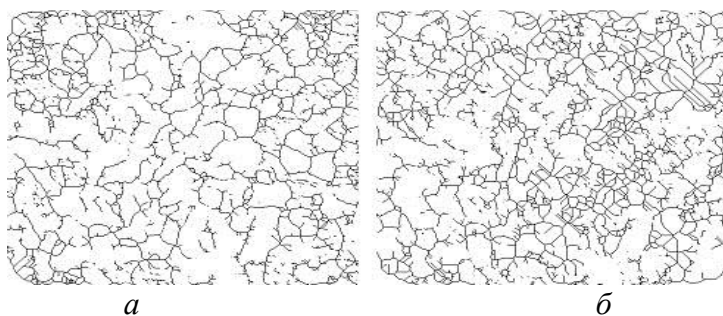


Рис.2. Скелетные изображения структуры микрошлифа при нагрузках  $N=0$ (а) и  $N=N_{кр}$

## ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СРЕДСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОСНАЩЕНИЯ

**Б.М.Базров, А.М.Арзыбаев**

*ИМАШ РАН, Россия, Москва*

Современное машиностроение отличается колоссальным разнообразием средств технологического обеспечения, которое продолжает неуклонно расти.

В то же время наблюдается значительное дублирование разработок технологического обеспечения. Оно объясняется тем, что в среднем примерно 70–80 % сборочных единиц и деталей носят общемашиностроительный характер и весьма близки по конструкции.

Однако, под их изготовление на каждом предприятии создают свои средства технологического обеспечения, которые отличаются друг от друга, что и порождает их избыточное разнообразие.

Все это приводит к расточительному расходованию материальных и трудовых ресурсов в масштабе отрасли, а на уровне предприятия увеличивает трудоемкость и сроки технологической подготовки производства (ТПП).

Поэтому проблема сокращения избыточного разнообразия средств технологического обеспечения имеет важное значение.

Одним из путей решения этой проблемы является создание элементной базы (ЭБ) технологического обеспечения.

Наличие такой ЭБ позволит не только существенно сократить избыточное разнообразие средств технологического обеспечения, но и управлять их развитием, отбирать наилучшие решения и широко их распространять по всем машиностроительным предприятиям.

Это приведет к значительному повышению эффективности машиностроительного производства как на уровне отрасли, так и на уровне отдельных предприятий.

Рассмотрим проблему создания ЭБ технологического обеспечения на примере механосборочного производства.

Под ЭБ технологического обеспечения будем понимать совокупность методов, способов, технологических переходов и операций по получению заготовок, изготовлению деталей и сборке изделий, а также элементов средств технологического оснащения (станки, сборочные машины, оснастка и др.), из которых строятся технологические процессы и технологические системы. В состав ЭБ могут входить также и сами технологические процессы и системы.

К сожалению, до сих пор отсутствует сама постановка задачи создания ЭБ технологического обеспечения на уровне отрасли.

В то же время на каждом машиностроительном предприятии имеется своя локальная ЭБ существующая, как правило, в неявном виде и представляющая собой перечень типовых технологических процессов и операций, ведомостей средств технологического оснащения, стандартов, различного рода альбомов, справочно-нормативной литературы, технической литературы и методических разработок к сожалению слабо связанных между собой и зачастую не отвечающих современным достижениям и не объединенных в единую систему.

Такие ЭБ формируются в значительной степени стихийно, отдельно по отдельным составляющим, разрозненно, фрагментарно.

Отсутствие системно оформленной ЭБ приводит к существенным потерям эффективности ТПП, повышает ее трудоемкость, снижает качество разрабатываемых технологических процессов, средств технологического оснащения.

В связи с этим актуальностью такой проблемы является построение единой элементной базы технологического оснащения.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ И СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ВИБРАЦИЙ РОТОРНЫХ СИСТЕМ ЗА СЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Л.Я.Банах, А.Н.Никифоров

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

Исследуется динамика быстроходных роторных систем, рабочие обороты которых превышают первую и вторую критическую скорость. В таких системах в качестве уплотнений обычно используются плавающие уплотнительные кольца. При этом в зазорах между кольцами и ротором действуют гидродинамические силы, существенно изменяющие динамические свойства ротора и вызывающие его неустойчивость. Однако, было выявлено, что с помощью этих сил можно также обеспечить гашение колебаний ротора. Плавающие кольца приобретают свойства гидродинамического гасителя колебаний и, притом широкополосного, при совпадении скорости вращения ротора с парциальной частотой кольца. При этом происходит гашение колебаний ротора при интенсивных колебаниях кольца в широком диапазоне частот. Этот эффект возникает при соответствующем выборе величины гидродинамической жесткости среды в зазоре при данной скорости вращения ротора, что достигается за счет регулирования перепада давления. Гидродинамическая жесткость определялась по величине реакции слоя среды в кольцевом зазоре и рассчитывалась по «укороченному» уравнению Рейнольдса без учета инерционных членов, взятого из теории «короткого кольцевого дросселя», по полному уравнению Рейнольдса с учётом этих членов, а также на основании решения уравнений Навье-Стокса в программе Ansys. Динамический анализ проводился в связанной системе «гибкий ротор-гидродинамическая среда- плавающие кольца». Явление гидродинамического гашения колебаний исследовано как для установившихся, так и для переходных режимов. Найдено, что при переходных режимах целесообразно медленное нарастание (убывание) скорости вращения при разгоне-останове, так как при большом угловом ускорении(замедлении) система медленнее входит в режим динамического гашения, и уровень нестационарных вибраций ротора оказывается выше.

Другой эффект, возникающий в рассматриваемой системе - это исчезновение критической скорости ротора, что существенно снижает опасность прохождения критических состояний. Этот эффект возникает в результате того, что гидродинамическая жесткость зависит от квадрата скорости вращения и поэтому жесткость ротора на гидродинамическом слое возрастает быстрее, чем скорость вращения и не происходит их совпадения.

Выявленные эффекты приводят к существенному снижению уровня колебаний ротора, в особенности на критических скоростях. Важной их особенностью является то, что не требуются введения дополнительных конструктивных элементов, используется лишь специальный выбор параметров уплотнения.

На основе разработанной методики были найдены параметры уплотнительных колец для многомассовой роторной системы турбонасосного агрегата ЖРД, обеспечивающие гашение колебаний в окрестности наиболее опасной второй критической скорости.

Нежелательными режимами, приводящими к интенсивному износу и повреждению оборудования при колебаниях рассматриваемого класса систем, являются виброударные режимы в области неустойчивости.

***Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 11-08-90434-Укр\_ф\_а***  
***The reported study was partially supported by RFBR, research project No. 11-08-90434-Укр\_ф\_а***

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СПОСОБЫ РЕДУКЦИИ МОДЕЛЕЙ СОСТАВНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Л.Я.Банах

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

Работа посвящена динамическому анализу составных механических систем, включающих большое число различных подсистем. Расчетные модели таких систем имеют иерархическую структуру и содержат большое число степеней свободы. Основные проблемы, возникающие при этом: выявление переменных, определяющих вибрационное состояние в данном диапазоне частот; оценка точности расчетной модели, неоднозначность выбора расчетных моделей. Для решения этих проблем предлагается использовать подходы декомпозиции, учитывающие слабые взаимодействия между подсистемами.

Найдены аналитические критерии слабых взаимодействий. Они оказались универсальными характеристиками больших систем и совпадают с критериями плохой обусловленности матрицы при вынужденных и собственных колебаниях, критерием эквивалентности различных математических моделей системы между собой, критериями чувствительности для собственных форм колебаний.

В зависимости от вида и расположения слабых взаимодействий применяются различные подходы декомпозиции

1.Разделение на слабосвязанные подсистемы, когда исходная система представляется в виде совокупности слабосвязанных подсистем, колебания в которых происходят практически независимо. Таким способом проанализированы динамика газотурбинного двигателя, все подсистемы которого оказались слабосвязанными. В результате удалось установить места установки датчиков для своевременного обнаружения дефекта межвального подшипника.

2.Декомпозиция с помощью объединения элементов (Агрегирование). Этот способ декомпозиции применяется при большом различии парциальных частот в подсистемах. Имеется электромеханическая аналогия между исключением элемента системы и преобразованием звезды в треугольник. С помощью этого подхода проведена последовательная редукция роторной системы ТНА с 28 масс до 5. При этом выявлены элементы ротора, определяющие его динамику.

3. Исключение подструктур. При этом решается проблема получения минимальной математической модели в данном диапазоне частот. Метод основан на исключении слабо-влияющих форм колебаний. С помощью этого подхода удалось снизить уровень вибрации антенного устройства.

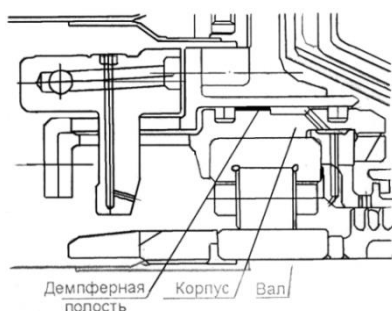
4. Частотная иерархия моделей. Таким способом проанализирована динамика ЖРД: получены 4 уровня частотной иерархии математических моделей и найдены динамические особенности при различных режимах полета и наземной транспортировки.



# О ВЛИЯНИИ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИСПОЛНЕНИЯ ОПОРЫ В ГТД НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РОЛИКОПОДШИПНИКОВ

О.М. Беломытцев.

Пермский национальный исследовательский университет, РФ, г. Пермь.



На рис.1. представлен типовой узел опоры ГТД, в котором роликоподшипник устанавливается в демпферной втулке, выполненной за одно целое с упругим элементом типа «беличьего» колеса, с уплотнениями на краях втулки в виде поршневых колец. Подшипник устанавливается по переходной посадке и в зависимости от технологического

исполнения в сопряжении может быть зазор или натяг, но в среднем имеет место зазор и неопределенное положение кольца во втулке, которое с торца фиксируется гайкой.

На номинальных режимах работы двигателя, вследствие вращения вала и тепловой деформации колец, зазор в подшипнике выбирается и переходит в натяг, который благодаря упругим деформациям – сжатию вала и растяжению наружного кольца подшипника перераспределяется между контактной деформацией и деформациями колец.

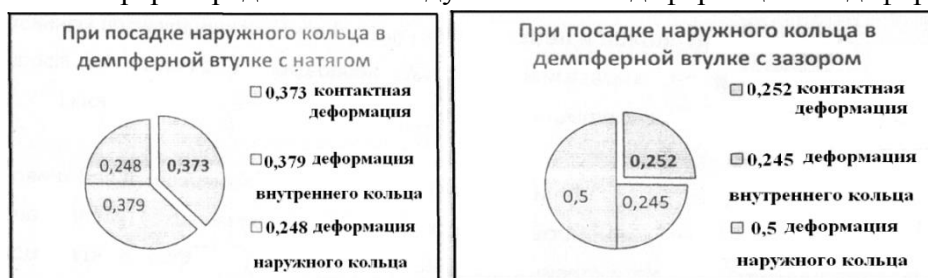


Рис. 2. Относительные значения различных перемещений и общей деформации

Долевая часть, приходящаяся на контактную деформацию, от которой непосредственно зависит долговечность подшипника, составляет около 37% от общего натяга при посадке наружного кольца в демпферной втулке с натягом и около 20% при посадке с зазором (рис.2.).

Нагрузка на ролики от функционального натяга, т.е. при работе, может существенно превышать усилие от внешней нагрузки, действующей на ротор турбины, поэтому долговечность подшипника в значительной мере определяется деформацией наружного кольца подшипника.

Вследствие неопределенности сопряжения наружного кольца с демпферной втулкой разброс долговечности по причине конструктивно-технологического исполнения опор в двигателях семейства ПС-90 может достигать трехкратной величины.

В случае перехода на совмещенные опоры, в которых беговая дорожка выполняется непосредственно на демпферной втулке, эта неопределенность исчезает. К тому же имеется большая возможность управлять толщиной втулки и тем самым влиять на распределение нагрузки по телам качения и на долговечность подшипника, т.е. решать задачу оптимизации конструктивного исполнения подшипникового узла

## **МНОГОПИЛЬНАЯ «КОЛЕНЧАТАЯ» ПИЛА - НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕМ СТАНКОСТРОЕНИИ.**

**Блохин М. А., Гаврюшин С. С., Прокопов В. С.**  
(МГТУ имени Н.Э.Баумана, Россия, Москва)

Рассматривается принципиально новое деревообрабатывающее оборудование – многопильный станок с круговым поступательным движением дереворежущих полотен. К характерным особенностям оборудования следует отнести наличие предварительного напряженно-деформированного состояния пильных полотен, при этом передача движения с ведущего на ведомый вал осуществляется через гибкие связи. Тестовая эксплуатация опытного образца показала наличие небезопасных резонансных режимов, сопровождавшихся изгибом и скручиванием полотен с формированием криволинейных пропилов, изломом зубьев и, в ряде случаев, разрушению оборудования. Актуальной задачей является выбор рациональных параметров (усилие и эксцентриситет предварительного натяжения полотен, жёсткость упругих элементов крепления, геометрические размеры рабочих органов), обеспечивающих безопасную работу лесопильного оборудования. Динамические характеристики пильных полотен во многом определяют допустимые режимы работы рассматриваемого оборудования – пильного блока, состоящего из 6-ти пильных модулей, снабжаемых 1-им, 2-мя, 3-мя или 4-мя пильными полотнами.

Выявление зависимости частот собственных колебаний полотен от условий крепления и погрешностей изготовления составных деталей является важной частью задачи выбора рациональных параметров нового деревообрабатывающего оборудования. Проводятся расчёты массовых и инерционных характеристик деталей, входящих в состав пильного модуля, с учётом возможных погрешностей изготовления, а также даётся анализ динамических характеристик дереворежущих полотен, установленных в пильный модуль, методом конечных элементов с использованием стержневых, оболочечных и специальных конечных элементов. Обнаружено, что учёт массовых характеристик деталей крепления приводит к изменению величин и порядка следования частот собственных колебаний полотен.

Принципиальными, отличительными характеристиками (по сравнению с аналогами по функциональному назначению - лесорамами Р63-4Б, РМ-50) и особенностями станка являются:

1. Снижение в 1,5...4 раза (в зависимости от характерного размера бревна, заготовки) энергозатрат на распиловку единицы обрабатываемого материала.
2. Снижение энергопотребления в 2,5...4 раза.
3. Снижение веса самого станка в 2...4 раза за счет замены возвратно-поступательных движений пильных полотен на их круговое поступательное движение и обеспечения динамического баланса действующих инерционных сил.
4. Улучшение качества поверхности распила.
5. Повышение коэффициента использования древесины более чем на 10%.
6. Вес и габариты станка, а также практическое отсутствие динамических сил в опорах позволяет осуществлять рабочий монтаж станка на барже, железнодорожной платформе, ином немассивном фундаменте, или без него.

Практическая ценность представленного станка, запатентованного в России, заключается в энергосбережении при распиловке, при изготовлении самого оборудования (малая металлоемкость), а также при реализации использования лесных ресурсов в труднодоступных районах с малым автономным энергопотреблением и одновременно высокими потребительскими качествами выпускаемого пиломатериала.

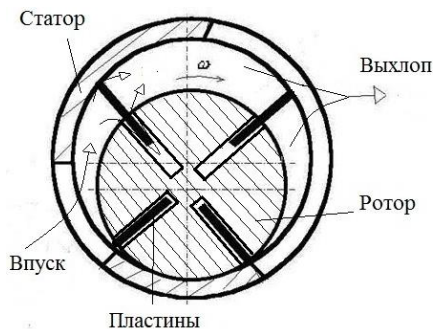
# ОЦЕНКА ПРОПУСКНЫХ СПОСОБНОСТЕЙ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ И ПОТЕРЬ СЖАТОГО ВОЗДУХА В ОБЪЕМНЫХ ПНЕВМОМОТОРАХ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВЕКТОРНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

В.М.Бозров , О.В.Гуз

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

В современном машиностроительном комплексе применение пневмоприводов требует существенных затрат электроэнергии на создание сжатого воздуха и его доставку непосредственно к пневмоустройствам механизмов, машин и инструментов для совершения полезной технологической работы. По некоторым данным [1], доля затрат на выработку сжатого воздуха на машиностроительном предприятии может составлять от 30% до 70% от общих затрат электроэнергии. При этом следует учесть дороговизну получения сжатого воздуха: на 1кВт энергии сжатого воздуха необходимо затратить 4-6 кВт электрической энергии. При таких масштабах потребления сжатого воздуха и ее дороговизне актуальность любых мероприятий по повышению КПД пневмоустройств, в том числе и пневмомоторов, экономически оправдана. В этой связи разработка методов экспериментальной оценки пропускной способности подводящих и отводящих каналов объемного пневмомотора, а также внутренних потерь энергии в нем, имеет важное значение для повышения энергоэффективности вращательных пневмоприводов, совершенствования методов их расчета и оптимального проектирования.

Исходя из актуальности поставлена задача оценки пропускных способностей соединительных каналов и потерь сжатого воздуха в объемных пневмомоторах с учетом реальных механических характеристик мотора. Для ее решения задачи предложено использовать метод векторной идентификации и программный комплекс MOVI, разработанный проф. Статниковым Р.Б. в ИМАШ РАН. Экспериментальная составляющая предлагаемого подхода состоит в получении экспериментальных данных, определяющих развиваемый мотором движущий (без учета потерь на трение) момент и расход сжатого воздуха на создание этого момента. Базой для демонстрации метода приняты известные экспериментальные данные [2], полученные применительно к пластинчатому пневмомотору (показан на рисунке), для которого нами разработана математическая модель.



Результаты исследования позволяют рекомендовать изложенную методологию как основу для разработки конкретных методов оценки пропускных способностей соединительных каналов и потерь сжатого воздуха в объемных пневмомоторах при их доводке, а также для решения диагностических задач и обеспечения адекватности математических моделей пневмомоторов, используемых при оптимальном синтезе их конструктивных параметров.

## Литература

1. Резчиков А.Ф., Кушников В.А. Управление процессами производства и распределения сжатого воздуха на машиностроительном предприятии / А.Ф. Резчиков, В.А. Кушников // Энергетик. - 1991. - № 10.
2. Лебедев В.П. Расчет характеристик ротационного пневматического двигателя // В сб. «Механизированный инструмент и отделочные машины». Вып. 2. - М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1971, с. 11-17.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ДЛЯ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И ДРУГИХ МОБИЛЬНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ.

**В.М.Бозров <sup>1)</sup>, В.И.Ивлев <sup>1)</sup>, И.Л.Кривц <sup>2)</sup>**

*<sup>1)</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Россия, Москва*

*<sup>2)</sup>PDCBusinessGroup, AppliedMaterials, Израиль*

Одна из основных задач, стоящих при совершенствовании конструкций пневмомоторов (ПМ) является повышение их энергоэффективности – расхода сжатого воздуха на единицу развиваемой мощности. Актуальность этой задачи обусловлена тем, что энергия сжатого воздуха почти в 5 раз дороже, чем электроэнергия, а сжатый воздух является вторым по значимости энергоносителем в промышленности после электричества. Для мобильных приложений пневмопривода (питание от баллона высокого давления) этот вопрос особенно важен, т.к. напрямую связан с габаритами источника питания и временем автономной работы. Повышение энергоэффективности в основном определяется следующими мероприятиями:

- повышение точности и качества изготовления деталей ПМ, что дает возможность снизить утечки и механические потери;
- применение новых конструкционных материалов и антифрикционных покрытий для снижения инерционных нагрузок, потерь на трение и повышения ресурса;
- развитие детализированных методов расчета ПМ и оптимизации их конструктивных параметров для правильной организации термодинамических процессов в рабочих полостях, с целью повышения энергоэффективности;
- разработка новых типов ПМ, использующих специально созданные механизмы преобразования энергии сжатого воздуха в механическую работу;

В докладе приводятся следующие результаты исследований:

- получена оценка энергетического потенциала автономного пневматического источника питания и пневмомотора с учетом свойств реального газа и определены основные источники потерь;
- разработана детализированная математическая модель для ПМ объемного принципа действия, в частности, пластинчатого и поршневого, позволяющая исследовать работу ПМ в динамических режимах (разгон, торможение, реверс), так и строить его механические характеристики;
- для радиально-поршневого ПМ разработана процедура выбора его конструктивных параметров, реализующих максимальную мощность при минимальном расходе сжатого воздуха и минимальных габаритов с использованием методов многокритериальной оптимизации систем с большим числом варьируемых параметров и поддержки принятия решений;
- для пластинчатого ПМ определены нагрузки и скорости в основных узлах трения, что позволило обоснованно подойти к выбору материала пластин и подшипников, обеспечивающих работу на сухом сжатом воздухе (без смазки) при увеличении ресурса и снижении уровня механических потерь.

Значимость исследований в данном направлении обусловлена также и тем, что в России с девяностых годов практически нет специализированных организаций, где проводились бы работы по разработке новых конструкций ПМ.

## ДИНАМИКА ВОЛНОВОГО РЕЗОНАНСНОГО СМЕСИТЕЛЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Е.А. Брызгалов, С.С. Панин, В.С. Николаенко, В.А. Шувалов,  
Н.И. Яковенко, Д.В. Курменёв

*Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института  
машинovedения им. А.А. Благонравова Российской академии наук «Научный центр  
нелинейной волновой механики и технологии РАН» (НЦ НВМТ РАН), РФ, Москва*

Процессы смешивания сыпучих материалов широко применяются в различных отраслях промышленности. Темпы развития этих отраслей требуют совершенствования конструкций оборудования для смешивания: повышения его надежности и работоспособности. Кроме того, остро стоит проблема снижения себестоимости продукции, а также повышения её качества и уменьшения энергетического потребления.

В связи с этим, в течение нескольких лет в НЦ НВМТ РАН под руководством академика РАН Р.Ф. Ганиева на базе явлений и эффектов нелинейной волновой механики разработаны новые принципы интенсификации массообменных процессов в различных типах сред [1 - 3].

Массоперенос при волновом воздействии отличается от традиционного перемешивания тем, что движение среды порождается не за счёт увлечения её движущейся частью мешалки, а за счёт возбуждения и распространения внутри среды волн давления [4,5]. Основное внимание при этом уделено определению режимов колебаний, которые обеспечивают переход уплотненного сыпучего тела в так называемое оптимальное динамическое состояние, характеризующееся резким увеличением подвижности при минимуме энергозатрат.

В рамках созданной в НЦ НВМТ РАН волновой технологии были выявлены волновые эффекты интенсивного резонансного волнового воздействия на различные порошкообразные материалы [6, 7]. Также была разработана методика проектирования динамических систем нового класса резонансных волновых машин – смесителей, реализующих возможность организации интенсивных трёхмерных течений в обрабатываемом объёме сыпучей среды на основе эффектов нелинейной волновой механики.

Список литературы

1. Ганиев Р.Ф. Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. — М. : Регулярная и хаотическая динамика, 2008.
2. Ганиев Р.Ф. (под ред.) Колебательные явления в многофазных средах и их использование в технологии. — Киев : Техника, 1980.
3. Ганиев Р.Ф. Волновые машины и технологии. (Введение в волновую технологию). — М. : Регулярная и хаотическая динамика, 2008.
4. Ганиев Р.Ф. Брызгалов Е.А., Панин С.С. и др. Волновая технология производства магнитодиэлектриков // Справочник. Инженерный журнал. — М. : 2010 г.. — №1. — 3-7 стр..
5. Ганиев Р.Ф. Брызгалов Е.А. Панин С.С. и др. Исследование микроструктуры магнитодиэлектрика, полученного с использованием волновой технологии // Справочник. Инженерный журнал. — М. : 2011 г.. — №2. — 3-7 стр.
6. Брызгалов Е.А., Яковенко Н.И. К исследованиям влияния волновых колебаний на высокодисперсные сыпучие среды в режиме псевдооживления // Проблемы машиностроения и надёжности машин. — М. : 2012 г.. — 2. — с.10-16
7. Брызгалов Е.А. Исследования волнового смесителя-активатора для производства модифицирующих добавок // Итоги диссертационных исследований. Том 2 – Материалы IV Всероссийского конкурса молодых ученых. / М.: РАН. — 2012. — с. 22-32.

## СИСТЕМА «ГИДРОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – ДЖОЙСТИК Z3 – ОПЕРАТОР»

**Брысин А. Н., Синев А. В.**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Россия, Москва*

Применяемые двухкоординатные джойстики и пульта дистанционного управления не позволяют реализовывать ряд функций одной рукой, что приводит к потере концентрации оператора при выполнении сложных манипуляций в пространстве и снижает скорость выполняемых работ. Современные манипуляторы являются системами, адаптированными к высокоточным перемещениям на плоскости в координатах  $X$ ,  $Y$  и имеют возможность реализовывать дополнительные функции за счет дополнительных аналоговых и цифровых входов. Основные причины не позволяющие использовать существующие манипуляторы как трехкоординатные системы заключаются в разрозненности эргономических, управленческих робототехнических подходов при решении задачи. Для трехкоординатных систем манипулирования естественной дополнительной проблемой является увеличение нестабильности позиционирования от вибрационных воздействий.

До настоящего времени задачи эргономики, управления и виброзащиты рассматривались как самостоятельные. Создание перспективных систем регулирования с управлением манипулятором по трем пространственным координатам требует объединения этих параллельно развивающихся направлений. В ИМАШ РАН ведутся работы по созданию пространственных джойстиков, способных управлять системами приводов по трем координатам  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (джойстики  $Z$ ). Реализация этих систем потребовала корректировки методик испытаний систем виброзащиты с гидравлическими преобразователями, разработки новых математических моделей, учитывающих как вибрационное так и ударное воздействие, создание оригинальных микропроцессорных систем управления приводами, разработки программного обеспечения, корректировки моделей человек – исполнительный орган управления. В ходе реализации проекта разработаны оригинальные физические модели систем управления реализованы алгоритмы управления псевдотрехкоординатными манипуляторами для управления линейными приводами, разработаны физические модели джойстиков со встроенными системами виброзащиты.

*Работа проводится в рамках межсекционной программы ОЭММПУ РАН №1 "Научные основы робототехники и мехатроники"*

## ГРАНИЧНАЯ СМАЗКА СТАЛЬНЫХ ТЕЛ С ТВЁРДЫМИ УГЛЕРОДНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

**И.А. Буяновский<sup>1)</sup>, В.Л. Левченко<sup>2)</sup>, А.Н. Большаков<sup>1)</sup>, Р.А. Бортко<sup>3)</sup>, М.Н. Зеленская<sup>1)</sup>, В.Н. Матвеев<sup>2)</sup>, А.Г. Сипатров<sup>3)</sup>**

<sup>1)</sup>ФГУН «Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия

<sup>2)</sup>Химический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3)</sup>НИИ-25 МО РФ, Москва, Россия

В докладе обобщены результаты проведённых в 2008 – 2012 гг. совместных исследований ИМАШ РАН, Химфака МГУ и НИИ 25 МО влияния твёрдых углеродных покрытий на антифрикционные и противоизносные свойства смазочных масел при граничной смазке. Ранее нами было установлено, что покрытия рабочих поверхностей стальных деталей монокристаллическим углеродом при граничной смазке обеспечивает образование на этих поверхностях высокоупорядоченных гомеотропно ориентированных граничных слоёв, которые работоспособны в достаточно широком интервале температур и нагрузок. Кроме того, Исследованиями Подгорника, Визинтина, де Барроз Баро и др. исследователей установлено, что легирование аморфных углеродных покрытий вольфрамом обеспечивает повышение противоизносных и антифрикционных свойств некоторых модельных и коммерческих масел. Была сделана попытка повысить ориентирующие свойства покрытий монокристаллическим углеродом путём легирования вольфрамом, для чего была разработана методика легирования вольфрамом монокристаллических углеродных покрытий и изучено влияние этого процесса на смазочные свойства некоторых смазочных композиций: тетрадекана, тетрадекана с присадками: поверхностно-активной (олеиновой кислотой) и химически активной (диалкилдитиофосфатом цинка), а также синтетического полиальфаолефинового масла ПАОМ-4. Испытания проводили на двух машинах трения - вибрационном трибометре УМТ-3МТ производства компании SETR с узлом трения «шарик по плоскости» и на разработанной в ИМАШ РАН машине трения возвратно-поступательного действия ВП-1 со схемой трения «неподвижный ролик - возвратно-поступательно перемещающаяся пластина» в интервале давлений, характерных для средненагруженных узлов трения современных машин и механизмов. Исследовано влияние трёх модельных смазочных композиций на антифрикционные и противоизносные свойства пар трения сталь-сталь и сталь - монокристаллическое алмазоподобное покрытие, легированное вольфрамом, при варьировании частоты осцилляций (в интервале 1-25 Гц) и нагрузок (в интервале 1 - 50 Н). Показано, что применение монокристаллического углеродного покрытия, легированного вольфрамом, существенно расширяет интервал работооспособности для стальных деталей узла трения, смазанного как синтетическим маслом ПАОМ-4, так и н-тетрадеканом в условиях возвратно-поступательного перемещения трущихся тел по сравнению с трением по стали, причём применение поверхностно-активных и химически активных присадок при смазывании н-тетрадеканом пары трения сталь - монокристаллическое углеродное покрытие, легированное вольфрамом, повышает его противоизносные и (применительно к добавке диалкилфитофосфата цинка) антифрикционные свойства. Масло ПАОМ-4 было испытано в интервале нагрузок 12,5 – 50 Н и частоте осцилляций 60 мин<sup>-1</sup>; результаты испытаний также показали существенное повышение смазочных свойств этого масла при нанесении на сталь монокристаллического углеродного покрытия, легированного вольфрамом. Поверхности трения исследовали на атомно-силовом микроскопе АСМ Nanosurf-B, что позволило оценить механизм изнашивания в исследуемых смазочных средах.

## **ДИНАМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПРИ СНИЖЕНИИ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ВОДИТЕЛЯ**

**А.Н. Варнавский**

*Рязанский государственный радиотехнический университет, г. Рязань, Россия*

Актуальной является задача повышения безопасности дорожного движения, поскольку в последние годы наблюдаются тенденции увеличения, как числа транспортных средств, так и числа дорожно-транспортных происшествий, числа погибших и пострадавших на дорогах страны. Без учета человеческого фактора решить данную задачу невозможно.

Человеческого фактор может быть определен как совокупность характеристик водителя. Такие характеристики обусловлены свойствами нервной системы водителя, влияющими на его психодинамические функции, на возникновение и протекание нейродинамических процессов, и, соответственно, на скорость реакции, продуктивность, переключаемость и устойчивость внимания. Решить проблему повышения безопасности дорожного движения частично можно с использованием психофизиологического отбора водителей автомобилей. Введение такого отбора позволяет повысить надежность водителей и снизить количество ДТП. Однако во многих случаях этого оказывается недостаточно и необходимы эффективные технические средства, обеспечивающие повышение безопасности движения транспортного средства, особенно при снижении надежности работы водителя.

Целью работы является разработка активной системы безопасности для поддержки процесса управления транспортными средствами за счет анализа и прогнозирования надежности работы водителя.

Разрабатываемая система безопасности связана непосредственно с системой управления двигателем транспортного средства. Она включает блок анализа надежности водителя, блок управления торможением и блок экстренного торможения.

Работа блока анализа надежности водителя включает два основных этапа. На первом этапе, выполняемом перед началом работы, осуществляется оценка свойств нервной системы и показателей нейродинамических процессов с помощью экспресс-тестирования и анализа биоэлектрических сигналов водителя. На основании такой оценки по критерию достижения минимальной вероятности возникновения ДТП происходит определение значений максимально допустимых скорости движения транспортного средства и времени движения с этой скоростью. На втором этапе в процессе движения происходит оценка окружающей обстановки, текущего состояния водителя и показателей его нейродинамических процессов путем анализа видеоизображений и биоэлектрических сигналов. По результатам такого анализа формируются коэффициенты для изменения значений максимально допустимых скорости движения транспортного средства и времени движения с этой скоростью.

Разработана модификация электродвигателя, обладающая более высоким быстродействием торможения за счет наличия дополнительной обмотки статора. Постоянный ток, протекая по такой обмотке, создаёт постоянное магнитное поле, которое является тормозящим. За счет этого возможно быстрое изменение вращающего момента электродвигателя и скорости движения транспортного средства.

Для оценки эффективности использования разрабатываемой системы в пакете GPSSWorld было проведено имитационное моделирование вероятности возникновения ДТП, которое показало, что при использовании системы безопасности происходит уменьшение вероятности возникновения ДТП с 8% до 3%.



# Вероятностный подход к обоснованию инициирования и развития трещин при нескольких циклических нагрузках, включая действие

## импульсов тока

В.Г. Веземский<sup>1)</sup>, О.А. Троицкий<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>ОАО ВНИИАЭС и <sup>2)</sup>Институт машиноведения им А.А.Благонравова РАН

1. В предлагаемом подходе рассматривается вероятностная оценка долговечности металла через построение функций вероятности разрушающих повреждений от действия  $m$  последовательно приложенных пакетов циклических нагрузок с амплитудами напряжений  $\sigma_{ai}$ . Функции вероятности разрушающих повреждений формируются на основе функций распределения разрушающих повреждений  $F_i(a)$ , которые, в свою очередь, получены путём перестроения экспериментальных функций распределения разрушающих чисел циклов  $F_i(N)$  для нормативного предельного состояния по образованию макро трещины от 0,5 до 2.0 мм. Вероятностный подход опирается на две гипотезы.

**Первая гипотеза** относится к формированию оси долговечности функции вероятности разрушающих повреждений, на которой по заданному порядку нагрузок откладываются интервалы логарифмов разрушающих повреждений всех пакетов циклов от 1 до  $m$ . Первая нагрузка с функцией распределения разрушающих повреждений  $F_1(a)$  и пороговым разрушающим повреждением  $a_{01}=(N_{01}/[N_1])$ , определяет начальную часть функции вероятности до граничного повреждения  $a_{1c}=(N_1/[N]_1)$  со вторым пакетом нагрузки, где  $N_1$  число циклов в первом пакете,  $[N]_1$  математическое ожидание функции распределения разрушающих чисел циклов  $F_1(N)$ . При  $a_{1c}$  вероятность разрушения соответственно равна  $\gamma_1 = F_1(a_{1c})$ .

**Вторая гипотеза** относится к формированию собственно функции вероятности разрушающих повреждений при  $a > a_{1c}$ , по которой на отрезке  $a_{1c} < a < a_{2c}$  к  $a_{1c}$  добавляется как повреждение от второго пакета  $a_{2c}=(N_2/[N]_2)$ , так и к  $\gamma_1$  добавляется пропорциональная доля функции распределения от второго пакета циклов и так далее строится функция вероятности от всех нагрузок до  $\gamma=1$ .

2. В литературе имеются некоторые, очень скудные статистические экспериментальные данные на образцах для двух последовательных нагрузок с разной историей приложения (1-2 и 2-1), которые показывают качественно хорошее соответствие с результатами расчёта по вероятностному подходу.

3. В настоящее время методы механики разрушения дают возможность определять детерминированное время роста трещины, которое будучи просуммированным с функцией вероятности разрушающих повреждений до образования макротрещины даёт совместную функцию вероятности включающую инициацию и рост трещины до определённой величины.

4. Рассмотрен вопрос о возможности управления процессом деформации и хрупкого разрушения металла с помощью воздействия на металл во время его деформации импульсами тока, что может приводить, с одной стороны, к значительному (на 30-35%) снижению сопротивления металла деформированию и, с другой стороны, уменьшать вероятность хрупкого разрушения образцов при низких температурах или квазихрупкого разрушения в присутствии жидкого расплава другого металла при комнатной температуре.

# ВНУТРЕННИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ВОДОРОДНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Н.М. Власов

РОНЦ МГОУ имени В.С. Черномырдина, Россия, Подольск

Цилиндрические оболочки принадлежат к наиболее распространенным элементам конструкций ядерной техники. В качестве примера достаточно упомянуть цилиндрические оболочки тепловыделяющих элементов ядерных реакторов [1, 2]. Они предназначены для удержания продуктов деления и примесей внедрения при выгорании ядерного топлива. Исследована возможность управления внутренними напряжениями различной природы при математическом моделировании водородной проницаемости цилиндрической оболочки. Физическая сущность и математическое описание процесса управления достаточно прозрачны. Компоненты тензора внутренних напряжений различных типов описываются тензором второго ранга. В линейном пространстве справедливы законы тензорной алгебры. Физически это означает, что внутренние напряжения различной природы не взаимодействуют друг с другом. Отсюда непосредственно вытекает возможность управления внутренними напряжениями для изменения водородной проницаемости оболочек. Этому в значительной мере способствует одинаковая координатная зависимость рассматриваемых напряжений. Диффузионная кинетика атомов водорода зависит от первого инварианта тензора внутренних напряжений. Потенциал взаимодействия (энергия связи) атома водорода с полем напряжений определяется из выражения [3]

$$V = -\frac{\sigma_{II}}{3} \delta v$$

где  $\sigma_{II}$  – первый инвариант тензора внутренних напряжений,  $\delta v$  – изменение объема материала при размещении атома водорода. Величина  $\sigma_{II}$  для анализируемых типов внутренних напряжений имеет единую логарифмическую зависимость от радиальной координаты. Отличие присуще только постоянным, которые отражают природу внутренних напряжений. Подобная координатная зависимость позволяет получить точное аналитическое решение уравнений диффузионной кинетики, поскольку логарифмическая функция является гармонической, а ее градиент обратно пропорционален радиусу в цилиндрической системе координат.

Приведены значения для температурных, концентрационных и остаточных напряжений. В рамках линейной теории упругости допускается их алгебраическое суммирование.

## Список литературы

- [1] Власов Н.М., Федик И.И. Тепловыделяющие элементы ядерных ракетных двигателей. М.: ЦНИИатоминформ, 2001, 205с.
- [2] Власов Н.М., Драгунов Ю.Г. Диффузионная проницаемость оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ). Проблемы машиностроения и автоматизации, 2012, №3 с. 124-129.
- [3] Драгунов Ю.Г., Власов Н.М., Иванов С.Д., Федик И.И. Самоуравновешенные внутренние напряжения. М.: МГОУ, 2010, 391с.

# ТРАНСФОРМАЦИЯ ЭНЕРГИИ И УСТРАНЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ КОЛЕБАНИЙ В ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНАХ ЦИКЛОВЫХ МАШИН

**И.И. Вульфсон**

*Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна, Россия,  
Санкт-Петербург*

Исследуется обмен энергией колебаний между внешним источником и подсистемами цикловых машин, схематизированных в виде динамических моделей с медленно изменяющимися параметрами. Нестационарность связей, свойственная приводам машин с цикловыми механизмами, во многих случаях является источником энергетической «подпитки» колебаний, а также приводит к нежелательному перераспределению колебаний и их концентрации в определённых узлах, звеньях, сечениях и т.п. В частности, в подобных случаях возможны локальные нарушения условий динамической устойчивости, когда на ограниченных отрезках времени происходит интенсивный рост амплитуд колебаний [1]. Отметим, что рассматриваемая проблема носит достаточно общий характер и встречается в различных разделах физики. В частности, в квантовой механике известно так называемое туннелирование Ландау–Зинера, при котором при внешнем возмущении в системе происходит энергетический обмен между двумя уровнями [2].

Непосредственно к рассматриваемому классу задач относится пространственная локализация в колебательных цепочках [3]. При этом в определённых сечениях нарушается строгая динамическая регулярность системы, что приводит к возникновению чётко выраженных экстремумов в формах колебаний. Подобные эффекты наблюдаются при анализе динамики машин и автоматических линий с повторяющимися секциями (модулями). Устранение пространственной локализации, в частности, необходимо при проектировании машин с повышенной протяжённостью зоны технологической обработки изделия, когда колебания длинных рабочих органов должны быть близки к синфазным. Нарушение этого требования приводит к появлению помимо нежелательных динамических эффектов к разного рода дефектам выпускаемой продукции, таким как неравномота пряжи и кромочные дефекты при изготовлении тканей, обрывы нитей, повреждения печатной продукции в полиграфических машинах, нарушения заданной точности и чистоты обрабатываемой поверхности в металлорежущих станках и др.

Установленные динамические эффекты и основные выводы иллюстрируются результатами компьютерного моделирования. Приводятся инженерные рекомендации для понижения виброактивности этого класса цикловых машин и механизмов.

## Список литературы

1. *Вульфсон И.И.* Колебания машин с механизмами циклового действия. – Машиностроение, 1990. – 309 с
2. *Косевич Ю. А., Маневич Л. И., Маневич Э. Л.* Колебательный аналог неадабатического туннелирования Ландау – Зинера и возможность создания энергетических ловушек нового типа // Успехи физических наук. 2010. Т.180, №12 –С. 1331 – 1334
3. *Вульфсон И.И.* Синфазность и пространственная локализация колебаний рабочих органов цикловых машин с симметричной динамической структурой. // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2011. №1. – С.12–18.

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КОЛЬМАТАЦИИ ПРОНИЦАЕМОЙ ПОРОДЫ В УСЛОВИЯХ ВОЛНОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В МНОГОФАЗНЫХ СРЕДАХ.**

**Р.Ф. Ганиев, Н.А. Шамов**

Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук «Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН» (Москва)

Исследования изменений гидродинамической связи скважины с пластом при ее бурении, в том числе происходящих за счет применения волновой кольматации породы, является необходимым этапом в поиске решений, направленных на повышение качества вскрытия продуктивных пластов [1, 2].

На основании результатов экспериментальных наблюдений получены математические модели влияния на такие параметры кольматации, как ее эффективность (степень), объем выделившегося при кольматации фильтра и выдерживание избыточного давления ее слоем следующих факторов – концентрации твердой фазы бурового раствора, интенсивности расходуемой на процесс кольматации энергии, перепада давления в породе и ее проницаемости. На основании моделей построены кривые зависимостей указанных параметров. Разработаны экспериментальная установка и несколько вариантов специального волнового оборудования.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технология. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. – Изд. 2-е, дополн. – М.: Институт компьютерных исследований; Научно-издательский центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2011. – 780 с.

2. Шамов Н.А. Устройство для очистки и кольматации ствола скважины (варианты). Патент 2313655 RU, кл. E21B 37/02, E21B 33/13; 2006116200; Заявлено 12.05.06; Бюл. № 36, 2007. – 17 с.: ил.

## **ПОВЫШЕНИЕ НЕФТЕОТДАЧИ ПРОДУКТИВНЫХ ПЛАСТОВ С ПОМОЩЬЮ УДАРНЫХ ВОЛН.**

**О.Р.Ганиев, Л.Е.Украинский, И.Г.Устенко.**

*Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук «Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН» (Москва)*

Основным методом повышения нефтеотдачи в стране является заводнение. В процессе вытеснения нефти водой часть углеводородов удерживается в поровом пространстве пласта капиллярными силами. В зависимости от типа смачиваемости стенок пор нефть может образовать на этих стенках тонкую пленку, не участвующую в фильтрационном процессе. Также возможно образование мелкодисперсных капель воды, занимающих поровое пространство и блокирующих фильтрацию углеводородов. Эти процессы приводят к заметному снижению проницаемости коллектора, к увеличению обводненности фильтрата и уменьшению коэффициента нефтеотдачи.

Было проведено исследование возможности извлечения из продуктивного пласта капиллярно удерживаемой нефти и повышения коэффициента нефтеотдачи с помощью воздействия ударных волн.

Был проведен теоретический анализ распространения плоской ударной волны в упругой пористой среде, насыщенной сжимаемой вязкой жидкостью. Получены зависимости перепада давления, скорости жидкости и скорости пористой среды от различных параметров. Показано, что волновое воздействие на пласт способно создать в поровом пространстве силы, превышающие капиллярные силы и силы адгезии, удерживающие в порах капли нефти и коагулирующие твердые частицы.

Было проведено экспериментальное исследования влияния ударных волн на процесс вытеснения углеводородов водой. Моделировались «площадные» волновые обработки, воздействующие на участки месторождения, содержащие группы скважин. Было показано, что волновое воздействие приводит к вовлечению в фильтрационный процесс капиллярно удерживаемой нефти и повышению коэффициента нефтеотдачи.

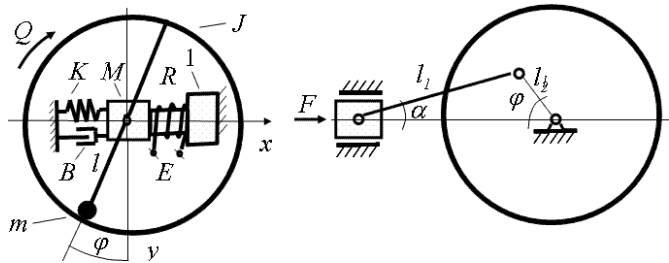
## ВЛИЯНИЕ ПРИВОДА НА ЭФФЕКТ ВИБРАЦИОННОГО ПОДДЕРЖАНИЯ ВРАЩЕНИЯ.

М.Е.Герц, М.М.Герц

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

Учет характеристик привода, как правило, приводит к уменьшению областей существования и устойчивости режимов при реализации динамических эффектов. Так, в системах с «ограниченным возбуждением», рассмотренных И.И.Блехманом и В.О.Кононенко, уменьшаются частотный диапазон и области устойчивости в резонансной зоне. Эффект «самосинхронизации» маятников на вибрирующем основании под воздействием дебалансного вращательного привода ограничивается, как показано И.И.Блехманом, дорезонансными режимами.

Эффект поддержания вращения маятника на вибрирующем по одной прямолинейной координате и гармоническому закону основании, динамический анализ которого выполнен Ю.А.Митропольским, может быть реализован в виде схемы машины на рисунке. Колесо с дебалансом массы  $m$  моментом инерции  $J$  соединено вращательной парой с линейным осциллятором массой  $M$  (включающей колесо и обмотку возбуждения), жесткостью  $K$  с коэффициентом сопротивления  $B$  связанной с основанием.



Учитывается противодействующий вращению момент  $Q = -B_1\dot{\varphi} - Q_0 \text{sign} \dot{\varphi}$ . Электродинамический вибровозбудитель 1 с гармоническим напряжением  $E = E_0 \sin \omega t$  на обмотке с сопротивлением  $R$  вызывает колебания осциллятора по координате  $x$ ,  $\omega$ -круговая частота,  $t$ - время.

Такая схема получается заменой входа на выход в механизме В.О.Кононенко, то есть вместо вращательного привода координаты  $\varphi$  рассматривается поступательный привод 1 координаты  $x$ . Соответственно, на выходе получаем вращательное движение вместо колебательного. Эта схема может стать альтернативой транспортному средству с двигателем внутреннего сгорания (масса  $M$  включает поршень) или использоваться как синхронный вибродвигатель.

В первом приближении метода осреднения при учете статической характеристики вибровозбудителя исследованы условия существования и устойчивости стационарных режимов. Выявлено наличие участков неустойчивости резонансных режимов. В аналитическом виде найдена зависимость максимально достижимого момента  $Q_0$  от функции частоты  $\omega$  (угловой скорости вращения колеса) при заданной амплитуде напряжения  $E_0$ . Получены механические характеристики системы как вибродвигателя. Оценены возможности управления двигателем напряжением и частотой вибровозбудителя.

Одним из преимуществ рассмотренного способа преобразования движения по сравнению с ползунно-кривошипным механизмом является уменьшение на две вращательные пары (у звена  $l_1$ ) и, соответственно, отсутствие потерь на трение в них. Сравнение со средним за оборот статическим моментом ползунно-кривошипного механизма при соотношении плеч  $l_1/l_2=4$  без учета трения в последнем случае показало на примере большой момент вблизи резонанса в предложенной схеме, что позволяет ожидать при полном анализе подавляющее преимущество.

## **ВОЗМОЖНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ**

**В.А. Глазунов**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения  
им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Россия, Москва*

Механизмы параллельной структуры находят все большее применение в различных областях науки и техники. Этот факт вызван тем, что данные технические устройства обладают весьма уникальными свойствами, позволяющими решать такие проблемы, в которых иные принципы построения механизмов не смогли бы обусловить приемлемые результаты.

Приведем некоторые технические решения, основанные на принципах параллельной структуры. Прежде всего, остановимся на роботах, предназначенных для работы в агрессивных средах, а также для испытаний моделей аэрокосмических систем в аэродинамической трубе. Данные манипуляционные механизмы построены таким образом, что все двигатели расположены вне рабочего пространства, таким образом, чтобы минимально затенять воздушный поток. Такое расположение позволяет использовать этот подход для агрессивных сред, поскольку вредные воздействия среды не окажут существенного влияния на работу привода.

Другим применением механизмов параллельной структуры становится построение на этой основе различных технологических систем. В течение последних двух десятилетий делаются попытки создать различные металлообрабатывающие технологические установки, основанные на указанном принципе. Данная задача встречает определенные трудности, связанные с тем, что все приводы в механизмах параллельной структуры, как правило, кинематически и динамически связаны. Кроме того, в каждой точке рабочего пространства имеют место различные показатели по жесткости и точности, что существенно уменьшает функциональные возможности. Для решения этих проблем целесообразно на этапе структурного синтеза так подобрать схему механизма, чтобы минимизировать взаимное влияние между приводами и обеспечить постоянство передаточных отношений. Механизмы, построенные с учетом этих требований, целесообразно использовать также в новых устройствах, предназначенных для 3Dпринтеров.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ МАШИН

Ю. П. Глухов<sup>1)</sup>, В.П. Ляшенко<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>*Институт механики им. С.П. Тимошенко НАН Украины, г. Киев,*

<sup>2)</sup>*Кременчугский национальный университет им. М. Остроградського,  
Украина, г. Кременчуг*

Практически во всех областях естествознания и техники возникают проблемы, связанные с теорией распространения упругих волн. Одной из интересных и актуальных проблем, анализ которой невозможно провести в рамках классической теории распространения упругих волн, является теория распространения упругих волн в телах с начальными напряжениями, круг прикладных аспектов которой весьма широк.

В данной работе в рамках линеаризированной теории упругости для тел с начальными напряжениями [1] рассмотрена плоская установившаяся задача о возмущении движущейся с постоянной скоростью поверхностной нагрузкой двухслойной полосы, лежащей на жестком основании.

Движение верхнего слоя полосы описано системой уравнений из теории пластин, учитывающей влияние инерции вращения и поперечного сдвига [2].

Подстилающий слой, лежащий на жестком основании, имеет начальные напряжения и состоит из сжимаемого или несжимаемого изотропного материала с произвольным упругим потенциалом. Считаем, что начально-деформированное состояние слоя является однородным. Границы элементов слоистой среды параллельны между собой.

К свободной границе полосы приложена движущаяся с постоянной скоростью нагрузка, вызывающая в рассматриваемой слоистой среде плоское деформированное состояние.

Аналогичные задачи для двухслойного полупространства из сжимаемого и несжимаемого материалов рассмотрены в работах [3, 4].

Предполагаем возможными два варианта контакта элементов полосы между собой и жестким основанием: жесткий контакт и скользящий контакт.

Решение задачи получено в общем виде с помощью метода интегральных преобразований Фурье для различных условий контакта между элементами слоистой среды и скоростей движения поверхностной нагрузки.

Приведены формулы для трансформант характеристик напряженно-деформированного состояния двухслойной полосы.

1. *Гузь А.Н.* Упругие волны в телах с начальными (остаточными) напряжениями. – Киев: “А.С.К”, 2004. – 672 с.

2. *Achenbach J.D., Keshawa S.P., Herrmann G.* Moving load on a plate resting on an elastic half space// Trans.ASME. Ser.E.J.Appl.Mech. – 1967.- 34, № 4. – P.183 – 189.

3. *Бабич С.Ю., Глухов Ю.П., Гузь А.Н.* Об одной динамической задаче для слоистого сжимаемого полупространства с начальными напряжениями // Прикл. механика. - 2008. - 44, № 3.-С. 36 - 54.

4. *Бабич С.Ю., Глухов Ю.П., Гузь А.Н.* Динамика слоистого несжимаемого полупространства с начальными напряжениями при воздействии подвижной нагрузки // Прикл. механика. - 2008. - 44, № 4. - С. 35 - 55.



## **ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИЗНОСА УЗЛОВ ТРЕНИЯ**

**В.В.Гриб**

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет  
(МАДИ), Россия, Москва*

Преимущества оценки технического состояния машин по показателям виброакустических сигналов, генерируемых машиной, заключаются в отсутствии необходимости ее остановки и разборки. В то же время в отличие от прямых методов измерения диагностических параметров вибродиагностика является косвенным методом, требующим процедуры распознавания технического состояния по виброакустическим сигналам, регистрируемых и анализируемых специальной аппаратурой. Сложность такой процедуры обусловлена наличием большого количества и различных по своей природе источников виброакустических сигналов: циклически меняющихся движущих сил и сил сопротивления; сил, возникающих в гидро- и газодинамических системах машины, сложной кинематики деталей, неуравновешенности масс деталей, отклонении от соосности валов, сил трения, формой сопряженных деталей и наличием изменяющихся зазоров между ними, ударами в кинематических парах, деформацией деталей, наличием упругих и демпфирующих элементов и т.д. Наложение колебаний от различных источников на выходной виброакустический сигнал, фиксируемый датчиком, делает невозможным построение полной картины вибрационного состояния машины.

Информацию о состоянии узлов трения несут временная и частотная (спектр) функции виброакустического сигнала. Разделить влияние многочисленных источников колебаний представляет существенную сложность. Поэтому представляет интерес уже накопленный опыт степени влияния различных источников на вибрационные процессы различных механизмов. Так, работа механизма сопровождается силовым взаимодействием деталей в кинематических парах, в результате которого осуществляется передача энергии от одних элементов к другим, что фиксирует временной сигнал. Износ трибосопряжений проявляется в большей мере в области средних частот спектра. Амплитуда акустического импульса от соударения пропорциональна импульсу силы и корню квадратному от величины зазора в трибосопряжении. Элементарной составляющей временной функции сигнала являются затухающие колебания от соударения в кинематической паре. Механизм можно рассматривать как набор гармонических осцилляторов, а акустический импульс – в виде суммы затухающих колебаний всех осцилляторов.

В докладе рассматривается совместное решение задач изменения формы деталей и зазоров в трибосопряжениях при изнашивании, изменение динамики механизма при изнашивании кинематических пар, спектрального анализа генерируемых виброакустических сигналов.

По материалам исследования опубликована работа «Диагностические модели изменения технического состояния механических систем»/ Под общ. ред. В.В.Гриба : Ч.1 – М.: МАДИ(ГТУ), 2007; Ч.2 - М.: МАДИ(ГТУ), 2008.

## ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ СОВРЕМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РАСКАТКИ ВЫСОКОТОЧНЫХ КОЛЕЦ И ОБЕЧАЕК БОЛЬШИХ ДИАМЕТРОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

С.Н. Григорьев<sup>1)</sup>, Ф.З. Утяшев<sup>2)</sup>, Р.Ю. Сухоруков<sup>3)</sup>, А.Р. Ибрагимов<sup>3)</sup>,  
Р.Р. Мулюков<sup>2)</sup>, Н.Ф. Кошавцев<sup>3)</sup>.

<sup>1)</sup> ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», Россия, Москва.

<sup>2)</sup> ИПСМ РАН, Россия, Уфа. <sup>3)</sup> ИМАШ РАН, Россия, Москва

Применяемые в авиадвигателестроении и в ряде других отраслей бесшовные кольца и обечайки диаметром до двух метров изготавливают из жаропрочных сплавов на основе Ni, Fe, Ti. Во многих отечественных предприятиях для изготовления колец и обечаек или полых валов применяют устаревшие раскатные и давяльные станы типа РМ и СРГ. Указанное оборудование не позволяет получать высокоточные кузнечные детали, свыше 90% дорогостоящего материала при их механической обработке переходит в стружку.

Зарубежные раскатные и давяльные станы фирм: «Баннинг», «Вагнер», «Лайфельд» и других, обеспечивают получение более точных осесимметричных деталей, однако лишь из относительно простых материалов, отличающихся широким диапазоном температур для горячей деформации.

Для современных сложнолегированных жаропрочных сплавов типа ЭП 742, ЭК79 необходимы сверхпластические условия деформации, которые невозможно реализовать на указанном оборудовании.

В этой связи станы для раскатки осесимметричных деталей из таких сплавов должны отличаться следующими возможностями: обеспечивать изотермические условия деформирования (800-1150°) С; сравнительно небольшие скорости деформации  $(10^{-2} - 10^{-1})\text{с}^{-1}$ ; возможностью обжата заготовок в очаге деформации с большими степенями свыше (40 - 80) %.

Желательной опцией оборудования для раскатки является наличие автономных приводов вращения и перемещения заготовок и инструмента (роликов или валков) с возможностью согласования скоростей по мере формоизменения заготовки. С целью уменьшения окисления материала, например образования  $\alpha$ -слоя в титановых сплавах, важно учесть возможность раскатки с применением защитно-технологического покрытия. Современные возможности управления процессом формообразования позволяют также обеспечить адаптивный контроль процесса, обеспечивающий получение изделий с заданной формой и размерами.

Ряд примеров возможной реализации указанных принципов в раскатном оборудовании для получения точных осесимметричных деталей, включая кольца и сложнопрофильные полые валы, приведены в работе [1].

### Список литературы:

1. О.А. Кайбышев, Ф.З. Утяшев. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов. М. Наука, 2002, с. 428
2. Валитов В.А., Р.Р. Мулюков, А.А. Назаров, Р.Ю. Сухоруков, Ф.З. Утяшев. Использование эффекта сверхпластичности для раскатки газотурбинных дисков из жаропрочных никелевых сплавов. Проблемы машиностроения и автоматизации. №3, 2013. с. 51-56

## РАЗВИТИЕ ДИСКОРАСКАТНЫХ СТАНОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ СОВРЕМЕННЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ

С.Н. Григорьев<sup>1)</sup>, Ф.З. Утяшев<sup>2)</sup>, А.А. Назаров<sup>2)</sup>, В.В. Морозов<sup>3)</sup>,  
Р.Р. Мулюков<sup>2)</sup>, Н.Ф. Кошавцев<sup>4)</sup>, Р.Ю. Сухоруков<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup> ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», Россия, Москва.

<sup>2)</sup> ИПСМ РАН, Россия, Уфа.

<sup>3)</sup> ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют»,  
филиал «НИИД», Россия, Москва.

<sup>4)</sup> ИМАШ РАН, Россия, Москва

Схема раскатки дисков приведена на рис. 1. В соответствии с ней вращающаяся в рабочей камере заготовка подвергается воздействию двух пар роликов, уменьшается в толщине и увеличивается в диаметре. Созданные для раскатки дисков по указанной схеме раскатной стан СРД 800, а также автоматическая линия АЛРД 800, имеют ряд недостатков, ограничивающих их работоспособность и снижающих качество раскатанных дисков, в частности, огрубляющих их точность.

Основные недостатки указанного оборудования связаны с системой управления станом. В основе этой системы управления были использованы две стойки ЧПУ типа H55, отличающихся недостаточной гибкостью и оперативностью управления и привода, собранные на устаревшей элементной базе с недостаточной надежностью поддержания необходимых режимов работы электродвигателей постоянного тока. Отсутствовала обратная связь, учитывающая изменения координат расположения заготовки и инструмента - роликов, вследствие тепловых и деформационных нагрузок, жесткости системы СПИД и люфтов в механических звеньях.

В настоящее время разработан стан нового поколения СРЖД 800, в котором повышена жесткость инструментальных узлов, улучшены тепловые характеристики рабочей камеры, и существенно улучшена система управления, построенная на базе компьютера – современных приводов управления электродвигателями переменного тока и обратной связи.

Введение обратной связи в виде мездос, регистрирующих компоненты сил деформации по основным координатам перемещения инструмента, позволяет достаточно четко позиционировать ролики в процессе раскатки и обеспечивает их траекторию перемещения с учетом тепловых и упругих деформаций.

Дальнейшее развитие дискораскатного оборудования возможно на базе применения электронно-оптических систем, регистрирующих размеры дисков при раскатке.

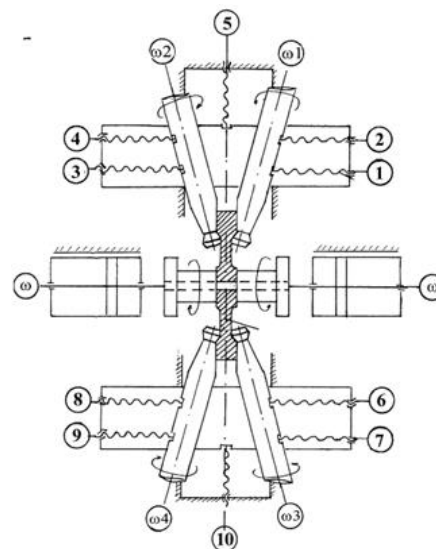


Рис. 1 Схема раскатки дисков

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОМЕХАНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОЧИХ ОРГАНОВ И СОПРЯЖЕНИЙ СТРОИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Ю.И.Густов, И.В.Воронина

ФГБОУ ВПО «МГСУ», РФ, г. Москва

В развитие трибомеханики строительной техники предлагается деформационно-топографический метод исследования контактно-износных показателей рабочих органов и сопряжений. Применительно к шероховатым поверхностям трения рассмотрены гипсоцентричная и склеробатическая модели изнашивания [1]. Установлено, что нормальная нагрузка на поверхность трения определяется выражением

$$N = K_s H_0 \cdot t_{pp} \cdot D_a B R_{\max}, \quad (1)$$

где  $K_s = H_s/H_0$  – кратная степень поверхностного упрочнения (разупрочнения);  $t_{pp}$  – относительное контурное давление при полюсном сближении  $\varepsilon_p$ ;  $D_a$  – парциальный микроизнос в пределах шероховатого слоя;  $B$  – ширина поверхности трения,  $R_{\max}$  – максимальная высота шероховатого слоя.

Полный коэффициент трения выражается зависимостью

$$f = (t_a - t_m) / (\varepsilon_m - \varepsilon_a), \quad (2)$$

где  $t_a, t_m, \varepsilon_m, \varepsilon_a$  – координаты центров тяжести парциальных микроизноса  $D_a$  и микрометалла  $D_m$ .

Показатель поверхностного трибдеформационного упрочнения (разупрочнения) равен

$$K_s = (0,618/D_m)^{D_m/D_a}, \quad (3)$$

Предельная степень упрочнения (разупрочнения) характеризуется величиной при  $K_s > 1$   $K_a = K_s [K_s^{0,5} + (K_s - 1)^{0,5}]$ ; при  $K_s < 1$   $K_a = [K_s^2 - (K_s - 1)^2]$ .

Средний прирост температуры на поверхности трения  $\Delta T_s$  и продуктов износа  $\Delta T_a$ , можно оценить по формулам:

$$\Delta T_s = \ln K_s / \lambda, \quad \Delta T_a = \ln K_a / \lambda,$$

где  $\lambda = 2,15 \cdot 10^{-3}$ ,  $1/^\circ\text{C}$  – среднее значение температурного коэффициента для металлов.

Показатели устойчивости  $P$  трибосистем принимаются на основании [2] равными [3]

$$\text{при } D_m > D_a \quad P = \ln(D_m/D_a)/\ln(1/D_m); \quad \text{при } D_m < D_a \quad P = \ln(D_a/D_m)/\ln(1/D_a).$$

Основной вывод: разработанный деформационно-топографический метод исследования трибомеханических показателей с достаточной для практического использования точностью подтвержден лабораторными, стендовыми и натурными испытаниями.

## Литература

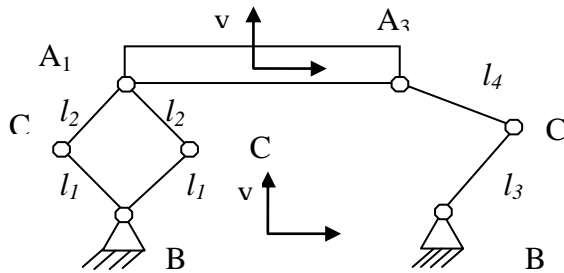
- [1] Густов Ю.И., Воронина И.В., Орехов А.А. Методология исследования трибомеханических показателей строительной техники. // Механизация строительства. 2011, №8, с. 10-12.
- [2] Коробко В.И. Золотая пропорция и проблемы гармонии систем // Изд-во АСВ стран СНГ. М., 1998. – 373с.
- [3] Густов Ю.И., Густов Д.Ю., Орехов А.А. Взаимосвязь показателей устойчивости и износа трибосистем строительной техники. // Механизация строительства. 2012, №12, с. 26-28.

# КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

С.М. Демидов, В.А. Глазунов

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

Рассмотрим плоский механизм параллельной структуры с тремя степенями свободы. Для моделирования данного манипулятора и управления им необходимо решение обратной задачи о положениях. Представим решение этой задачи.



Рабочий орган - выходное звено  $A_1A_2A_3$  имеет возможность в данном случае перемещаться только в горизонтальной плоскости  $XOY$ . Положение выходного звена описывается координатами  $X$  и  $Y$  точки  $A_0$  и углом вращения вокруг оси  $Z$ .

Задаем значения длин звеньев

$$LL_1 = B_1C_1 = B_2C_2 = A_1C_1 = A_2C_2 = 1 \quad \text{и}$$

$LL_2 = B_3C_3 = C_3A_3 = 1$ . Задаем координаты точек  $A_0, A_1, A_2$  и  $A_3$  в системе координат  $X'Y'Z'$  равными:  $(0; 0; 0), (0; -1; 0), (0; -1; 0)$  и  $(0; 1; 0)$ , а координаты точек  $B_1, B_2$  и  $B_3$  в неподвижной системе координат  $XYZ$  равными:  $(0; -1; 0), (0; -1; 0)$  и  $(0; 1; 0)$ .

Определяем обобщенные координаты  $q_i (i=1,2,3)$ , при этом углы будем отсчитывать от оси  $X$  (рис. 3.1).

Выразим координаты точек звеньев механизмов при некотором положении выходного звена (платформы). Координаты точки  $A_1$  находим через перемножение матриц:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & xp \\ 0 & 1 & 0 & yp \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} xa_i \\ ya_i \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} xab_i \\ yab_i \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Здесь  $xp$  и  $yp$  это координаты центра платформы,  $\varphi$  – угол поворота платформы. Данная матрица выражает координаты точки  $A_1$  в неподвижной системе координат.  $xa_i$  и  $ya_i$  – это координаты точки  $A_1$  в подвижной системе координат платформы.

координат платформы.

В результате перемножения матриц имеем:  $xab_i$  и  $yab_i$ . – это координаты точек в неподвижной системе

$$\begin{pmatrix} xp + xa_i \cdot \cos \varphi - ya_i \cdot \sin \varphi \\ yp + xa_i \cdot \sin \varphi + ya_i \cdot \cos \varphi \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} xab_i \\ yab_i \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

В данном случае условие связей будет следующее:

$$(LL_2)^2 = (xab_i - xc_i)^2 + (yab_i - yc_i)^2;$$

$$xc_i = xab_i + LL_1 \cdot \cos(q_i); \quad yc_i = yab_i + LL_1 \cdot \sin(q_i)$$

Используем уравнения связей, преобразовав их, можно получить следующие выражения:

$$xab_i^2 + yab_i^2 + xb_i^2 + yb_i^2 + (LL_1)^2 - 2xab_i \cdot xb_i - 2yab_i \cdot yb_i + 2LL_1 \cdot (xb_i - xab_i) \cdot \cos(q_i) + 2LL_1 \cdot (yb_i - yab_i) \cdot \sin(q_i) - (LL_2)^2 = 0.$$

Для того чтобы упростить решения квадратного уравнения произведем замену некоторых выражений:  $N_i = 2 * LL_1 * (xb_i - xab_i); Q_i = 2 * LL_1 * (yb_i - yab_i)$

$$M_i = xab_i^2 + yab_i^2 + xb_i^2 + yb_i^2 + (LL_1)^2 - 2 * xab_i * xb_i - 2 * yab_i * yb_i - (LL_2)^2;$$

$$q_{i,2} = \arccos \left( \frac{-2 * M_i * N_i \pm \sqrt{(2 * M_i * N_i)^2 - 4 * (N_i^2 + Q_i^2) * (M_i^2 - Q_i^2)}}{2 * (N_i^2 + Q_i^2)} \right)$$

Отсюда находим значения углов  $q_1, q_2, q_3$  при конкретных заданных значениях координат положения центра платформы  $A_1A_2A_3 (xp; yp)$

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ БАТАННОГО МЕХАНИЗМА ТКАЦКОГО СТАНКА СТБ-180ПН НА SIMULATIONX

А.А. Джомартов, Г. Уалиев

*Институт механики и машиноведения им. У.А. Джолдабекова, Казахстан, Алматы*

Одним из наиболее нагруженных узлов ткацких станков СТБ является батанный механизм рис.1. Он осуществляет прибор уточных нитей и непосредственно процесс формирования ткани, а также служит направляющей при движении прокладчика, с помощью которых нить прокладывается в зев.

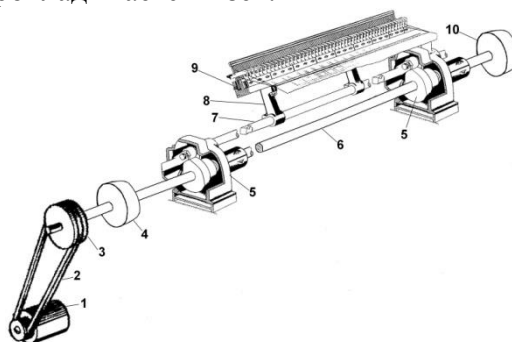


Рис. 1 Упрощенная схема батанного механизма ткацкого станка СТБ

Рассматривается динамическое моделирование батанного механизма ткацкого станка СТБ-180ПН с использованием программного комплекса SimulationX.

SimulationX – это междисциплинарный программный комплекс для моделирования физико-технических объектов и систем, который разработан и продаётся на коммерческой основе фирмой IPT GmbH из Дрездена с 2000 года.

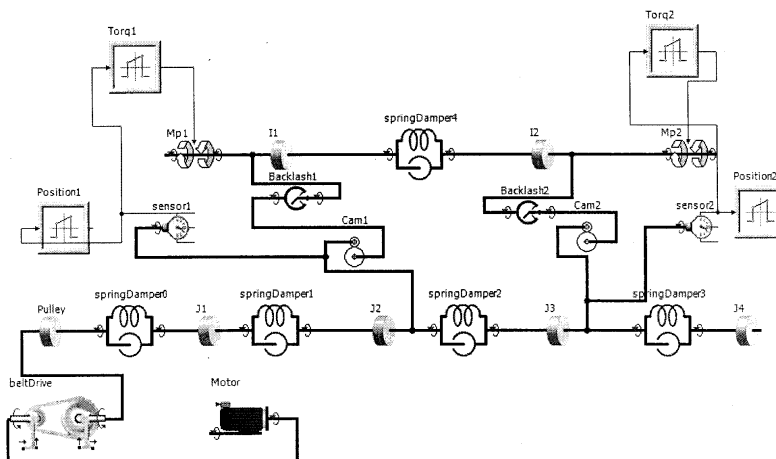


Рис. 2 Динамическая модель батанного механизма ткацкого станка СТБ-180ПН на SimulationX.

Установлено, что существенное влияние на колебания батанного механизма в момент выстоя оказывают зазоры в его узлах (кулачки, ролики, подшипники, и т.д.).

Построенная динамическая модель батанного механизма ткацкого станка СТБ на программном комплексе SimulationX, позволяет варьировать различными параметрами такими, как упругость, диссипация, величина зазоров, силы сопротивления, моменты инерций, характеристики электродвигателя и т.д.

Необходимые результаты можно получить в графическом виде и провести автоматический анализ собственных частот и форм колебаний.

# ОЦЕНКА СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ НИКОТРИРОВАННЫХ ТЕПЛОСТОЙКИХ СТАЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ СО СМАЗОЧНЫМ МАТЕРИАЛОМ

Ю.Н. Дроздов<sup>1)</sup>, П.И. Маленко<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Россия, г. Москва

<sup>2)</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тульский государственный университет», Россия, г. Тула

В процессе трения в контактирующих поверхностных слоях сталей формируются вторичные структуры, фазовый состав которых отличается от исходного и предопределяет эксплуатационные свойства пар трения [1, 2]. Структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях имеют свои особенности: изменение диаграммы изотермических превращений “температура – процентное содержание элементов” для двойных сплавов в результате смещения линий кинетических кривых превращений в сторону пониженных температур; аномально высокая скорость диффузионного переноса в направлении поверхности трения, то есть против температурного градиента. В результате в стали возникают фазы высокого давления и отмечается высокая скорость диффузии. При трении подобные явления определяются морфологией контактирующих поверхностей в виде суб- и микрошероховатостей и условиями нагружения на контакте.

Моделирование температурных процессов показало, что на площадках контакта, формирующихся на суб- и микрошероховатостях в результате приложенного давления и скорости  $V_{тр}$  возникают высокотемпературные пульсирующие поля, что говорит о существовании термических ударов, инициированных температурой трения. Динамическая реакция поверхностного слоя на термические удары состоит в возникновении термоупругих напряжений [3]. Модельные представления термического удара, основаны, в частности, на рассмотрении среды в континуальном приближении (среда предполагается сплошной) и в дискретном (среда рассматривается на уровне кристаллической решетки). В первом случае модельное представление основано на гипотезе о конечной скорости распространения теплоты в твердом теле и решении дифференциальных уравнений теплопроводности и термоупругости гиперболического типа. Во втором случае использовался потенциал парного взаимодействия, описывающий энергию связи атомов в кристаллической решетке. Высокие значения давлений  $P \leq 15$  ГПа приводят к бездиффузионным (полиморфным) превращениям в парах Fe-Fe и двойных соединениях Fe с другими элементами сплавов. Модельное представление термического удара посредством потенциала парных взаимодействий позволило оценить аномально высокие значения коэффициентов диффузии, сопоставимые с оценками импульсных воздействий другой физической природы.

Список литературы.

1. Любарский И.М., Палатник Л.С. Металлофизика трения. М.: Металлургия, 1976. – 176 с.
2. Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.
3. Карташов Э.М., Рубин А.Г. Термомеханика вязкоупругих тел на основе уравнений динамической вязкоупругости // Методы и алгоритмы параметрического анализа. М.: Изд-во МОПИ. 1995. Вып. 9. С. 24-34.

## НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ РЕЗИНОКОРДНЫХ ОБОЛОЧЕК НА ПОВЫШЕННЫХ ЧАСТОТАХ ВРАЩЕНИЯ

А.П. Евдокимов

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва*

Соединительные муфты с торообразной резинокордной оболочкой применяют во многих отраслях промышленности (транспортном машиностроении, нефтегазовой отрасли, судостроении) благодаря высоким крутильным и компенсационным свойствам. Одним из существенных недостатков такой оболочки является сравнительно низкий ресурс на повышенных частотах вращения (свыше 2500 об/мин). В результате возникновения внутренней энергии значительно возрастает температура и наблюдается расслоение резинового слоя.

В связи с этим был разработан и изготовлен опытный образец резинокордной оболочки ЭМ320×80 с внутренней структурой каркас-протектор-каркас-покровная резина (рис. 1, а). Серийная оболочка имеет структуру каркас-протектор-покровная резина (рис. 1, б).

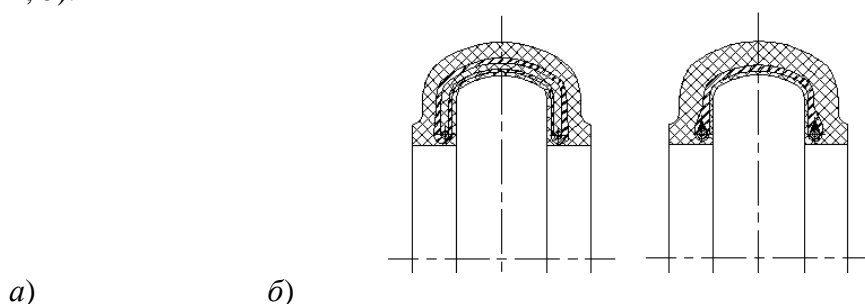


Рис. 1.

Были проведены сравнительные экспериментальные исследования (статические, динамические и усталостные) упругих муфт с серийной и опытной резинокордными оболочками. В статических испытаниях определяли значения осевой, угловой и радиальной жёсткости; динамических – осевые и радиальные силы; усталостных – долговечность резинокордных оболочек на повышенных частотах вращения.

Полученные результаты испытаний показали следующее: площади петель гистерезиса, осевые и радиальные силы на опытной оболочке были выше, чем на серийной. Исследованиями на усталость установлено, что долговечность опытной резинокордной оболочки составила  $10^6$  циклов до начала разрушения (рис. 2), в то время как на поверхности серийной оболочки дефекты возникли через  $10^4$  циклов.

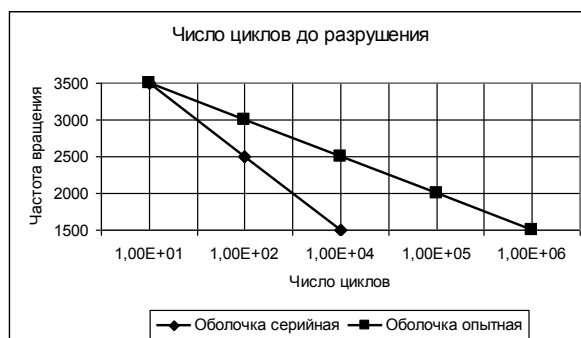


Рис. 2.



## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ТРИБОЛОГИИ

**А.Ю. Евдокимов**

*Московский государственный лингвистический университет*

Под экологическими проблемами принято понимать изменения природной среды в результате антропогенных воздействий, ведущие к нарушению структуры и функционирования экосистем. Применительно к трибологии это понятие следует рассматривать более широко, поскольку используемые в технике смазочные материалы зачастую представляют собой существенную экологическую опасность и решением проблем экологии в данном случае будет, прежде всего, предотвращение воздействия на организм человека и загрязнения окружающей природной среды.

С экологическими проблемами тесно связано понятие «экологические свойства» смазочных материалов, прочно утвердившееся в химмотологии (как правило, независимо от технических свойств). К экологическим свойствам относят токсичность (ядовитость) и канцерогенность (биологическая активность, вызывающая раковые заболевания), а также биоаккумуляцию (возможность накопления компонентов техногенного материала в живых организмах, главным образом - в крови и жировых тканях) - свойства, связанные с непосредственной опасностью для живых организмов. Некоторые показатели - взрывоопасность, стабильность состава и свойств в условиях хранения, транспортирования и применения, испаряемость, биоразлагаемость – представляют комплекс характеристик, связанных как с экологической опасностью, так и с вовлечением продукта в круговорот веществ (биоразлагаемость в окружающей среде под действием микроорганизмов).

Технические свойства представляют собой совокупность физико-химических и эксплуатационных характеристик, обеспечивающих эффективное функционирование смазочных материалов в техносфере, надежность и долговечность работы машин и механизмов.

Как следствие разнонаправленности техногенных и биосферных процессов, экологические и технические свойства также находятся между собой в противоречии (рис.1,[1]). Высокая стабильность смазочных материалов (термическая, антиокислительная, биологическая) необходима для поддержания высокого уровня технических свойств и длительной работоспособности. Напротив – ее низкий уровень говорит о хорошей вовлеченности продукта в круговорот веществ. Характеристика по одному аспекту, как правило, имеет свой антипод по другому: биоразлагаемость/биостойкость, взрывопожароопасность/негорючесть.

В ряде случаев технические свойства могут как бы «не противоречить» экологическим; например, современные смазочные материалы (в частности – моторные масла) ингибируют образование отложений в двигателях и механизмах, позитивно влияют на автомобильный выхлоп и не вызывают дезактивации каталитических дожигателей выхлопа, способствуют снижению расхода масла; хорошие триботехнические свойства способствуют уменьшению трения и износа, обеспечивая экономию энергии и снижение расхода топлива, то есть экономию природных ресурсов.

### **Литература:**

1. Евдокимов А.Ю., Фукс И.Г., Любинин И.А. Смазочные материалы в техносфере и биосфере. Экологический аспект. Киев: Атика-Н, 2012. – 292 с.

# РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Е.В. Зеньков

*ФГБОУ ВПО ИрГТУ, Россия, Иркутск*

Выполнена расчетная оценка прочности конструкции цельнокатаного железнодорожного колеса грузового вагона с учетом уточненных данных усталостных характеристик материала в условиях эксплуатационных нагрузок. Уточнение указанных характеристик осуществлялось в условиях лабораторных механических испытаний на образцах призматического типа, позволяющих моделировать напряженно-деформированное состояние (НДС) опасной зоны колеса.

Расчетная оценка ресурса работоспособности рассматриваемых колёс опирается на экспериментально определяемые усталостные характеристики (кривую усталости) материала колеса [1]. По результатам проведенного численного анализа, основанный на решении соответствующих уравнений теории упругости, НДС колеса в зоне возможного появления кольцевой трещины характеризуется соотношением компонент главных напряжений разных знаков [2], при этом значение каждого из них вносит определенное влияние на работоспособность конструкции. В этом случае требование к необходимости рассмотрения уточненной расчетной оценки ресурса колеса с учетом вида НДС подтверждает актуальность исследования.

В данной работе рассматривается образец для определения усталостных характеристик материала, находящегося в сложном НДС, аналогичном по своему виду НДС цельнокатаных колес вблизи зон их возможного усталостного разрушения. Это позволяет повысить точность соответствующей расчетной оценки ресурса. В качестве критерия подобия НДС колеса и образца для испытаний выбран коэффициент  $\Pi$ , введенный Смирновым-Аляевым [3], вычисляемый по формуле

$$\Pi = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}, \quad (1)$$

где  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  – главные напряжения, возникающие в точке наблюдения;  $\sigma_i$  – эквивалентное напряжение.

По результатам экспериментальных исследований проведен анализ выявленных закономерностей деформирования призматических образцов в условиях статических и циклических испытаний, определена взаимосвязь параметра пластичности материала и жесткости вида НДС (коэффициент  $\Pi$ ) при испытаниях на долговечность призматических образцов.

Список литературы:

1. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходные). – М.: ГосНИИВ, 1996. – 319 с.: *Пункт 7.4 Колесные пары; Приложение 9.*
2. Цвик Л.Б., Запольский Д.В., Зеньков Е.В. Математическое моделирование и расчет на прочность колес вагонов с выпуклостью диска к гребню. // *Безопасность регионов – основа устойчивого развития: Материалы третьей международной научно-практической конференции, 12-15 сентября 2012.* Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2012. – с. 83-87.
3. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность: Справочник. – М.: «Машиностроение». – 1985. – 224 с.

# ИННОВАЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

С.Д. Иванов

*ПИ(ф) МГОУ имени В.С. Черномырдина, РФ, Подольск*

В настоящее время инновационные технологии контроля и диагностики выпускаемой продукции занимают значительную долю в промышленном секторе экономики страны. Этому способствует стремительное развитие информационных оптических систем на базе современной электроники. Однако в области проведения научных исследований, к примеру, остаточного напряженного состояния исследуемых объектов с переменными свойствами, такие универсальные системы не могут быть применимы в силу отсутствия специализированных функциональных блоков, способных проводить качественную и количественную диагностику поверхностей точечного и микромасштабного характера.

Используемые в отечественной промышленности голографические и спекл-интерферометрические методы определения остаточных напряжений имеют, наряду с очевидными преимуществами, целый ряд недостатков, которые препятствуют широкому распространению этих методов. Перечислим основные проблемы внедрения оптических методов:

1. Отсутствие количественных оценок возникающих деформаций.
2. Узкий спектр применимости, связанный с большой подготовительной работой перед проведением эксперимента, в одних случаях и с малым количеством получаемой от эксперимента информации в других.
3. Нарушение сплошности исследуемых объектов. Само нарушение сплошности (высверливание) сопряжено с проблемами уменьшения точности эксперимента за счет вибрации от высверливания, что приводит к усложнению интерферометра.

С целью устранения вышеперечисленных недостатков в Подольском институте (филиале) МГОУ им. В.С. Черномырдина были разработаны инновационные методы голографической и спекл-интерферометрии на базе изготовленных интерферометров улучшенной конструкции.

Разработанные инновационные технологии диагностирования основаны на новом методе тарировки приборов наномеханики и методе голографии, использующего две длины волны. Эти методы позволили повысить точность измерений и существенно расширить функциональные возможности измерительных интерферометров. Появилась возможность осуществлять одновременное определение как нормальных, так и тангенциальных напряжений.

## МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ТРЕНИИ

З.В.Игнатъева, М.М.Хрущов<sup>1)</sup>В.А.Левченко,В.Н.Матвеевко<sup>2)</sup>

1) Институт машиноведения им. А.А.Благонравова, РАН, 2)Химический факультет МГУ им. М.И.Ломоносова

Одним из актуальных трендов современной трибологии является исследование твердых углеродных покрытий нового поколения, обладающих рядом уникальных свойств, открывающих возможности для создания принципиально новых технологий и конструкций приборов и механизмов триботехнического назначения. Обращает на себя внимание, что большинство опубликованных исследований углеродных покрытий направлено на оценку их трибологических характеристик, в то время как собственно механизм разрушения покрытий практически не исследован. В настоящей работе исследован механизм разрушения двух твердых углеродных покрытий (монокристаллического и аморфного) при испытаниях на трение по схеме «сфера-диск» в режиме граничной смазки. Исследования проводились методом оптической микроскопии на микроскопе Neofot-32 с использованием системы компьютерной обработки и моделирования оптических изображений ImageExpert 3. Показано, что разрушение покрытия в зоне дорожки трения осуществляется за счет изнашивания вершин столбчатых кристаллитов, а также за счет выламывания как отдельных кристаллитов, так и групп их, что приводит к образованию объемных дефектов сплошности покрытия. При этом для монокристаллического углеродного покрытия более характерно образование дефектов сплошности покрытия в результате выламывания отдельных столбчатых кристаллитов, которые могут служить микрорезервуарами для удерживания смазочного материала в зоне трения. В то же время при большей площади повреждения поверхности покрытия и оголения материала подложки возможно развитие процессов схватывания, т.е. нарушение нормальной работы пары трения при повышенных температурах, что и наблюдалось при трибологических испытаниях(а-С)покрытия.

**Ключевые слова:**углеродное покрытие, граничная смазка, разрушение поверхности.

## РАСЧЕТ ПОДШИПНИКОВ АВИААГРЕГАТОВ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ

Камалов Ф.Я.<sup>1</sup>, Жильников Е.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «ЕПК Самара», г.Самара, Россия, <sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет, г.Самара, Россия.

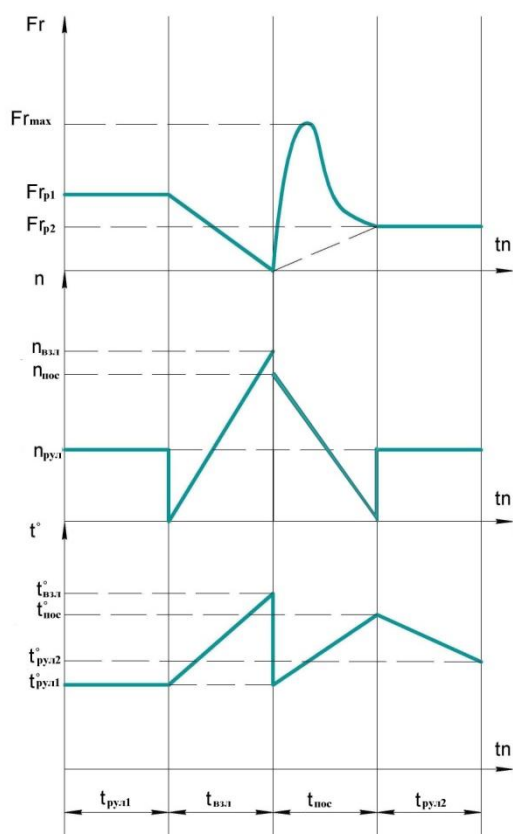


Рис. 1. График изменения характеристик режима работы: 1 – рулежка №1, 2 – взлет, 3 – посадка, 4 – рулежка №2

В конструкции различных агрегатов самолета широко используются конические подшипники. Характерной особенностью эксплуатации подшипников в большинстве авиаагрегатов являются резко выраженные переменные условия работы по циклу «рулежка – взлет – посадка - рулежка». На всех режимах действуют отличные друг от друга нагрузки и скорости вращения, и, как следствие, – различные рабочие температуры подшипника.

В настоящей работе излагается методика расчета с учетом перекашивающего момента и критических нагрузок при посадке на примере подшипников шасси самолета.

Графики изменения характеристик режимов работы (нагрузок, скоростей вращения и рабочих температур) приведены на рис. 1.

При таком подходе учитываются не только напряжения в контактах, но и перекосы роликов под действием центробежных сил и гироскопических моментов, а также температуры в контактах торцов роликов с упорным бортиком внутреннего кольца.

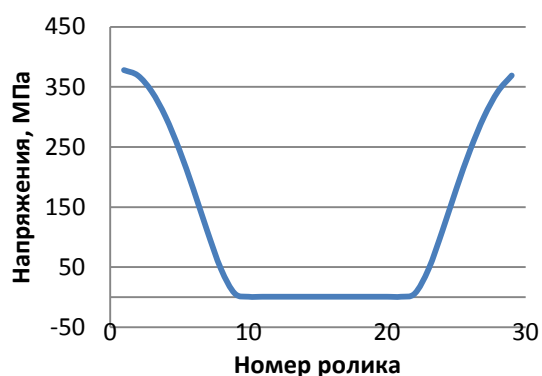
Расчёты долговечности выполняются по базовым контактным напряжениям [1].

Результаты расчётов показали, что расчётный ресурс подшипников шасси самолета в числе взлётов-посадок значительно превышает заданный техническим заданием.

Разработана методика расчёта работоспособности подшипников на критическом режиме работы с учётом повышенных нагрузок и опрокидывающего момента на колесе. Показано, что наиболее нагруженным в этом случае является подшипник с внутренней стороны

колеса. При этом напряжения в контактах роликов с беговыми дорожками колец могут достигать значений, близких к тем, которые вызывают пластические деформации. Выполнена проверка прочности упорного бортика внутреннего кольца. Выполнены расчёты напряжений изгиба основания бортика в контакте с максимально нагруженным роликом[2]. Показано, что на критическом режиме работы недостаточен запас усталостной прочности бортика.

На рис. 2 представлен график распределения напряжения изгиба у основания упорного бортика внутреннего кольца.



*Рис. 2. Распределение напряжения изгиба у основания упорного бортика внутреннего кольца.*

На основе изложенной методики разработана компьютерная программа, предназначенная для расчета долговечности подшипников шасси самолета с учетом режимов эксплуатации и особенностей каждого из этих режимов, а также расчета прочностных характеристик подшипника при экстремальных условиях эксплуатации.

Разработанная методика и компьютерная программа могут быть использованы для анализа работы и разработки рекомендаций по повышению ресурса конических подшипников шасси самолета.

#### Литература

1. Балякин В.Б., Жильников Е.П., Самсонов В.Н., Макаручук В.В. Теория и проектирование опор роторов авиационных ГТД. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 254 с., ил.
2. Расчет на прочность деталей машин: Справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – 3-е изд. – М: Машиностроение, 1979. – 702 с., ил.

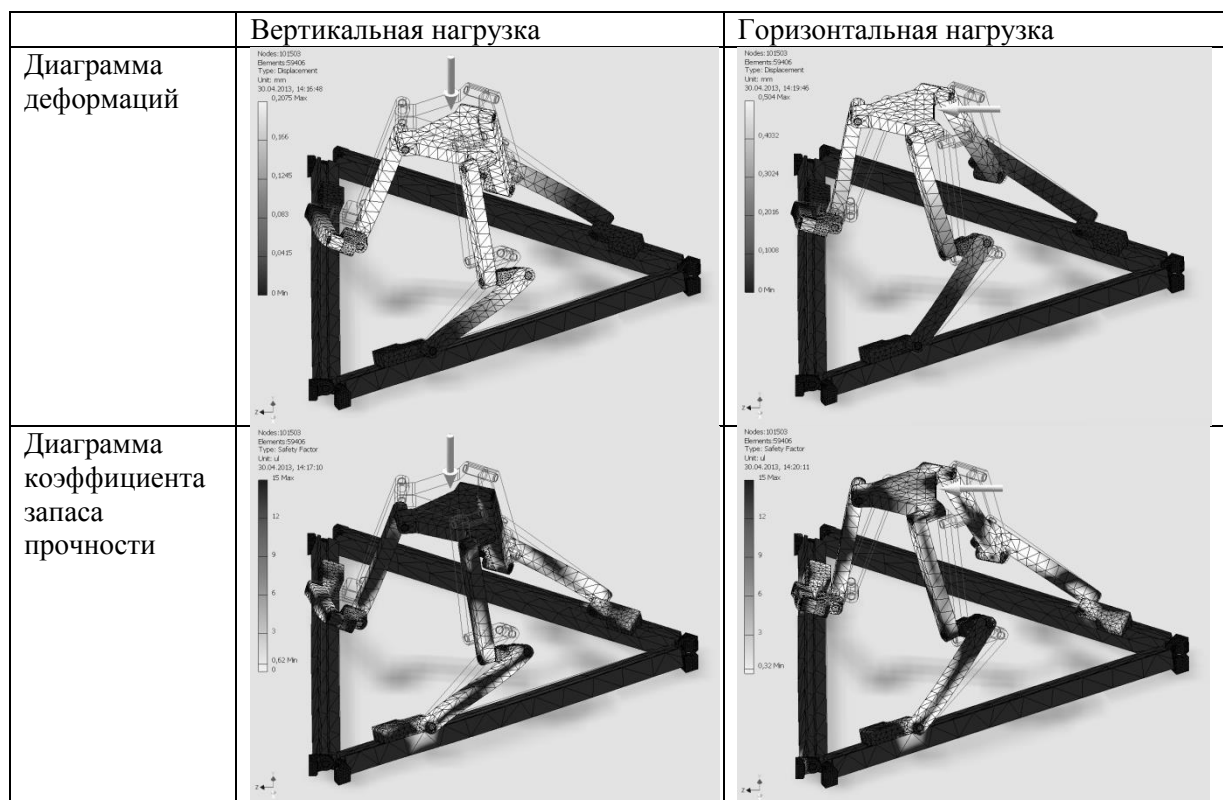
# АНАЛИЗ ЖЕСТКОСТИ МАНИПУЛЯТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.В. Козырев, В.А. Глазунов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Россия, Москва*

Весьма актуальной задачей является анализ характеристик жесткости механических конструкций и механизмов. Выполнение подобного анализа на этапе конструирования позволяет определить наиболее оптимальный вариант конструкции, как по жесткости, так и по расходу материала. Современным методом анализа напряжений является метод конечных элементов, и при использовании вычислительной техники, способной обработать сложные модели, результаты его работы являются весьма качественными и достоверными. Чаще всего метод конечных элементов применяется для анализа напряжений и деформаций отдельных деталей, подверженных нагружению, однако в этой работе было рассмотрено его применение для исследования манипулятора параллельной структуры в собранном состоянии.

Было рассмотрено 2 случая нагружения: вертикальной силой и горизонтальной силой. Результаты анализа представлены в виде диаграмм деформации и коэффициента запаса прочности.



В итоге, можно сделать вывод о том, что использование метода конечных элементов для анализа параметров жесткости механизмов при различных вариантах нагружения позволяет определить наиболее и наименее напряженные участки в элементах механизма и внести в его конструкцию соответствующие изменения, такие как усиление звеньев, либо, наоборот, удаление излишнего материала.

## ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ Р6М5

А.В. Кондрашина

*МГОУ имени В.С. Черномырдина, РФ, Москва*

Сведения о характере разрушения многофазных материалов в оптимальных температурно-скоростных условиях сверхпластической деформации и при изменении этих условий, о влиянии на разрушение дисперсности и соотношения структурных составляющих ограничены. Отмечается, что разрушение начинается с образования пор на тех межфазных границах, где проскальзывание наиболее заметно.

Многие эксперименты, например на одноосное растяжение, показали, что разрушению материала предшествует образование и развитие межзеренных и межфазовых пор. Установлено, что образование пор при сверхпластической деформации под действием растягивающих напряжений характерно почти для всех сверхпластичных материалов. Наиболее вероятным местом зарождения пор являются границы зерен и фаз и особенно места тройных стыков. Известно, что в многофазном материале поры обычно появляются около крупных включений вследствие концентрации напряжений при блокировании этими включениями зернограницного скольжения [1, 2]. Установлено также, что чем меньше способность материала к порообразованию в различных температурно-механических условиях, тем больше его относительное удлинение при деформировании, что характерно для условий сверхпластической деформации стали Р6М5.

Для определения особенностей порообразования и разрушения стали Р6М5 при растяжении в различных температурно-скоростных условиях исследовали зону разрыва образцов в сечениях, проходящих через ось растяжения. Результаты количественной оценки участков разрушения показывают, что при растяжении в условиях сверхпластической деформации процесс порообразования выражен менее сильно, чем при повышенной пластичности, объемная доля пор ниже, размер (средний и максимальный) их меньше, они менее вытянуты в направлении растяжения, ниже показатель формы [3]. Так, площадь участка пор составляет  $0,065 \pm 0,008$  мм<sup>2</sup>, их объемная доля  $5,0 \pm 0,7$  %, максимальный диаметр  $20,0 \pm 2,9$  мкм (средний диаметр  $15,0 \pm 1,5$  мкм), показатель формы пор  $2,8 \pm 0,35$ .

При деформации в условиях сверхпластичности и повышенной пластичности на образцах стали Р6М5 образуется шейка. При этом деформация локализуется на межфазных поверхностях раздела, что приводит к более глубоким повреждениям – образованию укрупненных пор и трещин вблизи поверхности разрушения. Исследование особенностей разрушения стали Р6М5 показывает, что зона повреждений порами сосредоточена у оси образца. Это может быть причиной локализации деформации и снижения пластичности материала.

### Список литературы

1. Гуляев А.В. Сверхпластичность стали. – М.: Металлургия, 1982, 56с.
2. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984, 264с.
3. Кондрашина А.В., Кузовлева О.В., Гвоздев А.Е. Деформация, структурообразование и разрушение стали Р6М5. – Деформация и разрушение материалов. №8, 2007, с.11-16.



## ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ПЛОСКОМ ВОЛНОВОМ ГЕНЕРАТОРЕ ПРОТОЧНОГО ТИПА

**В.И. Кормилицын, О.В. Шмырков, Н.Б. Юшков**

*Филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН, Российская Федерация, Москва*

Приготовление тонких, однородных, стабильных эмульсий и суспензий является актуальной проблемой, остро стоящей на сегодняшний день во множестве отраслей промышленности: нефтяного комплекса, теплоэнергетики, химической промышленности, машиностроения, агропромышленного комплекса, строительства, экологии и пищевой промышленности. Существующие методы либо не обеспечивают необходимой дисперсности получаемого продукта, либо отличаются высоким энергопотреблением при низкой производительности. На сегодняшний день перспективными устройствами для получения тонкодисперсных однородных высокостабильных эмульсий признаны смесительные генераторы, реализующие кавитационные явления. Важную роль в волновой технологии, базирующейся на возбуждении нелинейных колебаний в многофазных средах, играют гидродинамические генераторы проточного типа, в плоских профилированных каналах которых установлены тела обтекания различной геометрии. В этих генераторах для возбуждения мощных колебаний и волн в обрабатываемых средах используются вихревые, высокотурбулентные отрывные потоки, а также обширные области кавитации.

В ходе проведенных экспериментальных исследований было установлено:

- В плоском профилированном канале волнового генератора проточного типа при числах  $Re \geq 10^3$  за телами обтекания: цилиндр, цилиндр с насечкой, пластина, серп, стакан возникают обширные области кавитации со следами эрозии на стенках генератора. Наибольшая интенсивность кавитации, определяемая по величине уноса материала, реализуется в генераторе с телами обтекания: цилиндр с насечкой и пластина;
- За первым рядом тел обтекания на определенных частотах колебания давления возникают характерные пики давления. Зависимость частоты возникновения этих пиков от числа  $Re$  носит линейный характер и выражается соотношением  $n = 0.0068 \cdot Re$ ;
- Добавление в воду на входе в генератор 5% индустриального масла при наличии кавитации приводит к образованию тонкодисперсной эмульсии с размером частиц до 20 мкм, причем, половину из них составляют частицы масла размером менее 5 мкм;
- Нанесения лунок на поверхность рабочего канала совместно с насечкой на поверхности тела обтекания существенно повышают качество получаемой эмульсии. При этом наибольшая эффективность смешения в плоском генераторе достигается при установке только одного ряда тел в виде одиночного цилиндра;
- Увеличение вязкости добавочной компоненты и наличия кавитации при создании водомасляной эмульсии приводит к увеличению концентрации более мелких капель, значение которой достигает 88% и 96% для капель меньше 3 мкм и 5 мкм, соответственно.

## ОСОБЕННОСТИ ИЗНОСА КАНАЛОВ СТВОЛОВ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ ПРИ СТРЕЛЬБЕ ОДИНОЧНЫМИ ВЫСТРЕЛАМИ

**В.М. Королев**

*Филиал ОАО «КБприборостроения» - «ЦКИБ СОО» Россия, Тула*

Согласно сложившимся более чем за 100 лет теориям износа каналов стволов огнестрельного оружия основной причиной износа является термическое, газодинамическое и химическое воздействие пороховых газов, при этом практически не принимается во внимание взаимодействие пули с каналом ствола. Однако исследования износа канала ствола снайперского оружия свидетельствуют о значительном влиянии пули на износ [1].

Конструктивно снайперская пуля состоит из биметаллической оболочки (основа – сталь, покрытие - латунь) и свинцового сердечника. При движении пули в канале ствола происходит расплавление приповерхностного слоя латуни, омеднение поверхности канала и утонение латунного покрытия. В результате трение пули о канал ствола переходит в режим пленочного голодания [2] с образованием оголенных до стали участков, на которых происходит схватывание; трение приобретает нестационарный характер. Затем оголение приобретает лавинообразный характер, переходя к трению, стали о сталь. Именно этим можно объяснить увеличение износа к дульной части ствола.

При выстреле пуля деформируется в канале, не заполняя при этом полностью профиль канала: по углам нарезов образуется зазоры, через которые происходит прорыв газов, расплавляя при этом приповерхностный слой канала. На поверхности раздела возникают волны, фронтальная скорость перемещения которых вдоль по потоку возрастает по мере увеличения их высоты. При малой глубине слоя жидкого металла происходит возрастание крутизны фронта волн. Вследствие этого происходит перемещение жидкого металла и срыв потока с гребня волны, что приводит к износу по углам нарезов и, соответственно, к увеличению зазоров.

### Литература.

1. Зеленко В.К., Королев В.М. Ресурс и износ канала ствола снайперского оружия. Тула: Издательство ТулГУ, 2011, 91с.
2. Крагельский И.В., Гитис Н.В. Фрикционные автоколебания. М.: Наука, 1987, 183 с.

## ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ АРМИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Краснов А.П.<sup>1</sup>, Буяев Д.И.<sup>2</sup>, Юдин А.С.<sup>1</sup>, Афоничева О.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>- ИнЭОС им. А.Н. Несмеянова РАН, Москва, Россия, <sup>2</sup>-ООО ОВИНИТ, Мытищи, Московская обл., Россия;

В последние годы окончательно сформировалось и приобрело значительный опыт применения новое направление материалов практической трибологии, представляющих собой антифрикционные органопласты.

Современные износостойкие органопласты (органопластики) представляют собой антифрикционные композиционные материалы, основными компонентами которых являются полимерная матрица и термостойкие армирующие структурно-организованные органические волокна. Несмотря на часто используемый термин *антифрикционные органопласты* (органопластики) в специализированной литературе, справочниках и энциклопедиях, официального определения в стандартах не приводится, и первое определение дается в подготовленной к печати энциклопедии.

Теоретические основы создания современных материалов этого типа на основе термостойких полиоксадиазольных волокон были заложены еще в 80-ые годы [1] и резко ускоренное практическое применение получили с начала XXI века.

В докладе приведены результаты систематического исследования антифрикционных органопластов на основе термостойких поли-*n*-фениленоксадиазольных (ПОД) волокнистых наполнителей и фенолоформальдегидной матрицы. Показано, что при прочих равных условиях в антифрикционных органопластах, наполненных волокнами различной структуры (ткани, нити, нетканые материалы и т.д.), формирование поверхности трения зависит от типа пространственного расположения армирующего наполнителя.

Среди используемых компонентов ПКМ, фенолоформальдегидные связующие являются наиболее трибохимически активными и под влиянием нагрузочно – скоростного фактора подвергаются деструктивно-структурирующим превращениям, со сложными процессами перестройки и образованием более трибохимически устойчивых структур. Таким образом, химическое строение и трибохимические процессы в полимерном связующем имеют основополагающее значение в формировании трибологических свойств ПКМ. Потенциальный резерв термостойкости при разработке композитов на основе фенолоформальдегидных полимеров и полиоксадиазольных волокон весьма значителен и ПКМ могут использоваться до 300°C, а в критических ситуациях и выше.

Антифрикционные композиты, способные работать при высоких нагрузках (до 40 МПа) и скоростях скольжения, как правило, разрабатываются на базе дорогостоящих компонентов (напр. полиимидных или углеродных волокон), недоступных для массового применения. В представляемом докладе рассмотрены примеры широкого внедрения в различных областях машиностроения антифрикционных органопластов, матрица и армирующий наполнитель которых изготовлены из общедоступных полимеров.

1. Коршак В.В., Грибова И. А., Краснов А. П., Мамацашвили Г. В, Т. К. Джашиашвили, Б. С. Лиознов, Термофрикционные свойства армированных систем на основе тканей из полигетероариленов. «Трение и Износ», ноябрь-декабрь, том V, №6, ст. 965-971. 1984 г.

# МОДЕЛИ ВИБРОПЕРЕДАЧИ И ФИЛЬТРАЦИИ СИЛЬНО НЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

**В.Л. Крупенин**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Россия, Москва*

Виброударные процессы, генерируемые машинами и другими техническими объектами, являются важнейшим фактором, ответственным за повышение их виброактивности. Создание технологических машин и высокоскоростных транспортных средств, форсированных по мощностям, нагрузкам и др. приводит к увеличению интенсивности и расширению спектра вибрационных и виброакустических полей. Этому способствует также широкое использование в промышленности и строительстве высокоэффективных вибрационных и виброударных процессов. Вредная вибрация нарушает планируемые конструктором законы движения машин, механизмов и систем управления, порождает неустойчивость процессов и может вызвать отказы и полную расстройку всей системы. Из-за вибрации увеличиваются динамические нагрузки в элементах конструкций, стыках и сопряжениях, снижается несущая способность деталей, инициируются трещины, возникают усталостные разрушения, повышаются энергозатраты технических объектов на производствах, транспорте и т. д. Вибрация оказывает и непосредственное пагубное влияние на человека, снижая его функциональные возможности и работоспособность, вызывая профессиональные заболевания. Поэтому особое значение приобретают методы и средства уменьшения вибрации. Эффективное проектирование машин и конструкций представляется весьма важным аспектом деятельности конструкторов. Хорошо спроектированная машина требует минимум специальных дополнительных средств борьбы с вибрацией и, в частности, виброударными процессами. Поэтому крайне важно уметь использовать разнообразные динамические эффекты, позволяющие «встроить» на еще стадии проектирования динамические средства борьбы с вредной вибрацией. Наряду с другими, среди таких эффектов важное место занимает фильтрация. Под фильтрацией будем понимать преобразование спектра вибрации, приводящее к его обогащению, обеднению или другим типам преобразования в заданных частотных полосах.

Динамические эффекты, связанные с механической фильтрацией вибрационных процессов весьма многогранны. Основываясь на них, можно предложить нетривиальные принципы проектирования механизмов и устройств, позволяющих, в частности, обеспечить необходимое преобразование спектра вибрации, а также обеспечить подавление нежелательных составляющих процессов. Данная работа посвящена именно этой проблематике. Заметим при этом, что мы не будем претендовать на то, чтобы предложить какую-либо классификацию видов фильтрации и фильтров, так как это может оказаться совершенно самостоятельной проблемой. Отметим, что в основном нас будет интересовать фильтрация виброударных процессов или даже фильтрация, осуществляемая при посредстве виброударных процессов.

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №№ 13-08-01235, 13-08-90419).*

## ИМАШ РАН И СТАНОВЛЕНИЕ ТЕОРИИ ВИБРОУДАРНЫХ СИСТЕМ

**В.Л. Крупенин**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Россия, Москва*

Теория виброударных систем в настоящее время стала важным отделом теории нелинейных колебаний и волн. Эта теория «встала» на ноги в стенах Института машиноведения. Здесь были продолжены первоначальные исследования Русакова и Харкевича и здесь же были решены первые теоретические задачи, поставлены первые основополагающие эксперименты, решены практически значимые задачи. При этом весьма важным оказывается реальная востребованность теории при проведении инженерного анализа сложных машиностроительных конструкций, а также научно обоснованного проектирования многих типов машин, механизмов и аппаратуры.

Первоначальные модели виброударных систем – шарики, соударяющиеся между собой или с фиксированными абсолютно жесткими ограничителями и т.д. Гипотеза удара – ньютоновская. Метод анализа – метод припасовывания (точечных отображений). С помощью этих представлений. Были получены первые принципиально важные описания систем. Основоположники этого направления А.Е. Кобринский и Р.Я. Брунштейн.

Дальнейший шаг был сделан, благодаря В.К. Асташеву, В. И. Бабицкому, М.Е. Герцу и М.З. Коловскому, применившим приближенные методы эквивалентной линеаризации, и позволившие распространить теорию на распределенные системы, а также на случай присутствия нелинейных между соударениями сил. Так была создана теория авторезонансных вибромашин и решены другие практически значимые проблемы. Параллельно с теоретическими работами были поставлены основополагающие эксперименты. В 1976 году В.И. Бабицкий и М.З. Коловский предложили для исследования виброударных систем методы частотно-временного анализа, основанные на аппроксимации искомым законам движения так называемыми периодическими функциями Грина. В дальнейшем указанные методы по большей части связаны с автором данного доклада. (В том же 1976 году В.Ф. Журавлевым был предложен другой эффективный метод – негладких преобразований).

Для дальнейшего развития теории при усложнении потребных расчетов приходится отказываться от предположений о малом числе степеней свободы систем и простых видов ограничителей хода, с которыми соударяются элементы изучаемых конструкций. Наконец, пришлось отказаться от классических представлений об ударе и ввести в рассмотрение так называемые распределенные ударные элементы (В.К. Асташев, В.Л. Крупенин, А.М. Веприк). Эти объекты изучаются как в коротковолновом (большое число классических ударных пар), так и в длинноволновом приближениях. При построении новых моделей, расширение понятия ударной пары проводится путем усложнения гипотез, регламентирующих свойства моделей соударяющихся тел - отказ от моделирования ударников материальными точками; увеличение числа степеней свободы соударяющихся тел; рассмотрением ограничителей хода с нетривиальной топологией, введением усложненных моделей контактного взаимодействия и др. Одним из наиболее важных центров общей теории может оказаться также и отказ от предположения об одномерности волн, генерируемых ударами.

***Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №№ 13-08-01235, 13-08-90419).***

# О ВЛИЯНИИ ВРЕМЕНИ ДИФфуЗИОННОГО НАСЫЩЕНИЯ ПРИ БОРИРОВАНИИ НА ИЗМЕНЕНИЕ РАЗМЕРОВ ОБРАЗЦОВ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Л.А. Куркина

*Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Россия, Улан-Удэ*

Долговечность и работоспособность ответственных деталей во многом определяется физико-механическим состоянием, структурой и свойствами поверхностных слоев. Методы химико-термической обработки (ХТО) позволяют получать практически весь спектр известных на сегодняшний день покрытий, позволяющих повысить эксплуатационные характеристики и срок службы деталей машин и инструмента за счет поверхностного упрочнения [1,4].

Однако более широкое внедрение данных методов при изготовлении ответственных деталей машин и инструмента сдерживается необходимостью дополнительной финишной обработки для достижения требуемой точности и качества поверхности детали. Достижение требуемых значений размерной точности после различных видов ХТО, учитывая незначительную величину диффузионного слоя в сочетании с высокими физико-механическими свойствами и проблематичность использования абразивной обработки, представляется весьма актуальной задачей, требующей более тщательного изучения.

В связи с этим в данной работе исследовалось влияние времени диффузионного насыщения на изменение размеров борированных образцов из стали 45 [2,3].

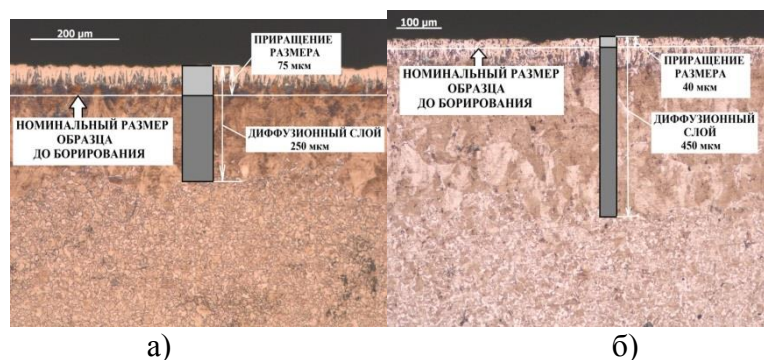


Рисунок 3 – Микроструктуры борированных образцов из стали 45:  
а) – время выдержки 90 мин; б) – время выдержки 150 мин.

1. Гурьев А.М., Лыгденов Б.Д., Попова Н.А., Козлов Э.В. Физические основы химико-термоциклической обработки сталей. Барнаул.: Изд-во АлтГТУ, 2008. 250 с.
2. Куркина Л.А., Хараев Ю.П., Грешилов А.Д., Федотов Н.И., Бутуханов В.А. Исследование изменения размеров образцов из стали 5ХНМ после борирования // Обработка металлов. 2012. С. 62-65.
3. Куркина Л.А., Хараев Ю.П., Грешилов А.Д., Федотов Н.И., Бутуханов В.А. Влияние борирования на размерную точность образцов из штамповой стали // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2012. №2. С. 255-257.
4. Лыгденов Б.Д., Гурьев А.М., Гармаева И.А. Влияние режимов борирования на упрочнение поверхности уплотнительного кольца из стали 40ХН2МА // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2007. т.4. №2. С. 90-93.

# ПОВЫШЕНИЕ ФРЕТТИНГОСТОЙКОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ И ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ ФРМИРОВАНИЕМ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

Л.Н. Лесневский, С.В. Иванова<sup>1)</sup>, М.А. Ляховецкий

*Московский авиационный институт НИУ МАИ, Россия, Москва*

*<sup>1)</sup>Институт промышленных ядерных технологий НИЯУ МИФИ, Россия, Москва*

Стремление к увеличению КПД и мощности двигателей и энергетических установок как аэрокосмического, так и наземного применения тесно связано с ужесточением условий эксплуатации их элементов, изготавливаемых из алюминиевых и циркониевых сплавов, особенно работающих в разнообразных узлах трения. Ресурс и надёжность таких элементов во многом определяются их стойкостью к механическому износу, и в том числе к износу в условиях малых колебательных относительных перемещений – фреттинг-износу. Так, для авиационных газотурбинных двигателей и наземных газотурбинных газоперекачивающих установок характерно наличие определённого числа изготовленных из алюминиевых сплавов агрегатов, деталей авиационных приборов, трубопроводов, резьбовых соединений, соединений с натягом, где протекают и развиваются процессы фреттинг-износа. Для ядерных энергоустановок, и в частности, легководных реакторов типа ВВЭР, также характерны подобные процессы в области контактов циркониевых трубок тепловыделяющих сборок с дистанцирующими решётками. В непростых условиях воздействия термохимической среды, давления и температуры происходят повреждения поверхностей контактирующих элементов вследствие фреттинг-износа, ослабевают посадки с натягом, возрастают вибрации. Одним из направлений снижения и предупреждения фреттинг-износа в этих случаях является нанесение на рабочие поверхности контактных пар трения защитных покрытий с использованием метода микродугового оксидирования (МДО).

В работе на основе анализа различных методов защиты алюминиевых и циркониевых сплавов от износа в условиях фреттинга, показаны преимущества (в основном по сравнению с методами вакуумных ионно-плазменных технологий) метода МДО [1]. Рассмотрены механизм и физико-химические принципы плазменного электролиза этих сплавов, на основе анализа формовочных кривых процесса МДО показано, что этот процесс характеризуется такими разнородными явлениями, как свечение (люминисценция), коронный разряд, искровой и дуговой разряды, и дано их физическое описание.

Показано, что использование автоматизированной установки микродугового оксидирования с применением методов планирования эксперимента, позволяют обеспечить повторяемость результатов и определение как оптимальных значений параметров энергоэффективности МДО процесса, так и значений эксплуатационных характеристик получаемых покрытий. С управлением электрическими режимными параметрами процесса, такими как разрядные токи  $I_a, I_c$ , напряжения  $U_a, U_c$  и ёмкости  $C$ , временем протекания процесса, температурой и составом электролитов были получены покрытия с разным фазовым и химическим составом.

Сравнительные испытания износостойкости покрытий на разных по конструкции и уровню нагрузок установках по определению фреттинг-износа, проведённых при варьировании нормальной нагрузкой, частотой и амплитудой и количеством циклов позволили построить зависимости величин износа от режимов нагружения. Показано значительное влияние состава электролита на уменьшение скорости износа образцов с покрытиями. Повышение фреттингостойкости образцов с покрытиями позволяет сделать вывод о перспективности предложенного и исследованного метода МДО для защиты алюминиевых и циркониевых сплавов для заданных условий эксплуатации.

## Литература:

1. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Микродуговое оксидирование. Теория, технология, оборудование. –М.: ЭКОМЕТ, 2005. 368 с.

## **СОЗДАНИЕ МНОГОЧАСТОТНЫХ ГАСИТЕЛЕЙ КОЛЕБАНИЙ НА КОМПЛЕКСЕ «ABAQUS»**

**Макаров С.Б., Панкова Н.В., Перминов М.Д.**

Рассматриваются защищаемые конструкции и динамические гасители колебаний в виде упругих тел со многими степенями свободы.

Настройка гасителей относительно основных конструкций осуществляется в пространстве нормальных координат, т.е. физические параметры гасителей выбираются в результате сравнительного анализа модальных параметров защищаемых конструкций и гасителей.

Актуальность постановки таких задач возрастает в связи со значительным ростом техногенного воздействия и участвовавшими природными катаклизмами.

На пространственных модельных задачах, решаемых на комплексе ABAQUS, показан эффект снижения динамического отклика виброактивных зон защищаемых объектов на кинематическое (сейсмическое) и силовое (ветровое, техногенное) пространственные возбуждения.



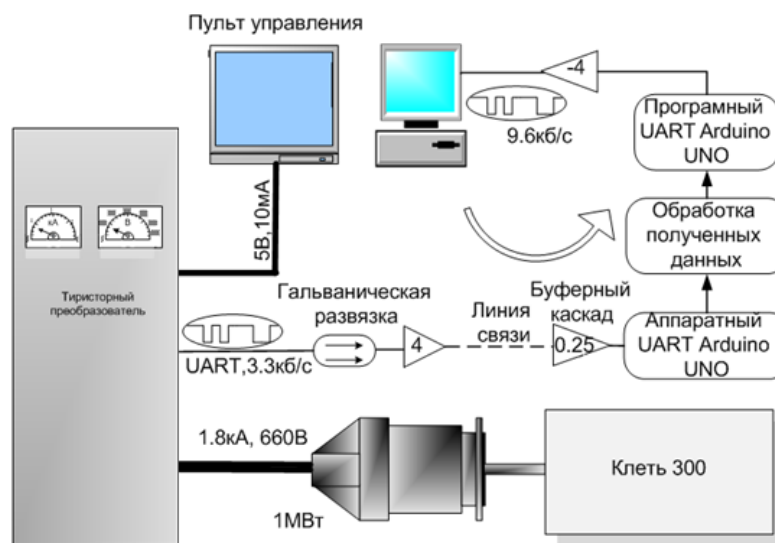
# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ ТРЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ МЕТАЛЛОВ

С.И. Малафеев, А.А. Малафеева, В.И. Коношин

*ООО Компания «Объединенная Энергия», Россия, г. Москва*

В процессе прокатки происходит сложное взаимодействие металла и валков рабочих клетей. Возникающие силы трения оказывают существенное влияние на все основные кинематические и силовые параметры. При этом практический интерес представляет регистрации сил трения, возникающих при прокатке, в реальном времени.

В работе представлены методика и результаты экспериментального исследования и моделирования удельных сил трения, возникающих при прокатке нихрома, на стане 300 Владимирского завода прецизионных сплавов. Схема экспериментальных исследований показана на рисунке.



Момент прокатки при пластической деформацией металла вычисляется по формуле

$$\frac{dM_{\text{пр}}}{dt} = f_{\text{тр}} \cdot b \cdot R^2 \cdot \Omega,$$

где  $M_{\text{пр}}$  - момент прокатки,  $f_{\text{тр}}$  - удельная сила трения,  $b$  - ширина полосы,  $R$  - радиус валков,  $\Omega$  - угловая скорость двигателя. Момент нагрузки  $M$  на валу приводного двигателя, складывается из момента прокатки  $M_{\text{пр}}$ , вызванного пластической деформацией проката, и моментом нагрузки при холостом ходе  $M_{\text{хх}}(\Omega)$ :

$$\begin{cases} M = c \cdot I = M_{\text{хх}}(\Omega) + M_{\text{пр}}; \\ \Omega = \frac{U - Ir}{c}, \end{cases}$$

где  $I$  - ток приводного двигателя;  $U$  - напряжение на якорной обмотке двигателя;  $r$  - активное сопротивление якорной обмотки;  $c$  - конструктивная постоянная двигателя.

В работе представлены экспериментальные результаты исследования сил трения при различных условиях прокатки и характеристиках материалов.

# КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

С.И. Малафеев<sup>1)</sup>, А.И. Копейкин<sup>2)</sup>, Ю.В. Тихонов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>ООО Компания «Объединенная Энергия», Россия, г. Москва

<sup>2)</sup>Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Россия, г. Владимир

В работе рассматривается методика, технические и программные средства для идентификации характеристик пар трения в динамических режимах с использованием электромеханических колебательных систем (ЭМС) с управляемой электрической пружиной.

Колебательная ЭМС содержит синхронную электрическую машину переменного тока с активным ротором и систему управления, которая включает регулируемые генератор переменного тока и источник постоянного тока, а также корректирующие блоки. Одна из обмоток статора электрической машины подключена к выходу регулируемого источника постоянного тока, другая – к выходу усилителя гармонических колебаний, регулируемых задающим устройством. При таком включении обмоток образуется знакопеременный момент на валу ротора, вызывающий его колебательное движение.

Компьютерная экспериментальная установка предназначена для измерения, регистрации и обработки колебаний в электрической и механической подсистемах приводов. В качестве устройства регистрации данных используется многоканальный аналого-цифровой преобразователь. Установка позволяет измерять амплитуды тока и напряжения с погрешностью не более 0,5%. Угол поворота фиксируется с помощью цифрового энкодера, при этом ошибка не превышает 0,1град, при амплитуде колебаний ротора не более  $360^{\circ}$ . Погрешность измерения фазового сдвига и частоты для всех сигналов не превышает 0,5%. Разложение сигналов в гармонический ряд осуществляется по алгоритму Левенберга-Марквардта.

Компьютерная система позволяет выполнить регистрацию процессов изменения напряжения, тока, угловой скорости и угла поворота ротора, и обработку данных, в том числе, выполнить спектральный анализ, рассчитать фазовые сдвиги, угловые ускорения, энергетические характеристики и др. Измерение электрических переменных и механических характеристик колебательного движения обеспечивает:

- определение уточненной диссипативной характеристики пар трения;
- уточнения коэффициентов трения как функции скорости скольжения (качения), давления, температуры, материалов, типа смазки, условий эксплуатации и др.;
- получения сравнимых коэффициентов трения геометрически подобных механизмов и подшипниковых узлов;
- получения уточненных значений моментов трения, коэффициентов потерь и КПД типизированных механизмов и подшипниковых узлов;
- уточнения моментов инерции твердых тел различной геометрической формы и однородности, а также собранных узлов, механизмов, готовых изделий, например, электрических двигателей, и приводных систем в целом без разборки;
- определение с помощью метода «энергетических потоков» с последующей экспериментальной проверкой эффективного диссипативного коэффициента, используемого при исследовании и моделировании приводных систем, и получения зависимостей диссипативного коэффициента от различных внешних и внутренних факторов.

## **О НЕКОТОРЫХ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМАХ ПРИ СОЗДАНИИ СИСТЕМЫ КРЕПЛЕНИЯ И РАЗВЕРТЫВАНИЯ БОРТОВОГО МАНИПУЛЯТОРА ОК «БУРАН»**

**М.И. Маленков**

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
Россия, Санкт-Петербург

Система крепления и разворачивания бортовых манипуляторов (СКР БМ) предназначена для механического и электрического сопряжения бортовых манипуляторов с несущей конструкцией планера орбитального корабля (ОК) «Буран», информационными и управляющими системами корабля при стартовой наземной отработке, во время меж полетного обслуживания и на всех этапах его полета. В отличие от манипулятора, механизмов системы раскрытия створок отсека полезного груза, СКР БМ должна была выполнять свои функции при наземных операциях без разгрузки собственных звеньев и перемещаемого груза.

Первоначально предполагалась установка двух манипуляторов и, соответственно, двух идентичных независимых СКР БМ вдоль левого и правого бортов. Для первого полета второго летного образца ОК «Буран» была принята схема с одним манипулятором на правом борту.

В состав поставки СКР БМ входили комплект опор, включающий корневой узел, три ложементов и три бандажа ; блок управления (БУ); бортовая кабельная сеть (БКС) и контрольно-проверочная аппаратура (КПА) для наземной отработки. Суммарная полетная масса опор составляла 90 кг, БУ – 10 кг, БКС – 19 кг, что полностью соответствовало требованиям ТЗ.

Корневой узел предназначен для неразъемного механического соединения плечевого звена манипулятора с бимсом планера и прокладки транзитного кабеля. Три идентичных ложементов предназначены для фиксации бандажей, связанных с плечевым, локтевым и кистевым звеньями манипулятора в транспортировочном положении. Для этого ложементы снабжены уловителями ручек бандажей и механизмами фиксации.

Все четыре опоры снабжены идентичными механизмами поворота, обеспечивающими разворачивание манипулятора на орбите. Для этого опоры синхронно поворачиваются на угол 45°, перемещая манипулятор за пределы фюзеляжа. Затем механизмы фиксации ложементов одновременно разворачивают крюки механизмов фиксации, освобождая ручки бандажей и позволяя звеньям манипулятора перемещаться под действием собственных приводов для выполнения грузовых операций на орбите.

У истоков кооперации РКК «Энергия» и ВНИИТрансмаш стояли В.С. Сыромятников и А.Л. Кемурджиан, которые познакомились в ИМАШ.

Одной из главных проблем создания СКР БМ было эффективное решение триботехнических проблем: изыскание материалов, покрытий, смазок, проектирование многочисленных и разнообразных узлов трения многократного использования, работающих на Земле и на космической орбите в широчайшем диапазоне скоростей скольжения и удельных нагрузок. Так, например, скорость скольжения в паре ручка бандажа – крюк механизма фиксации определялась тепловой и упругой деформацией фюзеляжа на различных этапах полета.

В докладе рассматриваются особенности конструкции механизмов поворота и фиксации, технические решения, обеспечившие высокую работоспособность пар трения, методические аспекты их проектирования и наземной отработки.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИСЕЛЕНИДОВ ВОЛЬФРАМА И МОЛИБДЕНА ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ЖИДКИХ И ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е.А.Марченко<sup>1)</sup>, Т.А.Лобова<sup>2)</sup>, И.А.Буяновский<sup>1)</sup>, И.П.Чулков<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>ИМАШ РАН, РФ, Москва, <sup>2)</sup>МИСиС, РФ, Москва, <sup>3)</sup>25 НИИХиммотологии, РФ, Москва

Рассмотрены современные представления о механизме формирования граничных слоев при использовании порошков твердых слоистых смазок для улучшения трибохарактеристик жидких и пластичных смазочных материалов, влиянии состава и вязкости смазок, а также материалов контактирующих элементов на свойства смазочных композиций.

Обоснована перспективность использования порошков диселенидов молибдена и вольфрама. По своим свойствам они превосходят дисульфид молибдена, порошки которого применяются в качестве наполнителей смазочных материалов в промышленном масштабе, и характеризуются высокой коррозионной стойкостью в воде, стабильностью коэффициента трения (при пуске и после остановки, при перепаде температур и давлений), высокой несущей способностью пленок ( $WSe_2$  - 45МПа,  $MoSe_2$  – 35МПа,  $MoS_2$  - 25МПа). Важным достоинством порошка диселенида вольфрама является также его абсолютная инертность к другим стандартным присадкам (серо- и фосфорсодержащим), что позволяет целенаправленно улучшать показатели стандартных масел, не снижая эффективности присутствующих в них других добавок в то время, как многие потребители и исследователи отмечают коррозионную агрессивность дисульфида молибдена и композиций на его основе.

Исследована эффективность применения в качестве наполнителей порошков диселенидов молибдена и вольфрама, полученных разработанным в МИСиС методом синтеза из элементов, имеющих стехиометрический состав и поверхность, состоящую преимущественно из базисных плоскостей, что способствует максимальной реализации их смазочных свойств.

Экспериментально установлено, что такие порошки диселенидов молибдена и вольфрама сохраняют свои свойства при введении в промышленные жидкие и пластичные смазочные материалы, увеличивают их несущую способность, расширяют температурный интервал применения, способствуют повышению долговечности за счет снижения скорости подъема температуры на контакте, увеличивают нагрузку заедания и т.д.

Разработанные в результате совместных работ Московского института стали и сплавов, 25 НИИХиммотологии и ИМАШ РАН смазочные композиции с добавками порошков диселенидов вольфрама и молибдена показывают перспективность использования этих соединений для создания новых композиций на основе жидких и пластичных смазочных материалов.

## МОДЕЛИ И КРИТЕРИИ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ ПРОБЛЕМАХ ПРОЧНОСТИ

**Ю.Г. Матвиенко**

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

Представлены некоторые результаты по созданию моделей и критериев двухпараметрической механики разрушения, полученные в Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, а также в рамках сотрудничества с ведущими зарубежными и Российскими научными центрами.

Обсуждены перспективные модели и критерии механики разрушения, учитывающие особенности напряженно-деформированного состояния в окрестности вершины трещиноподобного дефекта. Приведены теоретические и экспериментальные методы, позволяющие оценивать конструкционную прочность и живучесть поврежденных критически важных элементов. На основе концепции осреднения максимальных тангенциальных напряжений у вершины трещины смешанного типа предложен критерий для прогнозирования ее траектории. Применение предложенного критерия обсуждено для случая гидравлического разрыва нефтяных пластов.

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА В СТРУКТУРНЫХ ЗОНАХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ И МАШИН

**В.М. Матюнин, А.Ю. Марченков**

*НИИ «МЭИ», г. Москва, Россия*

Обоснование прочности, надёжности и ресурса эксплуатации конструкций и машин не возможно без учёта влияния концентраторов напряжений. По своему происхождению концентраторы напряжений можно подразделить на конструктивные, металлургические, технологические и эксплуатационные. Среди концентраторов напряжений металлургического, технологического и эксплуатационного происхождения наиболее проблемными являются структурные концентраторы напряжений. К таким концентраторам следует отнести текстуру металла, границы зёрен и двойников, скопления дислокаций и полос скольжения, неметаллические включения, карбидные частицы, локальные зоны мартенситного превращения и др. При возникновении структурного концентратора напряжений его влияние проявляется в некотором объёме металла или некоторой зоне изделия, которую можно назвать структурной зоной концентрации напряжений (СЗКН). Напряжения в СЗКН, вследствие их концентрации могут значительно превышать средние напряжения в детали или конструкции, а иногда и достигать значений разрушающих напряжений.

Масштабные уровни СЗКН можно условно подразделить на макро-, мезо-, микро-, наноуровни. Можно ещё выделить и атомный уровень в пределах элементарной кристаллической ячейки металла. Такое разделение СЗКН по масштабным уровням аналогично классификации остаточных напряжений I, II и III рода, предложенной Н.Н. Давиденковым. Современные физические методы и технические средства контроля (например, акустические, магнитные) позволяют обнаружить СЗКН на макро-, мезо-, микроуровнях. Однако наибольшие трудности при обнаружении и последующем исследовании представляют СЗКН на мезо- и микроуровнях, на которых их протяжённость может составлять несколько десятков микрометров. Определить механические свойства в таком малом объёме металла возможно микроиндентированием при весьма малых нагрузках вдавливанием (1-10 Г). Однако уменьшение нагрузки вдавливания приводит к резкому возрастанию значений твёрдости вследствие влияния масштабного фактора, что может ввести в заблуждение при оценке механических характеристик металла в СЗКН.

Авторы доклада разработали и обосновали методику пересчёта твёрдости на микроуровне на твёрдость на макроуровне, что даёт возможность оценить механические свойства металла в СЗКН на макроуровне.

В докладе на конкретных примерах продемонстрированы результаты определения механических свойств металла в СЗКН. Объектами контроля были участки трубопроводов, лопатки турбин, шпильки, корпуса шаровых кранов. Перед определением механических свойств выполнялся металлографический и электронно-микроскопический анализ металла СЗКН с установлением вида дефекта, например, резкое скопление плоскостей первичного и вторичного скольжения, неметаллические включения, расслоения, микротрещины и др.

Выполнена оценка деформационного дислокационного упрочнения металла в СЗКН по модели Тейлора, а также напряжения, необходимого для появления трещины, по модели Зинера-Стро. При сопоставлении расчётных данных с экспериментальными получено достаточно близкое их совпадение.

## УПРАВЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТЬЮ И ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ДЕГРАДИРУЮЩИХ СИСТЕМ

**Н.А. Махутов, В.В. Баранов**  
*ИМАШ РАН, Россия, Москва*

Любая техническая система в процессе эксплуатации подвержена процессам деградации (износа, старения и т.д.), в силу которых эффективность ее использования снижается, и в случайный момент она отказывает либо разрушается с катастрофическими последствиями. Это порождает необходимость превентивных управляющих воздействий, ориентированных на обеспечение безопасности и эффективности использования системы. Содержание подобных воздействий сводится к периодическому мониторингу, диагностике состояний с целью оценки ресурса работоспособности и опасности разрушения, выбору эффективных режимов восстановления ресурса, режимов использования системы, очередного шага мониторинга, варианта обновления структуры либо замены системы. Отсюда возникает проблема последовательного принятия решений, ориентированная на обеспечение безопасности и эффективности использования в условиях риска отказов и разрушения. Методология и методы ее решения излагаются в настоящем докладе.

Состояние системы определяется парой  $(s,x) \in S \times X$ , где компонента  $s \in S$  доступна наблюдению и описывает значения процесса деградации, компонента  $x \in X$  не доступна наблюдению и служит вербальной оценкой ресурса работоспособности. Оценка компоненты  $x \in X$  выполняется по значениям наблюдаемой компоненты  $s \in S$  и сводится к построению разбиения множества  $S$  на классы эквивалентности  $S_x \subset S$  относительно  $x \in X$ . Подобные классы называются ситуациями работоспособности. Их построение является содержанием диагностики состояния системы. В зависимости от ситуаций принимаются решения о выборе управляющих воздействий по восстановлению работоспособности, выбираемых из заданных множеств  $Y_x \subset Y$ , допустимых для ситуаций  $x \in X$ . Диагностика выполняется с шагом  $\tau \in T$ . От выбора шага  $\tau$  зависит вероятность безопасного использования системы и ее эффективность. Поэтому шаг  $\tau$  не фиксирован и подлежит последовательному выбору. Наконец, безопасность и эффективность системы достигается выбором нагрузочных режимов (производительности) и специальных инфраструктурных объектов, ориентированных на обеспечение безопасности. Задано множество структурных альтернатив  $G$ , имеющих смысл альтернатив нагрузочных режимов либо инфраструктурных объектов обеспечения безопасности.

Деградация системы описывается марковским процессом с обрывающимися траекториями в множестве наблюдаемых состояний  $S = [0,1] \in \mathbf{R}^1$ . Задана его переходная функция  $Q(\tau, S|S \times Y)$  с тремя параметрами:  $\mu$  – интенсивность износа,  $\lambda$  – интенсивность отказов в состоянии  $s=0$ ,  $\sigma$  – интенсивность отказов в состоянии  $s=0,5$  (полураспад).

Заданы функции полезности альтернатив:  $u^1(T|G \times Y)(S)$  – шага мониторинга  $\tau \in T$ ;  $u^2(G|T \times Y)(S)$  – структурных альтернатив  $g \in G$ ;  $u^3(Y|G \times T)(S)$  – управляющих альтернатив  $y \in Y$ .  $\varepsilon^g(Y)$  – мера действенности альтернативу  $y \in Y$ .

В этих предположениях развиты методология и модель последовательного принятия управляющих решений теоретико-игрового содержания на неограниченном горизонте времени. Методология допускает различные варианты постановок задач в зависимости от требований к безопасности и возможностей вывода из поглощающего состояния. В любом варианте решением таких задач являются устойчивые компромиссы в смысле Парето-оптимальных равновесий Нэша. Они определяют эффективные режимы безопасности и использования системы.

Для рассматриваемых задач получены вычислительные алгоритмы.

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ В ЗОНАХ ПОЛУЭЛЛИПТИЧЕСКИХ НАКЛОННЫХ ТРЕЩИН ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ.

Н. А. Махутов, И. В. Макаренко, Л. В. Макаренко.

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

В работе представлены результаты исследования напряженно деформированного состояния (НДС) и процессов разрушения на контуре и в объемах к нему прилегающих поверхностных полуэллиптических наклонных дефектов типа трещин.

На основе экспериментальных результатов установлен характер направления процессов разрушения поверхностных разно-ориентированных полуэллиптических трещин в пространственных неоднородных номинальных упругопластических циклических полях деформаций.

На основе проведенных численных расчетов методом конечных элементов, с помощью соответствующих программных комплексов, НДС в области фронта трещин, подтвержденных экспериментальными результатами, исследованы параметры сингулярности в упругопластической области.

Приведены расчетно-экспериментальные зависимости относительных коэффициентов интенсивностей деформаций  $\bar{K}_{ie}$  для моделей развития трещин нормального отрыва, поперечного и продольного сдвига (модели  $i = I, II, III$ ), которые зависят от многочисленных параметров геометрии и ориентации исходной и моделируемой плоскости трещин, характеристик нагружения деформационных критериев разрушения.

$$\left( \bar{K}_{ie} \right)_{\varphi} = f_i(\bar{e}_m, \Delta \bar{e}_{ia}, b, a_x, b/a_x, b/t, \varphi, m, k, m_k) \quad (1)$$

Дан анализ решения задачи упругопластического деформирования при сложном способе нагружения, в виде функционального распределения относительных упругопластических полей деформаций по контуру моделируемых полуэллиптических трещин с различным исходным углом наклона к главным номинальным напряжениям.

$$\bar{e}_{r\theta} = \frac{\bar{K}_{ie}}{\sqrt{2\pi r}} \phi_{r\theta}(\mathcal{G}) \quad (2)$$

Где:  $\bar{e}_{r\theta} = e_{r\theta} / e_T$ ,  $e_T$  - деформация на пределе текучести,  $r, \theta$  - полярные координаты с полюсом на контуре трещины.

Моделируется кинетика предельных поверхностей разрушения в пространстве относительных коэффициентов интенсивностей деформаций и параметров трещиностойкости материала  $\bar{K}_{IeC}$ ,  $\bar{K}_{IIeC}$ ,  $\bar{K}_{IIIeC}$ , представленная функциональной зависимостью

$$F(\bar{K}_{Ie}, \bar{K}_{IIe}, \bar{K}_{IIIe}, \bar{K}_{IeC}, \bar{K}_{IIeC}, \bar{K}_{IIIeC}) = 0 \quad (3)$$

Уравнение (3), являясь алгоритмом анализа эквивалентного относительного коэффициента интенсивности деформаций при выбранном критерии  $\bar{K}_{je} \leq \bar{K}_{jeC}$ , позволяет определять трещиностойкость и допускаемые размеры дефектов типа трещин, а по ним, регламентировать прочность, работоспособность и живучесть элементов оборудования.



# ЭРОЗИОННОЕ ПОВРЕЖДЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ В ПОТОКЕ КАВИТИРУЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

## EROSIONAL DAMAGE OF CONSTRUCTION WITHIN THE FLOW OF THE CAVITATING LIQUID

А.Н. Мельситов, В. А., Петушков

*Институт машиноведения им.А.А.Благонравова Российской академии наук*

Жидкости, включающие пузырьки газа или пара малой концентрации, рассматриваются как двухфазные. Наличие в подобных жидкостях дисперсной фазы существенно меняет волновые процессы, вызванные ударными воздействиями различной природы, и, соответственно, нагружение контактирующих с ними конструкций. Ударная волна приводит к сжатию пузырьков и их разрушению, что, в свою очередь, вызывает локальные нагрев и волновые процессы высокой интенсивности в пограничных слоях жидкости у стенки конструкции. В результате происходят деградация свойств материала деформируемой конструкции, ее локальное разрушение. Подобные условия возникают, например, в результате кавитации при перекачивании жидкости насосом, появляются цвета побежалости на стенках камеры насоса и эрозионные канавки. В докладе сформулированы в 3-хмерной постановке соответствующие нелинейные краевые задачи динамики двухфазной жидкости и повреждаемой деформируемой среды. Методами математического моделирования (вычислительного эксперимента) выполнен детальный анализ процессов ударного взаимодействия и локального разрушения деформируемой среды с высокоскоростным потоком двухфазной жидкости. Полученные результаты объясняют механизмы наблюдаемого на практике эрозионного разрушения и определяют требования к выбору материалов и режимов эксплуатации соответствующих конструкции.

Liquids, including bubbles of gas or vapor low concentration, are considered as two-phase. The presence of such liquids dispersed phase substantially changes the wave processes caused by the shock effects of different nature and, accordingly, the loading of structures in contact with them. The shock wave causes compression of the bubbles and their collapse, which, in turn, causes local heating and high intensity of wave processes in the boundary layers of fluid near the wall construction. As a result occur the degradation of material properties of the deformable structure, its local destruction. Similar conditions appear, for example, as a result cavitation with the pumping over of liquid by pump, appear temper colors at the pump chamber walls and erosional grooves. The report set out in a 3-dimensional formulation of the corresponding nonlinear boundary value problems are two-phase fluid dynamics and damage of the deformable medium. Methods of mathematical modeling (computer simulation) performed a detailed analysis of the impact of processes of interaction and destruction of local deformable medium with high-speed two-phase fluid flow. These results explain the mechanisms observed in practice, erosion damage and determine the requirements for the selection of materials and operating modes of the structure.

## ВЫБОР БАЗОВЫХ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ МЕХАНИЗМОВ И МАШИН

А.А. Мерзляков, Н.А. Серков  
ИМАШ РАН, Российская Федерация, г. Москва.

Основными метрологическими показателями операций контроля и диагностирования (КД) механизмов и машин в настоящее время являются диапазон и погрешность результатов измерения их контрольно-диагностических параметров (КДП). Выбор значений этих показателей требует предварительных сбора и анализа большого объема данных о КДП в соответствующих режимах работы объекта КД. Вместе с тем, использование дополнительного показателя «достоверность результата измерения» (в дальнейшем достоверность) позволяет выбирать рациональные значения вышеназванных показателей. В общем случае, под достоверностью понимается степень соответствия результата измерения КДП его действительному значению. Последнее, априори, находится внутри текущего кванта измерительной шкалы КДП. В настоящее время количественная оценка достоверности, как численной меры соответствия, в нормативных документах отсутствует. В данной работе предлагается использовать для оценки достоверности отношение двух отрезков шкалы КДП, отражающих текущее значение последнего с учетом его относительной погрешности и нулевого кванта шкалы. Таким образом, достоверность является функцией модуля относительной погрешности КДП -  $|\varepsilon|$  и имеет вид

$$D(|\varepsilon|) = (1 + |\varepsilon|) / (1 + 2|\varepsilon|) \quad (1)$$

Из (1) следует, что полный диапазон значений  $D(|\varepsilon|) = (0,5 \dots 1,0)$  при  $0 \leq |\varepsilon| \leq \infty$ . На практике, обычно,  $0 < |\varepsilon| \leq 0,5$ , что соответствует  $D(|\varepsilon|) = (0,75 \dots 1,0)$ . С учетом изложенного можно говорить о средней по диапазону  $(|\varepsilon|_{\max} - |\varepsilon|_{\min})$  достоверности, равной

$$\bar{D}(|\varepsilon|) = 1 / (|\varepsilon|_{\max} - |\varepsilon|_{\min}) \int_{|\varepsilon|_{\min}}^{|\varepsilon|_{\max}} D(|\varepsilon|) d(|\varepsilon|) = 0,5 \left[ 1 + \frac{\ln(1 + 2|\varepsilon|_{\max}) / (1 + 2|\varepsilon|_{\min})}{2(|\varepsilon|_{\max} - |\varepsilon|_{\min})} \right] \quad (2)$$

Для указанного диапазона значений  $|\varepsilon|$  из (2) получаем  $\bar{D}(|\varepsilon|_{\max}) = 0,8465736$ . Из (1) с учетом (2) имеем оценку среднего по диапазону значения  $|\bar{\varepsilon}|$  в виде

$$|\bar{\varepsilon}| = (1 - \bar{D}(|\bar{\varepsilon}|)) / (2\bar{D}|\bar{\varepsilon}| - 1) \quad (3)$$

Для полученного выше значения  $\bar{D}(|\varepsilon|_{\max})$  имеем  $|\bar{\varepsilon}|_{\max} = 0,2213475$ . Если текущее значение КДП является случайной величиной, то оценку (3) можно рассматривать, как уровень допустимых вариаций КДП от его математического ожидания. Тогда для текущего значения КДП -  $X$ , модуль допустимой абсолютной вариации -  $|\Delta| = |\bar{\varepsilon}|X$  и модуль абсолютной погрешности шкалы -  $|\Delta X|$  оценку модуля рационального значения относительной погрешности  $|\varepsilon|_p$  можно получить с учетом изоморфизма (в данном случае равенства) отношений  $|\Delta/X|$  и  $|\Delta X/X|$ . Откуда следует, что  $|\varepsilon|_p = |\bar{\varepsilon}|^2$  и для полученного выше значения  $|\bar{\varepsilon}|$  имеем  $|\varepsilon|_p = 0,048994715 \approx 0,049$ . Из изложенного следует, что минимальное измеряемое значение  $\min X_{\max} = (1 + |\bar{\varepsilon}|)X$ . Для максимального значения  $\max X$ , с учетом симметричного положения  $X$  относительно границ полного диапазона КДП, можем записать  $\max X = 2X$ . Тогда максимальный динамический диапазон КДП будет равен  $\max d = \max X / \min X = 2 / (1 - |\bar{\varepsilon}|)$ . Рассмотренные показатели являются базовыми для операций КД.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА АТОМНОМ УРОВНЕ

Ю.Ф. Мигаль

*ФГБУН Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия*

Трибология, зародившаяся как наука о процессах в макроскопических объектах, все шире выходит на микро- и наноуровень и все более детально занимается изучением межатомных взаимодействий на поверхности трения. Для более глубокого понимания таких характеристик материалов, как коэффициент трения, износостойкость и т.п., необходимо на атомном уровне выявить механизмы различных явлений, происходящих на поверхности, и оценить их влияние на трибологические процессы. Сегодня при изучении нанотрибологических процессов используются два различных теоретических подхода. Первый из них – классический, он базируется на методах молекулярной динамики (МД); второй – квантово-химический, базирующийся на методах квантовой механики и квантовой химии.

Несмотря на то, что взаимодействие атомов не подчиняется законам классической механики и при изучении нанотрибологических процессов, строго говоря, следует использовать методы квантовой механики, в случае больших систем, состоящих из десятков тысяч и более атомов, вполне применим, как показывает практика, классический подход. Метод МД позволяет изучать коллективные эффекты в нанотрибосистемах, в т.ч. влияние упорядоченности в расположении атомов на протекание процессов, перенос тепла между различными частями системы и т.п. Важно учитывать, что этот метод оказывается эффективным только в тех случаях, когда можно пренебречь перестройкой электронной структуры и изменением химических связей в системе. В противном случае необходимо использовать принципы квантовой механики.

Для решения ряда задач трибологии вполне применимы приближенные методы квантовой химии, которые в настоящее время широко используются при изучении химических взаимодействий в различных явлениях: адсорбции молекул на поверхности твердых тел, гомогенного и гетерогенного катализа, биохимии и др. Столь же широкое применение квантовой химии в трибологии сдерживается тем фактом, что число атомов в системах, рассматриваемых квантово-химическими методами, относительно мало. Оно обычно не превышает нескольких сотен, т.е. гораздо меньше, чем в системах, изучаемых методом МД. Тем не менее, прогресс в разработке квантово-химических методов, а также экспоненциальный рост скорости вычислений и объема памяти современных компьютеров позволяют уже в настоящее время проводить глубокие квантово-химические исследования в области трибологии.

Оптимальным на сегодняшний день методом квантово-химических расчетов, с помощью которого получают результаты для многоатомных систем, согласующиеся с экспериментом, является метод DFT. С его помощью, в частности, изучаются трибохимические реакции, взаимодействие молекул смазочных материалов с поверхностью металла, изменение формы молекул в результате трибологических процессов, совместимость химических элементов на границах зерен в поликристаллических материалах, влияние этой совместимости на износостойкость металлов и т.д.

В работе рассмотрены некоторые основные результаты, полученные в рамках классического и квантово-химического подходов. Обсуждается возможность объединения этих подходов при решении конкретных трибологических задач.

# ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАДАЧА ПРЕДЕЛЬНОГО ТЕРМОУПРУГОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ТЕПЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Л.И. Миронова

ПИ(ф) МГОУ имени В.С. Черномырдина, РФ, Подольск

В процессе проектирования конструкций, работающих в условиях тепловых нагрузок, разработчику важно знать ресурс работоспособности разрабатываемого изделия, обеспечивающего прочностную надежность и эксплуатационную стойкость. Такая оценка определяется совокупностью критериев предельного состояния, к которым относятся, как правило, принятые величины наибольших нормальных напряжений, наибольших главных деформаций, наибольших касательных напряжений, энергии формообразования или комбинация этих параметров [1]. Предлагается следующий подход в рассмотрении данной проблемы.

Для реальных инженерных задач, связанных с определением предельных состояний конструкций в условиях действия температурных градиентов, необходимо установить условие перехода от упругой стадии деформирования к пластической стадии, критерием которого может быть критерий минимума функционала упругой энергии тела [2]. Задача нахождения температурного силового фактора условного перехода сводится к нахождению экстремума, т.е. относится к классу экстремальных задач. Ее математическая формулировка определяется стандартной записью  $f_0(x) \rightarrow \inf(\sup); x \in C$ . Необходимым

условием локального минимума будет правило Лагранжа  $\mathfrak{L}_x = \sum_{i=0}^m \lambda_i f_i'(x^*) = 0$ .

Функционал упругой энергии тела является квадратичным, к нему применимы условия Лежандра и Якоби, при которых функционал является неотрицательным. В решении экстремальной задачи элемент  $x^*$  доставляет экстремум тогда, когда множители Лагранжа  $\lambda_0, \dots, \lambda_n$  не все равны нулю, и таковы, чтобы выполнялись следующее соотношение

$\sum_{i=0}^n \lambda_i (\Lambda_i x^* + a_i) = 0$ , где  $\Lambda$  - линейный непрерывный оператор  $\Lambda: X \rightarrow X$ ,  $\lambda$  - собственное

значение оператора, если существует вектор  $x \neq 0$ , такой, что  $\Lambda x = \lambda x$ . При решении задачи осесимметричного локального нагрева цилиндрической оболочки в условиях действия градиентного температурного поля по ее толщине в качестве таких множителей могут быть приняты функции перемещения, деформации и т.д. Используя алгоритм решения экстремальной задачи из работы [2], приведем полученное решение экстремальной температуры

в следующем виде  $T_2 \approx 3,14 \sqrt{\frac{h}{R}} \cdot T_0 [1,3y_0 + e^{-1,3y_0} ((1+1,3y_0) \cos 1,3y_0 - \sin 1,3y_0)]$ . Здесь  $y$ -линейная координата по дуге окружности поперечного сечения оболочки при  $v = 0,3$ .

## Список литературы

1. Миронова Л.И. Оценочные параметры в одном уточненном методе определения предельного состояния конструкции. – Проблемы машиностроения и автоматизации. №4, 2012, с.107- 111.
2. Миронова Л.И. Параметры оптимального управления термонапряженным состоянием конструкций оболочечного типа при термическом нагружении. – Проблемы машиностроения и автоматизации. №1, 2013, с.101-105.

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ШТАМПОВ С ЭЛАСТИЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МЕТИЗОВ

У.В. Михайлова, С.А. Кургузов

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Россия, Магнитогорск

Тарельчатые пружины широко используют в технике для гашения динамических и ударных нагрузок, возникающих в процессе работы машин. Однако согласно многочисленным исследованиям и практическим испытаниям разрушение тарельчатых пружин происходит из-за формирования усталостных трещин в кромках отверстия и из-за износа их контактных поверхностей. Зарождение усталостных трещин значительно ускоряют дефекты поверхности по кромкам пружины, такие как острые кромки и заусенцы, сформировавшиеся в процессе штамповки в жестких штампах [1]. Для их устранения проводят механическую обработку кромок.

Применение штампов, оснащенных эластичными элементами при изготовлении тарельчатых пружин позволяет сократить затраты на производство за счет исключения операции механической обработки и улучшить эксплуатационные характеристики пружины из-за повышения качества поверхности кромок.

Предложена новая конструкция штампа для штамповки заготовок тарельчатых пружин с матрицей, заполненной эластичной средой (рис. 1). Пуансон 1 представляет собой цилиндр со ступенчатой торцевой поверхностью, выполненный по форме изготавливаемой тарельчатой пружины с учетом ее пружинения при штамповке. Пуансон 1 состоит из двух концентрических элементов. Первый элемент: центральный пробивной пуансон для формирования отверстия пружины. Второй элемент: формообразующий конусообразный пуансон с диаметром равным диаметру пружины, предназначенный для формирования конусной поверхности пружины и ее вырубki [2].

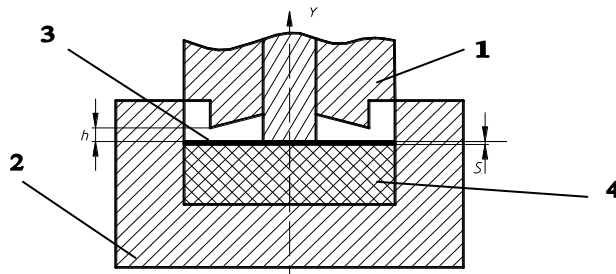


Рисунок 1 - Продольное сечение штампа, где 1 – пуансон, 2 – контейнер (матрица), 3 – заготовка, 4 – эластомер

Эластичная среда при сжатии создает силу трения на контактных поверхностях, что в сочетании с образующимся давлением повышает равномерность утяжки металла в области кромок пружины, а так же позволяет, при необходимости сформировать скругление вокруг кромки отверстия заготовки с целью увеличения площади контакта тарельчатой пружины при работе. Применение штампов с эластичными элементами так же будет эффективно и при изготовлении ряда других видов метизов, изготавливаемых методом листовой штамповки.

1. Железков О.С., Михайлова У.В. Особенности штамповки тарельчатых пружин. // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова – 2007. – № 4. - С. 59 – 60.

2. Михайлова У.В. Разработка и расчет процессов штамповки тарельчатых пружин эластичными средами // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 68-й науч.-техн. конф. Магнитогорск, МГТУ, 2010. – Т.1. – С. 315-319.

## **МЕТОДЫ РАСЧЕТА СИЛ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ РАСКАТКЕ ДИСКОВ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ АЛРД-800**

**В.В. Морозов, С.В. Морозов**

*Филиал «НИИД» ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют», Россия, Москва*

Одним из перспективных методов получения заготовок дисков диаметром от 500мм до 800 мм из жаропрочных сплавов является процесс изотермической раскатки. В настоящее время работы по изотермической раскатке дисков проводятся на линии АЛРД-800.[1]

При разработке технологического процесса изотермической раскатки необходимо учитывать влияние режимов (частоты вращения заготовки и подачи роликов) на силы деформирования. Превышение допустимых напряжений в узлах раскатной машины может привести к нестабильной работе, поломке инструмента или выходу из строя оборудования, поэтому задача определения сил является важной уже на этапе проектирования технологического процесса.

Основным методом определения сложного напряженно-деформированного состояния является метод конечных элементов. С помощью программных комплексов Qform-3D и ANSYS были получены графики силы на инструменте, формоизменение заготовки с распределением деформации[2]. Сравнение результатов моделирования процесса раскатки и экспериментальных данных изменения сил при раскатке показали удовлетворительное качественное и количественное совпадение.

Полномасштабное моделирование процесса требует значительных затрат машинного времени и наличия мощной вычислительной техники, поэтому для практического применения требуется введение упрощений и допущений, позволяющих сократить время расчета.

Выводы:

1. Компьютерное моделирование позволяет определять силы деформирования при изотермической раскатке и разрабатывать рекомендации по совершенствованию существующих технологических процессов.
2. Компьютерное моделирование позволяет на стадии разработки технологического процесса определять основные характеристики, без проведения дорогостоящих опытных работ на натуральных образцах.

Список литературы:

1. Бурлаков И. А., Морозов В. В., Морозов С. В. Автоматическая линия для изотермической раскатки заготовок дисков газотурбинных двигателей// Заготовительные производства в машиностроении, 2012. № 5 с. 26 - 28.
2. Компьютерное моделирование процесса изотермической раскатки с помощью программных комплексов Qform-3D и ANSYS. Бурлаков И.А., Морозов С.В., Боровских И. А. // Заготовительные производства в машиностроении. М.,2010г. № 4, - с. 30-34.

# МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И РЕСУРСА ДЕТАЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ МАШИН И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

**Г.В.Москвитин**

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения им. А.А.Благодирова Российской академии наук*

Как известно, конечной целью практически всех фундаментальных и прикладных исследований в области прочности и ресурса современных конструкционных материалов, деталей машин и элементов конструкций, является выработка рекомендаций по повышению этих важнейших параметров эксплуатации, непосредственно влияющих на надежность и безопасность. В докладе представлены некоторые результаты экспериментальных и численных исследований, выполненных коллективом лаборатории надежности и долговечности при термомеханических циклических воздействиях ИМАШ РАН за последние годы.

Модификация поверхности металлов и сплавов с применением разнообразных физических, термических, химических и других способов воздействия с целью изменения структуры и свойств является одним из наиболее перспективных направлений повышения ресурса изделий и конструкций под воздействием нагрузки и агрессивной среды при нормальной и повышенной температурах. К одному из современных и наиболее перспективных способов изменения свойств поверхности можно отнести газодинамическое напыление покрытий разного назначения. Основные преимущества данного способа: возможность нанесения меди, никеля, цинка и других металлов на локальные участки поверхности детали или конструкции при минимальном разогреве подложки, в результате чего не происходит изменение свойств и геометрии изделия.

Выполненные исследования показали, что

1. покрытие меди может иметь твердость до 1600 МПа, прочность сцепления со сталью до 50 МПа, удельное электрическое сопротивление до  $0,34 \text{ Ом мм}^2/\text{м}$  и коэффициент трения 0,07-0,08, что позволяет его использовать для повышения ресурса узлов и механизмов изделий электротехнического назначения:

2. твердость покрытия никеля может достигать 2800 МПа, что в совокупности с достаточно низким коэффициентом трения (0,04-0,06) и способностью противодействовать воздействию коррозии может обеспечить повышение ресурса машин и механизмов, изготовленных из низколегированных сталей, которые эксплуатируются в условиях коррозионной среды и высокой температуры;

3. газодинамическое напыление цинка на поверхность низкоуглеродистой стали позволяет снизить скорость коррозии до 40 раз, что при твердости покрытия до 600 МПа позволит повысить ресурс изделий, подверженных воздействию коррозионно – абразивной среды.

Кроме этого, в докладе представлены результаты исследования литых сталей железнодорожных тележек грузовых вагонов, опыт эксплуатации которых показывает, что значительная часть их ресурса определяется способностью несущими литыми деталями выдерживать эксплуатационные, нерегулярные по своей природе, нагрузки при развивающихся усталостных трещинах.

Также, уделено внимание результатам численного исследования НДС стабилизаторов волновых процессов (СВП), предназначенных для борьбы с гидроударами, шумами и вибрациями на водо - и нефтепродуктопроводах и тем самым способствующих повышению прочности, ресурса и безопасности этих важнейших технических систем. Определены наиболее нагруженные участки в упругой камере и наполнителе СВП, получены количественные оценки параметров напряженно - деформированного состояния в опасных областях.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ПРОЦЕССА УСТАЛОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е.А. Мотова, Н.Е. Никитина

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиностроения РАН, Россия, Нижний Новгород*

Хотя основным видом разрушения при переменном нагружении является усталость [1], металлы и сплавы не разрушаются идеально хрупко, то есть без предшествующей пластической деформации [2]. Разрушение происходит при напряжениях, значительно меньших, чем предел прочности, часто даже ниже предела упругости: в местах, имеющих нарушения структуры, развиваются микротрещины, которые, в свою очередь, становятся концентраторами напряжений, вызывают появление новых микротрещин и далее – главной трещины, разрушающей материал.

Для изучения явления усталости конструкционных материалов нами применен импульсный ультразвуковой (УЗ) метод, а именно, использован акустический стенд на базе серийного прибора И2-26 [3], а также пьезоэлектрические преобразователи сдвиговых волн оригинальной конструкции. Сдвиговые упругие волны обладают большой информативностью при исследовании явлений, характеризующихся наличием в материале выделенных направлений, например, при возникновении вдоль некоторого направления напряжения или пластической деформации. Информативной характеристикой при этом может служить параметр акустической анизотропии, представляющий собой относительную разницу скоростей волн, поляризованных вдоль и поперек выделенного направления.

В докладе представлены результаты исследования влияния пластической деформации  $\varepsilon$  от 0 до 1,2% образца из стали 38ХН3МА на величину акустической анизотропии материала, которую мы определяли экспериментально, по результатам измерения времени распространения импульсов сдвиговых волн мегагерцевой частоты, в нескольких точках рабочей части образца. При этом наблюдали монотонное увеличение параметра акустической анизотропии при росте пластической деформации.

Затем было исследовано влияние малоциклового усталости на акустическое поведение второго стального образца, при симметричном цикле нагружения, на ступенях  $N = 1000, 2000, 3000$  циклов с амплитудой деформации  $\varepsilon_a = 0,5\%$ . Исследовано также влияние гармонического нагружения на акустические свойства двух дюралюминиевых образцов. Акустические измерения проведены после  $N = 30000, 60000, 90000$  циклов нагружения. Закономерности изменения параметра акустической анизотропии, выявленные при нагружении стальных образцов, сохраняются и для сплава Д16 – сначала рост при росте пластической деформации, потом уменьшение из-за возникновения микротрещин. Таким образом, показана принципиальная возможность использования эхо-метода неразрушающего контроля, с применением сдвиговых волн мегагерцевого диапазона частот, для исследования процесса усталости стали и дюралюминия при переменном нагружении.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. - М.: Наука, 1974. 312 с.
2. Трощенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. - Киев: Наукова думка, 1981. 344 с.
3. Моничев С.А., Никитина Н.Е. Ультразвуковой эхо-метод исследования упругих свойств твердых тел. Препринт № 24-04-03/Нф ИМАШ РАН. Н. Новгород, 2004. 22 с.

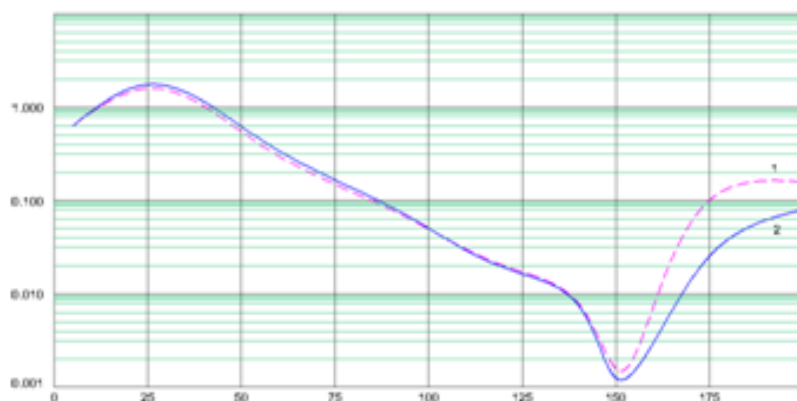


# ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ МЕХАНИЗМОВ НА ОСНОВЕ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ С ВНУТРЕННИМИ ИНЕРЦИОННЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ

О.О. Мугин

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

Рассмотрен объект испытаний - виброизолятор с преобразованием движения инерционных элементов. Представлены результаты экспериментального исследования жесткостных характеристик данного виброизолятора. Приведены его статические и динамические характеристики. Показаны эффекты динамического поведения конструкций при возбуждении белым шумом. Приведены технические решения по его настройке на необходимую частоту. Измерения динамических характеристик виброизолятора на экспериментальном вибростенде, который позволяет производить измерения различных вибрационных характеристик процесса, в том числе комплексной жесткости и



механического импеданса. На рисунке представлена частотная зависимость коэффициента передачи для виброизолятора (гидроопоры) с использованием инерционности и демпфирования (при настройке виброизолятора на частоту 130 Гц).

Анализируя экспериментальные кривые, представленные на рис. 6 можно увидеть, что опытный образец гидроопоры настроен на частоту 130 Гц. Данные настройки виброизолятора обеспечивают усиление эффекта виброизоляции в полосе частот 120-175 Гц. В ходе динамических испытаний опытного образца виброизолятора на вибростенде были получены экспериментальные статические и динамические характеристики виброизолятора, которые подтверждают ожидаемый эффект виброизоляции при использовании гидроопр в системах виброизоляции машин и инженерно-строительных сооружениях. Применение данного типа виброизоляторов в автомобиле и судостроении, направленных на снижение вибрации, передаваемой силовыми агрегатами на корпус и в окружающую среду.

***Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №№ 13-08-01235, 13-08-90419).***

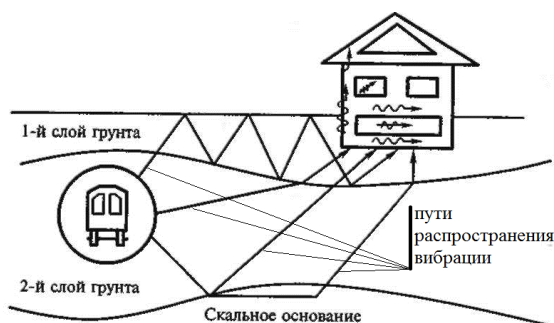
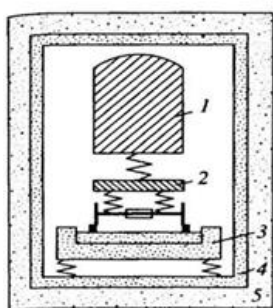
# К ВОПРОСУ СНИЖЕНИЯ СТРУКТУРНОЙ ВИБРАЦИИ И ШУМА, ПЕРЕДАВАЕМОЙ ПОЕЗДАМИ МЕТРОПОЛИТЕНА В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

О.О. Мугин

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

Рассматривается проблема подавления вибрации, создаваемой поездами метрополитена. Снижение вибрации, возникающей при взаимодействии железнодорожного состава и рельсов в контакте "рельс-колесо" осуществляется посредством размещения под верхним строением пути упругоинерционных виброизоляторов с внутренними инерционными элементами. Прогнозируется усиление эффекта виброизоляции (на 6-14 дБ) при сохранении необходимой величины статической жесткости.

Проблема снижения уровня вибрации и шума транспортных средств в настоящее время приобретает все большую актуальность. Повышенный уровень шума ухудшает экологические показатели транспортных средств и увеличивает дискомфорт, поэтому в последнее время в нормативные документы вводятся все более жесткие нормы на вибрацию и шум [1].



Известно, что линии метрополитена мелкого заложения являются источником повышенной вибрации, которая распространяется по грунту и передается на фундаменты зданий [2]. Поэтому возникает необходимость снижения уровней вибрации и структурного шума в застройке, прилегающей к проектируемым и строящимся линиям метрополитена.

Основная задача - это снижение вибрации, возникающей при взаимодействии подвижного состава и верхнего строения пути (рельсов) в контакте "рельс-колесо" на станциях метрополитена и в тоннелях, а также при их последующем распространении по грунту и действию на расположенные вблизи наземные сооружения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 23-03-2003. Защита от шума. М.: Госстрой России, 2003.
2. Гордеев Б.А., Ерофеев В.И., Синев А.В., Мугин О.О. Системы виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред. М.: Физматлит, 2004. 176 с.
3. Мугин О.О. Методика проектирования и настройки на рабочую частоту гидроопоры по типу: «гидроопора с обечайкой»//Вестник научно - технического развития (<http://www.vntr.ru/ftpgetfile.php?id=598>) -№5 - 2012 г – С.36-40.
4. Сирил М. Харрис, Чарльз И. Крид. Справочник по ударным нагрузкам. Л.: Судостроение, 1980. 360 с.
5. Обморшев А.Н. Введение в теорию колебаний. М.: Наука, 1965. 276 с.

**Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №№ 13-08-01235, 13-08-90419).**

# АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ПОДАТЛИВОСТИ РОЛИКОВЫХ ПОДШИПНИКОВ

**Ф.Г. Нахатакян, О.И. Косарев**

*ИМАШ им. А.А. Благодирова РАН, г. Москва*

На основе разработанного в работе [1] метода определения сближения упругих тел с помощью модели упругого полупространства предлагается аналитическое определение контактной податливости роликовых подшипников. Для этого параметра в литературе [2] на основе экспериментальных данных сжатия стальных роликов плоскими плитами приводится величина  $26 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^2/\text{н}$  (для одного тела). В настоящей работе суммарное относительное смещение  $w_{B/H}$  двух точек  $B$  и  $H$  приложения внешней нагрузки (рис.1) определено как сумма сближений  $w_{A/H}$  точек  $H$  и  $A$  с одной стороны (суммарная контактная деформация пары ролик- наружное кольцо), и  $w_{A/B}$  точек  $A$  и  $B$  с другой стороны (суммарная контактная деформация пары ролик- внутреннее кольцо). В результате получена зависимость для определения суммарной контактной деформации

$$w_{B/H} = 2 \frac{4(1-\nu^2)q}{\pi E} \ln \left[ 1,842 \sqrt{\frac{E \sqrt{C_1 C_2}}{q} \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{R_0^2}{R_1 R_2} \right)} \right].$$

Структура последней формулы такова, что даже двукратное увеличение  $C$  приводит к увеличению  $w_{B/H}$  всего в среднем на 8% (несмотря на то, что при  $C \rightarrow \infty$  перемещение  $w_{B/H} \rightarrow \infty$ ), поэтому, помня, что  $R_0^2 / 2R_1 R_2 \ll 1$ , для контактной податливости  $\bar{w}$  окончательно получим формулу в виде:

$$w_{B/H} / q = \bar{w} = 2 \cdot 4(1-\nu^2) \ln [1,842 \sqrt{EC/q}] / \pi E,$$

где  $\nu$  и  $E$  - коэффициент Пуассона и модуль упругости материала;  $q$ - погонная нагрузка;

График зависимости  $\bar{w} \cdot 10^6$  [мм/н/мм]-  $q$  [н/мм] с начальными параметрами для подшипников 2211:  $E=2,15 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2$ ;  $\nu = 0,3$ ;  $C=4,1 \text{ мм}$ - показан на рис.2, откуда видно,

$\bar{w} \cdot 10^6$  [мм/н/мм]

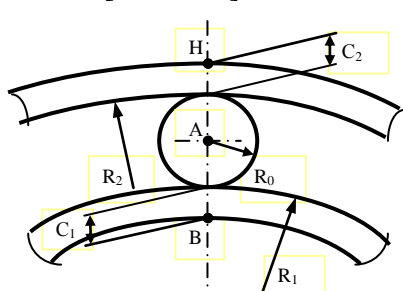


Рис.1.

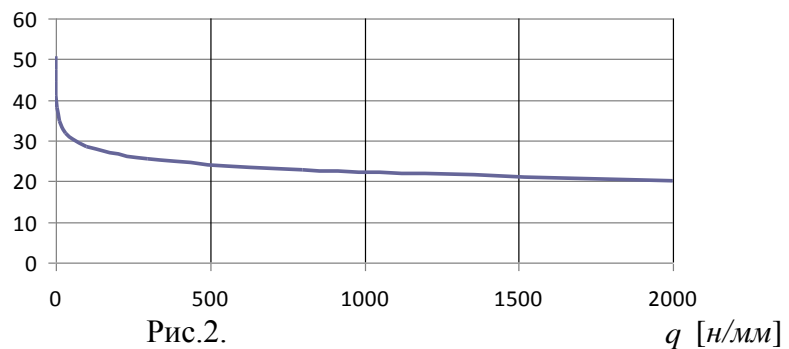


Рис.2.

что влияние нагрузки  $q$  на удельную податливость  $\bar{w}$  сильнее сказывается при малых  $q$ . Из этих графиков также видно, что только при определенном диапазоне изменения нагрузки  $q$  можно удельную податливость  $\bar{w}$  с какой-то точностью считать величиной постоянной.

Список литературы

1. Нахатакян Ф.Г. Механика контактного сближения упругих тел в задаче Герца. // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2010. № 5, с. 48- 56.
2. Орлов А.В. Упругие деформации и напряжения на линейном контакте. //Проблемы машиностроения и надежности машин, 2006., № 6, с. 31-36.

# КОМПЛЕКС НАЦИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТОВ ПО ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДА АКУСТОУПРУГОСТИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НА ТРАНСПОРТЕ

**Н.Е. Никитина<sup>1)</sup>, С.В. Казачек<sup>2)</sup>**

*<sup>1)</sup>Институт проблем машиностроения РАН, Россия, Нижний Новгород*

*<sup>2)</sup>ОАО ГИПРОГАЗЦЕНТР, Россия, Нижний Новгород*

Методические основы применения акустоупругого эффекта для определения плоского напряженного состояния конструкционных материалов ультразвуковым (УЗ) эхо-методом освещены в монографии [1]. Разработчики метода, во главе с автором книги, уделяют большое внимание нормативно-технической документации, создаваемой на основе детально проверенных данных теории и эксперимента.

В октябре 2007 года введен в действие национальный стандарт РФ, устанавливающий общие требования неразрушающего контроля напряжений в элементах конструкций [2], разработанный Нф ИМАШ РАН и ОАО «НИЦ КД», в сотрудничестве с ТК 132 «Техническая диагностика». Результаты лабораторных и полевых испытаний на объектах ГАЗПРОМА позволили сотрудникам ООО «ИНКОТЕС», при участии авторов доклада, разработать и аттестовать методику УЗ контроля напряжений в трубах большого диаметра [3], на основе которой впоследствии был разработан и введен в действие национальный стандарт [4].

Полезным дополнением к указанным является стандарт РФ по контролю динамических напряжений, скорость изменения которых значительно меньше, чем у зондирующего акустического импульса [5]. Завершают комплекс работ стандарт по количественной оценке параметров квадратичной нелинейности твердых тел, которая определяет величину упругоакустического эффекта в них [6], а также разработанный в прошлом году ГОСТ Р 55043-2012 «Контроль неразрушающий. Определение коэффициентов упруго-акустической связи. Общие требования», с датой введения в действие 1 января 2014 года.

В докладе рассмотрены основные положения и особенности указанных нормативных документов. Надеемся, что успехи, достигнутые на этом пути, помогут поставить сравнительно новый метод измерения напряжений в твердых телах в один ряд с более известными, обладающими сравнимыми с ним возможностями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения. Н. Новгород: ТАЛАМ, 2005. 208 с.
2. ГОСТ Р 52731-2007. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля механических напряжений. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2007.
3. Трубы стальные для трубопроводов. Методика выполнения измерений механических напряжений методом акустоупругости. ФР.1.31.2006.0283. Свид-во об аттестации № 531/1700.
4. ГОСТ Р 53034-2008. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля напряжений в материале трубопроводов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2009.
5. ГОСТ Р 53204-2008. Контроль неразрушающий. Акустический метод контроля переменных механических напряжений. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2009.
6. ГОСТ Р 53568-2009. Контроль неразрушающий. Определение констант упругости третьего порядка акустическим методом. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2009.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ДИСПЕРГИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ ПРИ СОЗДАНИИ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЭКРАНОВ

В.С. Николаенко<sup>1)</sup>, Г.С. Филиппов<sup>1)</sup>, Б.Ю. Яценко<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>МАИ, <sup>2)</sup>ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Москва

Одним из способов снижения электромагнитного излучения объекта в инфракрасном диапазоне длин волн является использование аэрозольных экранов, создаваемых между объектом и приёмником излучения.

На эффективность создаваемого аэрозольного экрана большое влияние оказывают такие основные параметры как:

- а) размер и форма частиц экрана,
- б) характеристики вещества частиц (капель) экрана,
- в) расстояние между частицами экрана,

а также косвенные параметры - пригодность компонентов к условиям хранения, транспортировки и эксплуатации и массогабаритные характеристики диспергирующих устройств.

Для создания аэрозольных экранов с необходимыми параметрами частиц (капель), необходимы специальные диспергирующие устройства, способные в соответствующих количествах и концентрациях их производить. Достигнуть соответствующих параметров аэрозольного экрана позволяет использование волновой технологии в составе диспергирующих устройств, таких как высокочастотные ультразвуковые колебания. Кроме того, использование высокочастотных колебаний позволяет уменьшить расслоение компонентов аэрозольного экрана в процессе транспортировки и хранения.

Для проведения практических исследований, был разработан и собран испытательный стенд, позволяющий измерять поглощение ИК излучения динамическим аэрозольным экраном.

# ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ МАНИПУЛЯТОР ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ С ПЯТЬЮ СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ

Н.Ю. Носова В.А. Глазунов

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Россия, Москва*

В робототехнических системах современных предприятий различных отраслей промышленности все более широкое применение находят роботы с манипуляционными механизмами параллельной и комбинированной структур. До настоящего времени большинство промышленных роботов имеет незамкнутые кинематические цепи, т.е. последовательную структуру.

В манипуляторах параллельной структуры выходное (исполнительное) звено, связано с неподвижным основанием несколькими кинематическими цепями, каждая из которых может содержать одну или несколько приводных пар, систему звеньев переменной длины и налагает определённое число связей на движение выходного звена. Такие механизмы обладают рядом важных достоинств, таких как высокая жесткость, надежность и компактность, однако имеют меньшую по размерам рабочую зону, чем у манипуляторов последовательной структуры, и большую сложность управления.

Современный уровень развития компьютерных технологий позволяет применять эффективные численные методы, для решения многих задач расчета и оптимизации конструкций при проектировании манипуляторов данного типа. Поэтому особую актуальность приобретают вопросы исследования геометрических, кинематических, силовых и динамических параметров таких механизмов и разработки научных основ и методик их расчета и проектирования.

В связи с этим выполнены исследования, направленные на создание нового пространственного манипуляционного механизма параллельной структуры с пятью степенями свободы.

В качестве прототипа для разработки нового манипулятора выбран платформенный механизм параллельной структуры типа Orthoglide [1] с пятью степенями свободы, характеризующийся наличием трёх кинематических цепей. Каждая из цепей содержит двигатель поступательного перемещения, расположенный параллельно одной из ортогональных осей координат, шарнирный параллелограмм, конечную вращательную кинематическую пару, ось которой совмещена с осью конечного звена шарнирного параллелограмма и конечное звено кинематической цепи, сопряженное с выходным звеном механизма. В двух кинематических цепях расположен карданный вал, необходимый для передачи вращения на рабочий орган манипулятора.

В разработанном пространственном манипуляторе параллельной структуры с пятью степенями свободы устранены недостатки прототипа, что, как показали начатые исследования параметров нового механизма, позволит повысить его надёжность и техническую эффективность.

## Литература

1. United States Patent Application Publication. Pub. No.: US 2007/0062321 A1. Pub. Date: Mar. 22, 2007. DEVICE FOR THE MOVEMENT AND ORIENTATION OF AN OBJECT IN SPACE AND USE THEREOF IN RAPID MACHINING. Inventors: Danien Chablat, Nantes (FR); Philippe Wenger, Sainte Luce Sur Loire (FR).

## ДИНАМИКА КУЛАЧКОВЫХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ МУФТ.

**Б.И. Павлов**

*ИМАШ РАН, Россия, Москва.*

Пружинно-зубчатые муфты применяются как защитные устройства механических трансмиссий машин, разъединяющие привод с трансмиссиями от исполнительного органа при заклинивании последнего.

Предохранительная муфта связывает между собой с помощью двух полумуфт, имеющих торцевые либо кулачки или зубья, два соосно расположенных вала. Одна полумуфта смонтирована неподвижно на приводном (ведущем) валу. Вторая полумуфта установлена на шлицевом участке второго вала (ведомого), который может перемещаться в осевом направлении. Динамическая модель включает эти два упругих вала, подводящих к муфте движущий момент и момент сопротивления. Моменты сил упругости валов являются обобщенными координатами. Контакт (зацепление) полумуфт обеспечивается пружиной. Кинематическая схема трансмиссии с муфтой приводится к трехмассовой расчетной схеме, которая представляет собой нелинейную систему с переменной структурой. Переменность структуры и нелинейность связаны с несколькими фазами движения, когда происходит распад муфты на две полумуфты, с движением полумуфт без отрыва, с отрывом, с относительным движением, с соударением.

Принцип действия муфты следующий. При перегрузке ведомый вал и соответствующая ему полумуфта останавливаются, не препятствуя вращению ведущего вала. За счет возникающих в зацеплении осевых усилий пружина сжимается, ведомый вал получает осевое перемещение на величину высоты зуба (кулачка). Торцы кулачков муфт начнут проскальзывать. Когда выступ одного кулачка одной из полумуфт будет находиться против впадины другой из полумуфт, под действием пружины будет происходить соударение и зацепление полумуфт.

В результате соударения подвижная полумуфта совершает угловые и осевые колебания, которые происходят в направлении упругих связей в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, что позволяет перемещения подвижной полумуфты, обладающей двумя степенями свободы, привести к двум перемещениям с одной степенью свободы.

Исследования показывают, что работа кулачковых предохранительных устройств зависит от величины коэффициентов трения в кулачках и в шлицевом или шпоночном соединении; величины угла наклона рабочих поверхностей кулачков, угла их расположения, степени равномерности распределения окружной силы; формы рабочих поверхностей; высоты подъема кулачков; жесткости пружины; геометрических параметров муфты.

При выборе пружины необходимо считаться не только с величиной силы, которую она может создать, но и с ее жесткостью. При прочих одинаковых условиях необходимо стремиться к минимальной жесткости. Надежность срабатывания повышается с уменьшением жесткости пружин.

Список литературы.

1. Анилович В.Я., Манчинский Ю.А. Оптимизация параметров кулачковой предохранительной муфты. Вестник машиностроения, 1978, №12, с. 13 - 16.
2. Кожевников С.Н., Нурибеков И.А-Г. Исследование динамических процессов в трансмиссиях с предохранительной пружинно-зубчатой муфтой. Машиноведение, 1975 г., №1, с. 15-21.

# СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ОДНОКОВШОВОГО ЭКСКАВАТОРА

В.П. Павлов, А.Ю. Ахпашев

Сибирский федеральный университет, Россия, г. Красноярск

Автоматизированный структурный синтез заключается в преобразовании описаний проектируемого рабочего оборудования: исходное описание содержит информацию о требованиях к проекту, а результирующее описание должно содержать сведения о структуре и параметрах. Для наиболее распространенной схемы гидромеханизма ориентированный граф

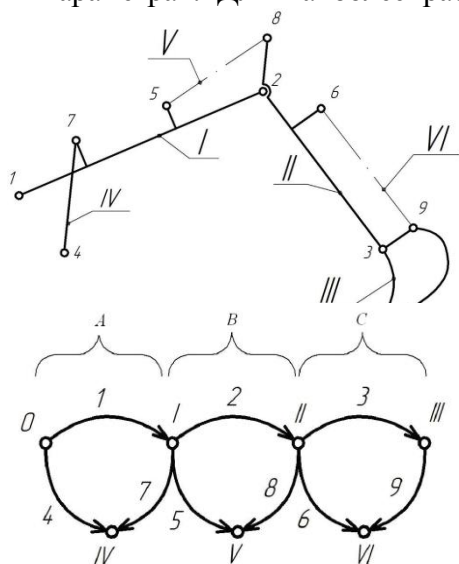


Рис. 1.

представлен на рис. 1. Буквами А, В и С обозначены уровни иерархии (ярусы) графа. Для многозвенного рабочего оборудования количество ярусов может быть значительно больше, чем показано на рисунке.

Типовыми структурными образованиями на каждом уровне иерархии являются четырехзвенные и шестизвенные механизмы, а шестизвенный механизм рассмотрен как вариант развития четырехзвенника [1]. В основе математических моделей лежат известные уравнения статического равновесия, векторные уравнения замкнутости и матрично-геометрические методы механики [2]. Так, вектору обобщенных координат  $q = \{q_1, q_2, q_3, q_4, q_5\}^T$  шестизвенного механизма сопоставлен вектор скоростей  $\dot{q}$  и обобщенный геометрический функционал  $F$ , в совокупности определяющие матрицу Якоби  $M_J$  и кинематические

соотношения для перемещений и скоростей элементов оборудования:

$$M_J \dot{q} + M_V = 0; F = \{F_1, F_2, F_3, F_4, F_5\}^T = 0; M_V = \left\{ \frac{dF_1}{dt}, \frac{dF_2}{dt}, \frac{dF_3}{dt}, \frac{dF_4}{dt}, \frac{dF_5}{dt} \right\}^T.$$

Поскольку при решении задач конструкторского проектирования превалирует геометрическая сторона, определяющая многие свойства рабочего оборудования, основной акцент в исследовании задачи сведен к количеству и взаимному расположению шарниров, связывающих элементы оборудования, что формально соответствует известной задаче размещения Штейнера. Многовариантный анализ новых структур гидромеханизмов предполагает использование множества дополнительных вершин соответствующего графа, а критерий оптимизации связан с суммарной длиной дуг.

В зависимости от решаемой задачи критерию придается различный смысл: например, постоянная часть затрат на рассматриваемом уровне иерархии; затраты на обход «запретных» зон (увеличение стоимости при усложнении конструкции близко расположенных или совмещенных шарниров и т.п.).

Обеспечена автоматическая сборка системы уравнений для применения на первых стадиях проектирования рабочего оборудования. Рассмотрены варианты постановки частных задач оптимального проектирования для условий смешанной иерархии.

## Список литературы

1. Павлов, В.П. Основы системотехники многоцелевых землеройных машин: монография / В.П. Павлов. – Новосибирск: Изд-во СО РАН; Красноярск: ИПЦ, 2006. – 332 с.
2. Павлов, В.П. Дорожно-строительные машины. Системное проектирование, моделирование, оптимизация / В. П. Павлов, Г.Н. Карасев. – Красноярск : ИПК СФУ, 2011.



## ВОЛНОВЫЕ СМЕСИТЕЛИ ВЫСОКОВЯЗКИХ ЖИДКИХ СРЕД

С.С. Панин, В.С. Николаенко, Е.А. Брызгалов,  
Н.И. Яковенко, Д.В. Курменёв

*Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук «Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН» (Москва)*

Процессы перемешивания жидких сред составляют значительную долю технологических операций во многих отраслях современной промышленности. Особенно широко перемешивание встречается: в пищевой отрасли, химической промышленности, строительной индустрии при приготовлении строительных растворов, косметической промышленности, нефтедобыче, нефтепереработке и т.д.

Наиболее перспективной научной базой для реализации разработок новых перемешивающих устройств является нелинейная волновая механика, основанная коллективом исследователей под руководством академика Ганиева Ривнера Фазыловича. В результате проведённых исследований к настоящему времени открыт и подтверждён экспериментально ряд новых волновых эффектов в области динамики поведения жидких сред, в том числе многофазных [1-3]. Наиболее интересными являются эффекты изменения физических и реологических свойств ряда сред, подвергнутых волновой обработке, и эффект волновой интенсификации массообменных процессов.

Одна из основных идей волнового перемешивания основывается на возможности организации сложных пространственных течений жидкой среды за счёт взаимодействия её с твердыми телами (рабочими органами смесителя), погруженными в перемешиваемую среду и совершающими колебания относительно неё [4-6]. Иными словами, возможна организация массообмена перемешиваемого состава по всему объёму за счёт исключительно колебательного воздействия. При этом данный способ организации течения позволяет реализовывать сложные разнонаправленные течения (вплоть до встречных) со значительным относительным сдвигом жидкой среды, отсутствием застойных зон и распространением в объёме среды сдвиговых волн. Пример картины течения, порождаемого единичным телом ассиметричного профиля, совершающего колебания в жидкости представлен на рис.1. На рис.2 показан один из вариантов волнового режима течения среды в лабораторном смесителе.

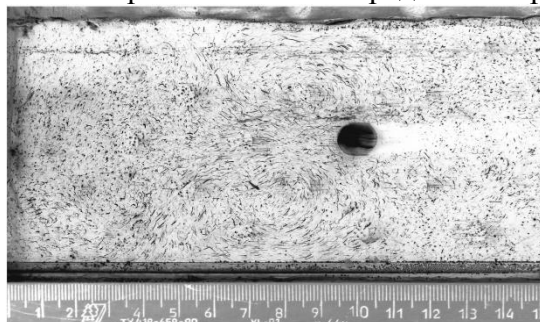


Рисунок 1. Картина течения жидкости, порождаемая колебаниями единичного ассиметричного тела. Частота колебаний 30 Гц.



Рисунок 2. Один из режимов перемешивания в лабораторном волновом смесителе (стрелками указаны осреднённые направления течения жидкости).

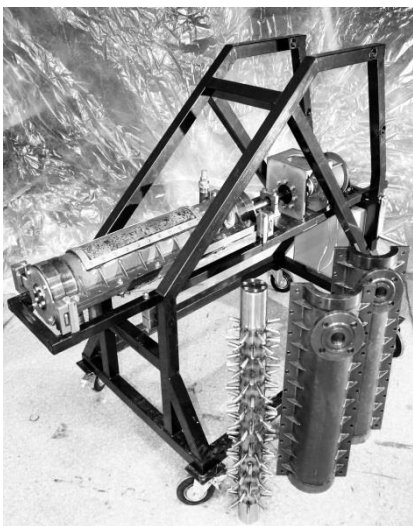


Рисунок 3. Волновой смеситель

На данной научной базе в ИЦНВМТ РАН разработан класс новых резонансных волновых машин – смесителей для различных областей применения. К настоящему моменту времени проведена серия испытаний применительно к перемешиванию некоторых типов высоковязких составов. Показано положительное влияние на строительно-технологические характеристики красок, смесей на цементной основе и пр. Показана принципиальная возможность качественного перемешивания микродисперсных наполнителей в эпоксидных смолах. Фотография опытного образца одного из типов волнового смесителя показана на рис.3.

Список литературы

1. Ганиев Р.Ф. Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. — М. : Регулярная и хаотическая динамика, 2008.
2. Ганиев Р.Ф. Волновые машины и технологии. (Введение в волновую технологию). — М. : Регулярная и хаотическая динамика, 2008.
3. Ганиев Р.Ф. Лакиза В.Д., Цапенко А.С. О явлении вибрационного перемешивания и образования периодических структур в условиях, близких к невесомости // Известия АН СССР. Механика твердого тела. — 1977 г.. — №2. — 56-59 стр..
4. Панин С.С. Разработка волнового смесителя для перемешивания высоковязких неньютоновских жидкостей // Проблемы машиностроения и надёжности машин. — М. : , 2011 г.. — № 2. — 91-100 стр..
5. Ганиев Р.Ф. Брызгалов Е.А., Панин С.С. и др. Волновая технология производства магнетодиэлектриков // Справочник. Инженерный журнал. — М. : , 2010 г.. — №1. — 3-7 стр..
6. Ганиев Р.Ф. Брызгалов Е.А. Панин С.С. и др. Исследование микроструктуры магнетодиэлектрика, полученного с использованием волновой технологии // Справочник. Инженерный журнал. — М. : , 2011 г.. — №2. — 3-7 стр..

# ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ТОЧЕЧНОГО УПРУГОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО КОНТАКТА

М.Я. Пановко

ИМАШ РАН, Россия, Москва

Настоящая работа посвящена изучению колебательных процессов в зоне упругогидродинимического контакта, образующегося при качении деформируемого шара заданной массы по жесткому полупространству со смазкой для случая, когда к шару приложена внешняя сила, изменяющаяся во времени по синусоидальному закону. Предполагается квазистатичность деформации. Схема контактирующих тел показана на рис. 1. Математическая модель задачи, формулируемая с учётом массы шара, сводится к системе нестационарных нелинейных интегродифференциальных уравнений и неравенств с начальными и граничными условиями, описывающих распределения давления и толщины смазочной плёнки в зоне точечного контакта, а также движения деформируемого шара в вертикальном направлении. Сосредоточенный УГД контакт с учётом массы контактирующих тел ранее анализировался в работах [1-3].

Вычислительный алгоритм решения задачи основывался на методе Ньютона. Численные результаты показали, что динамическое нагружение катящегося шара заданной массы может вызвать значительные качественные и количественные изменения распределений давления и толщины смазочной плёнки в зоне упругогидродинимического контакта. Это следует, в частности, из рис. 2, на котором для сравнения представлены зависимости во времени безразмерной толщины смазочной плёнки в центре контакта для случаев, когда масса шара  $W=0$  и  $W>0$ . Видно, что по завершении переходного режима эти зависимости имеют вид установившихся колебаний, причём при  $W>0$  их амплитуда заметно больше, чем при  $W=0$ . На рис. 3 и 4 показаны соответственно распределения давления и толщины плёнки при  $t=0$  и в момент времени  $t=4,3$  для  $W=0$  и  $W>0$ . Эти распределения также свидетельствуют об увеличении влияния на них динамического нагружения при  $W>0$  по сравнению с  $W=0$ .

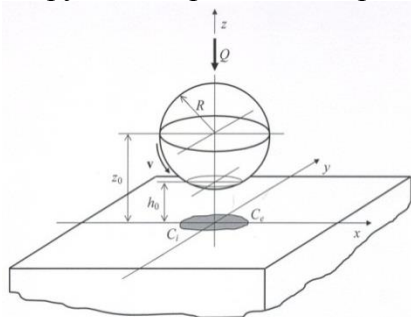


Рис. 1

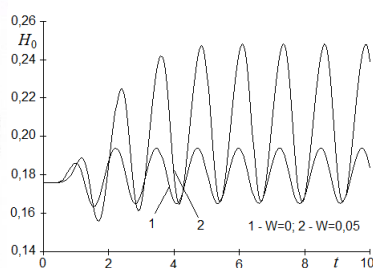


Рис. 2

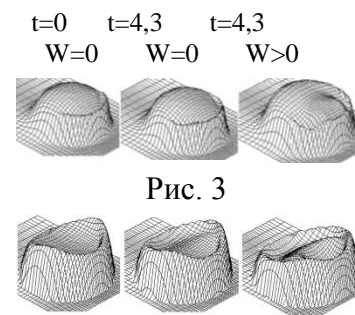


Рис. 3

Рис. 4

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кудиш И.И., Пановко М.Я. Колебания деформируемого цилиндра при его качении по жёсткому полупространству со смазкой // Трение и износ. 1992. Т. 13. № 5. С. 755-776.
2. Wijnant Y.H., Venner C.H. Analysis of an EHL circular contact incorporating rolling element vibration // Elastohydrodynamics '96, Fundamentals and Application in Lubrication and Traction. Amsterdam: Elsevier, 1997. P. 445-456.
3. Kudish I.I. On formulation of a non-steady lubrication problem for a non-conformal contact // Tribology Transactions. 1999. V. 42. № 1.

# ПОСЛОЙНЫЕ РЕНТГЕНОФОТОЭЛЕКТРОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕДЬСОДЕРЖАЩЕЙ ПЛЕНКИ В ДИНАМИКЕ ПУТИ ТРЕНИЯ СОПРЯЖЕНИЯ

С. Д. Пичугин

*Российский Государственный Университет нефти и газа  
имени И. М. Губкина, Россия, Москва*

Процессы трения и изнашивания подвижных сопряжений определяются свойствами тончайших поверхностных слоев металла и пленок, элементный состав и строение которых зависят от природы окружающей среды.

Взаимодействие металлических пар в условиях эффекта безызносности локализовано в медьсодержащей пленке, особой структуры и свойств, наличие которой обеспечивает низкий коэффициент трения и высокую износостойкость.

Исследование качественного и количественного состава слоев медьсодержащей пленки на поверхностях трения пары антифрикционный сплав-сталь, а также изучение степени окисления элементов в ее составе в динамике пути трения проводилось с привлечением рентгенофотоэлектронной спектроскопии.

Экспериментальные исследования процессов трения и изнашивания пары медный сплав – сталь в глицерине выполнялись на машине трения СМЦ-2. Образцы-колодки изготавливались из латуни Л63, стальные ролики – из стали 40 ХН. Шероховатость поверхностного слоя образцов, твердость стального образца, нагрузочно-скоростные параметры принимались для условий, наиболее благоприятствующих формированию медьсодержащей пленки. Путь трения был разбит на 6 участков от 70 до 2100 метров, в которых использовались новые образцы.

Установлен элементный состав, строение и толщина медьсодержащих пленок, как на стальном, так и на антифрикционном сплаве в диапазоне пути трения от 70 до 2100 метров.

Показано, что по всей толщине сформировавшихся металлсодержащих пленок на стальном и латунном образце наряду с медью присутствует и цинк.

На пути трения 2100 метров защитная пленка в зоне трения стального образца образовалась на подслое окисленных соединений железа, а в поверхностном слое медного сплава – на подслое окисленных соединений меди и цинка.

# МАНИПУЛЯТИВНОСТЬ И НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАБОЧЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ОДНОКОВШОВЫХ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЭКСКАВАТОРОВ

П.А. Побегайло

*ИМАШ им. А.А. Благодирова РАН, Россия, г. Москва*

Как известно «свойство манипулятивности – важное геометрическое свойство манипуляционных систем – характеризует возможность ориентировать захват в рабочем пространстве» [1 и др.]. Одноковшовый гидравлический экскаватор является, на наш взгляд, именно манипуляционной системой. Рабочее оборудование (РО) его – это, обычно, плоский трехзвенный манипулятор. При этом, изучением манипулятивности РО экскаваторов никогда и никто, по нашим данным, не занимался. Численная оценка манипулятивности может быть получена с помощью классического понятия – коэффициента сервиса [1 и др.].

При этом последовательность действий такова [2 и др.]:

- для рассматриваемой кинематической схемы РО строится рабочая зона. Далее, рассматривая т.н. осевой профиль рабочей зоны, строится прямоугольная (например) сетка с каким-то заданным шагом;

- для каждой отдельной точки построенной сетки рассматриваются различные положения ковша (третьего звена), перебираемые с каким-то заданным шагом в диапазоне 360 градусов. Такого рода фиксация ковша позволяет каждый раз успешно решать обратную позиционную задачу, выясняя, существует ли рассматриваемая конфигурация РО в данной точке. Это позволяет для каждой точки получить допустимый диапазон установки ковша. После этого для каждой точки рабочей зоны вычисляется значение коэффициента сервиса.

Анализ манипулятивности РО экскаваторов начат с экскаватора ЭГ-12А. Кинематическая схема РО с индивидуальным независимым приводом поворота стрелы, рукояти и ковша это первая рассматриваемая нами схема.

Предварительный анализ указанной кинематической схемы показал следующее:

- максимальные значения коэффициента сервиса лежат на уровне 0,15 (иными словами, допустимый диапазон установки ковша в рассматриваемых точках рабочей зоны не превышает 50 – 60 градусов). Визуальная оценка концентрации точек с большими значениями коэффициента сервиса позволяет заключить, что они лежат в центральной части рабочей зоны. Области около границы рабочей зоны характеризуются быстрым понижением значения коэффициента сервиса, особенно со стороны базовой машины. Можно предположить, что любые рабочие операции на участках рабочей зоны со значением коэффициента сервиса меньше 0,1 не являются рациональными (полученные данные можно применять при проектировании системы управления);

- оценка расположения допустимых интервалов установки ковша указывает, по-видимому, на не совсем рациональные параметры привязки гидроцилиндров к РО. В направлении совершенствования этих характеристик лежит значительный резерв повышения эффективности экскаваторов.

О других кинематических схемах РО одноковшовых гидравлических экскаваторов и некоторых иных геометрических свойствах РО будет сказано в самом докладе, т.к. объем настоящего текста весьма ограничен.

## Список литературы

1. Кобринский А.А., Кобринский А.Е. Манипуляционные системы роботов: основы устройства, элементы теории. М.: Наука, 1985. 344 с.
2. Побегайло П.А. Мощные одноковшовые гидравлические экскаваторы: выбор основных геометрических параметров рабочего оборудования на ранних стадиях проектирования. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. 235 с.

## КОЭФФИЦИЕНТ ПОТЕРЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ КАК ИНТЕГРАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МАШИНЫ

О.Н. Поболь<sup>1)</sup>, Г.И. Фирсов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>МГУТУ им. К.Г. Разумовского, Россия, Москва

<sup>2)</sup>Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Россия, Москва

Шумоизлучение текстильных машин на средних и высоких частотах, в области максимума, обусловлено изгибными колебаниями на резонансных частотах конструктивных элементов – прежде всего крупногабаритных деталей станин и корпусов механизмов. Их возбуждают потоки вибрационной энергии, возникающие под действием локальных силовых факторов случайного характера в кинематических парах передач и рабочих органов. При этом мощность излучения каждого из элементов будет зависеть от коэффициентов излучения и потерь в соответствующей полосе частот. В то время, как коэффициент излучения элемента в основном диапазоне практически постоянен и неизменен (в ВЧ-диапазоне  $\sigma \approx 1$ ), коэффициент потерь имеет большой потенциал управления. Таким образом, акустическая активность элементов механической структуры машины, генерируемая мощностью  $P_{in}$  виброактивных механизмов, в большой степени зависят от коэффициентов потерь, которые являются интегральными характеристиками демпфирующих свойств конструктивных элементов, обусловленных потерями энергии на внешнее трение в стыках и внутреннее трение в конструкционном материале. Величины коэффициентов потерь  $\eta$  на низких и средних частотах зависят прежде всего от демпфирующих свойств соединений, т.е. болтовых стыков деталей. В этом частотном диапазоне коэффициенты потерь  $\eta$  на порядок выше, чем коэффициенты потерь  $\eta_M$  тех же элементов вне конструкции. Коэффициент потерь материала элемента изменяется в диапазоне  $\eta_M = 0,015-0,005$  – наименьшие значения на высоких частотах. Коэффициент потерь после сборки в диапазоне 100-4000 Гц уменьшается с частотой. В основном частотном диапазоне, величина  $\eta$  зависит от потерь на трение скольжения в болтовых стыках элементов и обратно пропорциональна частоте. На низких частотах, обычно в области первых резонансов (до 100 Гц), коэффициент потерь постоянная величина  $\eta \approx 0,1$ . Затем он уменьшается с частотой до 3000-4000 Гц, где достигает значений коэффициента потерь на внутреннее трение конструктивных материалов  $\eta \approx 0,005$  и далее остается практически постоянным.

Представленные в докладе результаты исследований позволяют оценить возможности управления шумовым режимом в цехах посредством увеличения коэффициента потерь конструктивных элементов. Эффективным методом шумозащиты является применение вибропоглощающих материалов и конструкций. Основной способ реализации этого метода заключается в нанесении на вибрирующие поверхности несущих конструктивных элементов специальных покрытий из материалов, обеспечивающих большие внутренние потери колебательной энергии. В результате увеличивается коэффициент потерь конструкции  $\eta$ , подавляются резонансные колебания ее элементов и их шумоизлучение. Кроме того, повышается срок службы машин за счет уменьшения вибрационной усталости и износа.

# ИНТЕРФЕРЕНЦИОННО-ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЁРДОГО ТЕЛА: ИСТОРИЯ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

И.А.Разумовский

*ИМАШ РАН, Россия, Москва*

Доклад посвящён истории создания и практического применения интерференционно-оптических методов (фотоупругости, муара, голографической и спекл-интерферометрии, цифровой голографии и др.) для анализа напряжённо-деформированного состояния (НДС) элементов машин и конструкций. Кратко указаны основные этапы развития методов, выполненные специалистами в Института машиноведения РАН, связь направленности научно-методических разработок с практическими задачами, необходимость решения которых обуславливалась повышением эксплуатационных параметров конструкций новой техники (в первую очередь, ядерной и тепловой энергетики).

Изложены результаты разработок в области создания современного оборудования для проведения экспериментальных исследований в лабораторных и натуральных условиях, основанных на использовании цифровых представлений экспериментальной информации.

Рассмотрены методики исследования параметров НДС на основе комплексных подходов, включающих экспериментальную регистрацию полей перемещений и последующую обработку результатов экспериментов с использованием аналитических или численных методов. К ним относятся: методы исследования остаточных напряжений, определения параметров механики разрушения элементов конструкций с трещинами, деформационных характеристик материалов (включая композиты), оценки наличия и размеров дефектов и др. Особое внимание уделено разработкам, основанным на методологии обратных задач экспериментальной механики. При этом рассмотрены как подходы, основанные на аналитических решениях интегральных уравнений, так и способы определения различных параметров напряжённо-деформированного состояния натуральных объектов, базирующиеся на расчётной оценке искомых параметров из условия минимума целевой функции, комплексно отражающей соответствие экспериментальных данных, зарегистрированных интерференционно-оптическими методами, и результатов численных решений модельных задач с использованием МКЭ.

Приводятся примеры применения методов для исследования НДС узлов ЯЭУ в лабораторных и натуральных условиях, определения существенно неоднородных полей остаточных напряжений, виброповедения элементов ЯЭУ, взаимодействующих с жидкими средами, определения параметров механики разрушения, нагруженности и дефектности элементов конструкций с трещинами.

## Литература

1. Пригоровский Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений: Справочник. М.: Машиностроение. 1983. 248 с.
2. Rasumovsky I.A. Interference-optical Methods of Solid Mechanics/Series: Foundations of Engineering Mechanics. Springer. 2011. 270 p.
3. Разумовский И.А., Чернятин А.С. Определение нагруженности и дефектности элементов конструкций на основе минимизации расхождения между экспериментальными и расчетными данными//Заводская лаборатория. Диагностика материалов. № 1, часть I. 2012. С. 71-78.

## УПРАВЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ОСНОВЕ СИНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ФИНИШНОЙ ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКЕ

**Ю.П. Ракунов**

*Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства,  
Россия, Москва*

Современное изготовление деталей машин характеризуется высокими требованиями к их точности и надёжности при ужесточении условий эксплуатации. Актуальной задачей является разработка, изучение и совершенствование технологических методов, обеспечивающих высокое качество и производительность обработки, т.е. финишные и отделочные методы, которые окончательно формируют поверхностный слой деталей и определяют их эксплуатационные свойства и, прежде всего, износостойкость [1,2]. К таким методам относятся: точение закалённых сталей резцами из сверхтвёрдых материалов (СТМ), алмазное точение цветных металлов и финишное выглаживание различных материалов [3].

Для процесса направленного изменения свойств детали должно быть определено желаемое направление наиболее благоприятное для конечного состава и значений показателей качества, и очевидно, что для каждого этапа ТП должна быть сформирована технологическая среда, которая будет формировать оптимальные фактические свойства. Функционирование любой технологической системы можно рассматривать как взаимодействие одного её элемента со средой. Такими элементами могут быть: предмет производства (заготовка), технологический процесс (ТП), этап, установ, позиция, переход, проход.

По мере уменьшения припуска (сечения среза) на финишном этапе обработки, когда достигается микроскопическая и долемикронная точность, сила резания уменьшается настолько, что можно ожидать появления нелинейной технологической системы, поскольку организующий эффект силы резания уже утрачен. Например, такое состояние системы возникает в начале и на протяжении всего периода выхаживания при шлифовании. Новое состояние системы пока ещё изучено слабо [1]. Однако, именно это состояние определяет качественные показатели детали. Наиболее полно для изучения поведения указанных систем могут быть использованы принципы синергетики. Синергетика – наука о самоорганизующихся системах, которые возникают при определённых условиях. Второе определение синергетики связано с процессом (понятием) управления.

В результате экспериментов установлено, что после шлифования, хонингования и доводки поверхности имеют остроконечные высоты и что продольная шероховатость по величине не уступает поперечной. Полированная поверхность отличается притуплённостью микронеровностей, отсутствием острых пиков. Выглаженная поверхность характеризуется сглаженной, округлой формой профиля и малой величиной продольной шероховатости, поэтому обладает гораздо большей несущей способностью по сравнению с полированной, шлифованной и доведённой, что обеспечивает высокую износостойкость рабочих поверхностей. Во всех случаях износ выглаженной поверхности на 20÷40% ниже полированной и 1,5÷2 раза – шлифованной.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Суслов А.Г., Дальский А.М. Научные основы технологии машиностроения. – М.: Машиностроение, 2002, 684 с.
2. Ракунов Ю.П., Абрамов В.В., Дараев Я.А. Регулирование процесса повышения ресурса деталей машин точением гексанитом-Р и алмазным выглаживанием // Материалы 14-й Междунар. науч.-практ. конф. «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта». В 2 ч. Часть 1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 386 с.
3. Ракунов Ю.П., Хрульков В.А. Оптимизация влияния технологических факторов выглаживания на качество поверхностей деталей машин // Там же.



# НОРМАТИВНЫЙ, ВЕРОЯТНОСТНЫЙ И ОСНОВАННЫЙ НА УПРАВЛЕНИИ РИСКОМ ПОДХОДЫ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЗАЩИЩЕННОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Д.О.Резников  
ИМАШ РАН, Россия, Москва

Широкое разнообразие методов обеспечения защищенности при проектировании сложных технических систем (СТС) разрабатывается в рамках трех принципиально различных подходов [1,2]:

1) Нормативный подход к обеспечению защищенности, основанный на обеспечении запасов по основным механизмам достижения предельных состояний. Этот подход предполагает проектирование и эксплуатацию объекта таким образом, чтобы выполнить условия по обеспечению защищенности по основным механизмам достижения предельных состояний  $i = 1, 2, \dots, k$  на протяжении всего срока эксплуатации объекта  $T_3$ :

$$n_i(t) > [n_i(t)], \quad \forall t \in [0; T_3], \quad \forall i = 1, 2, \dots, k, \quad (1)$$

где  $n_i(t)$  - фактический запас по  $i$ -му механизму достижения предельных состояний;  $[n_i(t)]$  - нормативное предельно-допустимое значение запаса по  $i$ -му механизму достижения предельных состояний.

2) Подход к обеспечению защищенности по критерию надежности, основанный на оценке вероятностей достижения предельных состояний  $P_{F_i}(t)$   $i = 1, 2, \dots, k$  и созданию условий, чтобы эти величины не превышали нормативных предельно-допустимых значений  $[P_{F_i}(t)]$ .

$$P_{F_i}(t) < [P_{F_i}(t)], \quad \forall t \in [0; T_3], \quad \forall i = 1, 2, \dots, k. \quad (2)$$

3) Подход к обеспечению защищенности по критерию рисков, предполагающий оценку вероятности реализации предельных состояний  $P_{F_i}(t)$  и ущербов от такой реализации  $U_{F_i}(t)$ , а также создание условий для того, чтобы величина функционала риска  $R(t)$  не превосходила предельно допустимой величины  $[R(t)]$ :

$$R(t) = \sum_{i=1}^k (P_{F_i}(t) \cdot U_{F_i}(t)) < [R(t)] \quad \forall t \in [0; T_3]. \quad (3)$$

В докладе проводится сопоставительная оценка представленных подходов к обеспечению защищенности СТС. Представлены примеры реализации этих подходов при различных механизмах достижения предельных состояний. Рассмотрены условия, при которых эти подходы могут считаться эквивалентными.

## Литература

1. Н.А.Махутов, Д.О.Резников. Сопоставительная оценка нормативного и основанного на управлении риском подходов к оценке защищенности сложных технических систем//Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011 №6, с.92-98
2. Н.А.Махутов, Д.О.Резников. Анализ и обеспечение защищенности объектов критических инфраструктур с учетом рисков и предельных состояний//Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. №5, 2012., с.14-35

# PHASE SYNCHRONIZATION OF CHAOTIC SYSTEMS; FROM THEORY TO EXPERIMENTAL APPLICATIONS

**M.G. Rosenblum**

*Universitat of Potsdam, Germany, Potsdam*

1. It is demonstrated that synchronization phenomena in periodic, noisy and chaotic oscillators can be understood within a unified framework. This is achieved by extending the notion of phase to the case of continuous-time autonomous chaotic systems. Phase is introduced as a variable corresponding to the zero Lyapunov exponent.

(a) If the system admits construction of a Poincaré map, then, for each piece of a trajectory between two cross-sections with the Poincaré surface of section, the phase is defined as linear function of time, so that it gains  $2\pi$  with each return to the surface of section. The method can be adopted to phase estimation from scalar experimental signals.

(b) The phase can be efficiently estimated from such a projection of the strange attractor, where all the trajectories rotate around the origin, as the polar angle in this projection. The phase can also be estimated from an oscillatory observable by means of the Hilbert Transform.

2. A chaotic oscillator can be  $n:m$  entrained by a weak external force; two nonidentical oscillators can synchronize due to a weak coupling. These effects can be described in terms of phases and corresponding mean frequencies. Synchronization properties of chaotic systems are qualitatively similar to those of noisy oscillators. Depending on the distribution of the Poincaré return times chaotic system can synchronize like a limit cycle oscillator with bounded or unbounded noise. In the former case there is a range of parameter mismatch where frequencies are perfectly locked and the phase difference between the oscillators fluctuates around a constant; outside synchronization region the phase dynamics are intermittent.

3. Transition to phase synchronization is reflected in the spectrum of Lyapunov exponents: one of the zero Lyapunov exponents of the combined system becomes negative what corresponds to the stability of the phase difference. Two positive Lyapunov exponents remain positive, reflecting the irregularity of chaotic amplitudes; the latter are practically uncorrelated in the state of phase synchronization. Thus, phase synchronization transition is a transition within hyperchaos.

4. Ensembles of nonidentical chaotic oscillators exhibit Kuramoto self-synchronization transition. This is observed even for systems with ill-defined phase. Synchronization is also possible in chains of nonidentical nearestneighbor coupled oscillators. Depending on the parameter mismatch, synchronization transition in chains occurs either smoothly or via formation of clusters.

5. Coupled nonidentical chaotic oscillators can exhibit effect of lag synchronization. If the coupling is increased beyond the threshold of phase synchronization, the amplitudes become dependent as well, and lag synchronization appears as a nearly perfect coincidence of shifted in time states of two systems.

6. Synchronization of systems for which there exist no well-defined phase can be however characterized indirectly. Onset of synchronization by external force can be traced by resonance-like increase of the average field in an ensemble of identical systems having different initial conditions. Next, synchronization can be revealed with the help of ensembles of auxiliary limit cycles oscillators. These ensembles can be considered as a device for locking-based frequency measurements. This method is easily implementable in experiments and can be exploited in analysis of many coupled oscillators.

## МЕТОД ПОЛУЧЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАНЕТАРНОГО РОЛИКО-ВИНТОВОГО МЕХАНИЗМА

О.А. Ряховский, А.С. Марохин

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия,  
Москва

Одним из наиболее перспективных преобразователей вращательного движения в поступательное является планетарный роliko-винтовой механизм (ПРВМ). В настоящее время производятся следующие ПРВМ: с ведущим винтом, с ведущей гайкой, ПРВМ с рециркуляцией роликов. Основными элементами любого ПРВМ, существующих и конструкций являются: винт, гайка, ролики, сепараторы.

В ПРВМ необходимое осевое перемещение выходного звена может создаваться либо за счет разности углов подъема резьб ролика и винта (механизмы с ведущим винтом), либо за счет разности углов подъема резьб ролика и гайки (механизмы с ведущей гайкой).

По сравнению с передачей винт-гайка скольжения в ПРВМ обладает более высоким КПД так как трение скольжения в основном заменено трением качения. В сравнении с шарико-винтовым механизмом, ПРВМ аналогичного типоразмера обладает большей грузоподъемностью, за счет увеличения числа точек контакта и большим КПД.

В России разработкой методов проектирования занимаются исследователи Владимирского ГУ, МГТУ им. Н.Э. Баумана [1], [2], Волжского машиностроительного завода г. Тольятти, МГТУ «Станкин».

В работе представлен метод получения геометрических параметров элементов ПРВМ с ведущей гайкой и ПРВМ с ведущим винтом. Основное выражение, связывающее геометрические параметры ПРВМ с ведущей гайкой с осевым перемещением винта имеет вид:

$$i_{\text{ПРВМ}} = P \cdot \left( 1 - \frac{1 + 2 \cdot C}{2 \cdot (1 + C)} - \frac{\Delta}{d_{\text{в}}(1 + C)} \right) \cdot \left( Z_{\text{р}} \cdot \left[ \frac{1 + 2 \cdot C}{C} + \frac{2\Delta}{d_{\text{в}}} \cdot C \right] - Z_{\text{г}} \right) \quad (1)$$

где  $i_{\text{ПРВМ}}$  – осевое перемещение винта (подача), мм/об;

$P$  – шаг резьбы, мм;

$\frac{Z_{\text{р}}}{Z_{\text{в}}} = C$  – отношение заходностей резьб ролика и винта;

$Z_{\text{г}}$  – заходность резьбы гайки (искомая величина);

$Z_{\text{р}}$  – заходность резьбы ролика;

$d_{\text{в}}$  – средний диаметр резьбы винта, мм;

$\Delta$  – радиальное увеличение диаметра гайки за счет разность углов подъема резьб гайки и ролика, мм.

Список литературы:

1. Конструкции, теория и методика проектирования и исследования планетарных передач винт-гайка с резьбовыми роликами и мехатронных модулей на их базе : монография / В.В. Козырев ; Владим. гос. ун-т. – Владимир : Изд-во Владим. гос. ун-та, 2011 – 238 с. – ISBN 978-5-9984-0108-4.
2. Планетарные роlikoвинтовые механизмы. Конструкции, методы расчетов / Д.С. Блинов Под ред. Проф. О.А. Ряховского. –М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. –222 с: ил. - ISBN 5-7038-2979-8

# РАЗРАБОТКА СОВРЕМЕННЫХ МАШИН-АВТОМАТОВ: ЗАДАЧИ И РЕШЕНИЯ

**Б.Л.Саламандра, Л.И.Тывес, К.Б.Саламандра, Г.К.Корендясев, Ф.И.Батырь,  
Г.Н.Орлова**

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

В настоящее время рынок требует постоянного совершенствования конечного продукта и его упаковки. Современный подход к созданию автоматических линий опирается не только на оригинальные механизмы, но и на новую элементную базу в области приводов, систем управления на базе программируемых контроллеров, датчиков физических, в том числе, механических величин, и т.д. Такие технические решения определяют мехатронную структуру автоматических линий и позволяют, с одной стороны, выйти на более высокий научно-технический уровень создаваемого оборудования и создать конкурентоспособную модель автомата, а с другой стороны – существенно (в 1,5-2 раза) уменьшить стоимость создаваемого оборудования. Уменьшение стоимости оборудования обусловлено как модульным принципом конструкции, когда все основные агрегаты конструктивно идентичны, так и мехатронным принципом применяемого привода, когда силовые элементы (пневмоцилиндры) органично связаны с системой управления (контроллером) и образуют единый машинный агрегат. Примером такой автоматической линии является созданная автоматическая линия для фасовки и упаковки пастообразных продуктов, разработанная совместно с научно-производственной фирмой «Рекупер».

Работает линия следующим образом. Термопластический материал поступает в нагреватель, где под контролем терморегулятора переходит из твёрдого состояния в высокопластичное. Далее он подаётся на позицию формовки ёмкости, где выдувкой (англ. «blister» – пузырь) получают формы. На позиции загрузки дозатором формы заполняются продуктом. Затем формы с продуктом накрываются покровным материалом, например, фольгой. В следующей позиции происходит сварка фольги с материалом форм. Сварка осуществляется при контролируемой длительности, температуре и давлении. На финишной позиции – в устройстве вырубке – укупоренные формы с продуктом разделяются на отдельные элементы и блоки.

Автомат оснащается контроллером и значительным количеством датчиков, размещаемых практически во всех его технологических узлах и блоках. Через систему управления происходит согласование и синхронизация работы приводов исполнительных и всех вспомогательных механизмов автоматической линии.

Решена специальная задача совмещения положений отформованных ёмкостей в ленте корпусного материала с этикетками на ленте покровного материала.

Разработана имитационная модель управления мехатронной цикловой системой автоматизации производственных процессов. Она отслеживает на каждой из операций (формовка, дозировка, укупорка и вырубка) в зависимости от состояния линии, материалов на ее входах, режимов работы и их смены, все возможные нештатные ситуации и сепарацию бракованных изделий.

Решены задачи, связанные с технологией выполнения тех или иных операций. В рассматриваемой линии к ним можно отнести: стабилизацию температуры нагрева термопластичного материала перед выдувкой ёмкостей и температуры инструмента термосварки; дозирование продукта с точностью, определенной государственными стандартами, и, наконец, совмещение рисунка на покровном материале (например, фольге) с верхним контуром формы. Решение каждой из них необходимо для выпуска на линии кондиционного продукта.

## ОСОБЕННОСТИ МНОГОСКОРОСТНЫХ ДВУХ- И ТРЕХПОТОЧНЫХ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

К.Б. Саламандра

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

Основным направлением совершенствования ступенчатых коробок передач транспортных средств является увеличение количества реализуемых коробкой ступеней при одновременном стремлении увеличить КПД и улучшить массогабаритные характеристики за счет уменьшения числа используемых зубчатых пар и элементов управления.

Получившие в последнее время широкое распространение коробки передач с двумя сцеплениями состоят из зубчатых механизмов с неподвижными осями колес и обладают достаточно высоким КПД, т.к. на каждой ступени работают одна или две пары зубчатых колес. Но для включения каждой ступени в коробках передач этого типа необходима отдельная муфта управления. Для уменьшения количества муфт соседние муфты объединяют. В результате одна муфта с тремя положениями отвечает за включение двух ступеней. Например, 7-ми ступенчатая коробка передач DSG фирмы Volkswagen [1] содержит 2 сцепления и 4 трехпозиционные муфты.

В дифференциальных коробках передач, состоящих из планетарных механизмов, количество ступеней определяется числом и типом планетарных механизмов, а также количеством элементов управления. Например, 7-ми ступенчатая коробка передач [2] содержит 2 муфты, 4 тормоза, 1 муфту свободного хода, редуктор Равинье и 2 однорядных планетарных механизма. В 8-ми ступенчатой коробке передач [3] используются 3 муфты, 2 тормоза и 4 однорядных планетарных механизма. 9-ти ступенчатая коробка [4] содержит 3 муфты, 3 тормоза и 4 однорядных планетарных механизма.

В ИМАШ РАН разработан метод синтеза многопоточных вально-планетарных коробок передач [5]. С использованием этого метода был получен ряд кинематических схем двух- и трехпоточных коробок передач. Эти коробки состоят из дифференциалов и механизмов с неподвижными осями колес. Число потоков определено количеством дифференциалов. Двухпоточные коробки передач имеют в своем составе один дифференциал, трехпоточные – два дифференциала.

Например, синтезированные двухпоточные 8-ми ступенчатая [6] и 12-ти ступенчатая [7] коробки передач, различающиеся местом расположения дифференциала, имеют всего по 4 трехпозиционных муфты.

Синтезированная схема 13-ти ступенчатой трехпоточной коробки передач имеет лишь 3 трехпозиционные и 2 двухпозиционные муфты.

1. Патент DE 19821164 Doppelkupplungsgetriebe. 18.11.1999.
2. Патент US 6302820 Planetary Speed Change Transmission. 16.10.2001.
3. Патент WO 2006/074707 Multispeed Transmission. 20.07.2006.
4. ZF Friedrichshafen Brochure: "Heading for a whole new dimension" [http://www.zf.com/corporate/en/products/innovations/9hp\\_automatic\\_transmission/9hp\\_automatic\\_transmission.html](http://www.zf.com/corporate/en/products/innovations/9hp_automatic_transmission/9hp_automatic_transmission.html), дата обращения 29.04.2013.
5. Саламандра К.Б., Крайнев А.Ф., Рагхаван Мадхусудан, Саламандра Б.Л. Анализ и синтез двухпоточных многоскоростных передач транспортных машин. // Справочник. Инженерный журнал. – 2012. - № 5. – стр. 35 – 41.
6. Патент России № 2391588 Коробка передач. 2010. Бюл. № 16.
7. Патент US 8360919 Multi-speed transmission. 29.01.2013.

# МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

**А.В. Сахаров**

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

Современное машиностроительное производство характеризуется широкой и быстро меняющейся номенклатурой выпускаемых изделий. В этих условиях важно знать технологические возможности производства по выпуску деталей, которые определяются как сумма технологических возможностей имеющихся станков. Технологические возможности станка – это перечень изготавливаемых на нем предметов производства, их конструкции, размеры, соотношения размеров и качество.

Исследование паспортных данных и рекламных проспектов различных типов станков показало, что приводимые в них формулировки назначения не раскрывают технологические возможности станков [1].

Это приводит к затруднениям в формировании производственной программы предприятия, препятствует автоматизации процедуры выбора станков, что особенно важно для САПР ТП, а также нередко приводит к ошибкам, когда выбранный станок не обеспечивает заданных технологических требований. Также возникают трудности при приобретении станков.

В связи с этим определение технологических возможностей станка является актуальной задачей, для решения которой надо в первую очередь разработать методику определения технологических возможностей станка.

Первой и главной характеристикой технологических возможностей станка является предмет производства. В существующих формулировках назначения станков под предметом производства в одних случаях принимают вид поверхности, в других – совокупность поверхностей или деталь. Однако совокупность поверхностей отличается практически неограниченным разнообразием, как по составу поверхностей, так и возможных сочетаний поверхностей и их характеристик. Также и деталь отличается неограниченным разнообразием конструкций, размеров, точности и шероховатости.

В связи с этим было предложено принять в качестве предмета производства на станке модуль поверхностей (МП)[2], отличающийся ограниченным множеством и постоянством конструкций. Тогда под технологическими возможностями станка будет пониматься

его способность изготавливать перечень конструкций МП определенными диапазонами размеров, точности и шероховатости поверхностей и деталей с определенными габаритными размерами.

Была разработана методика определения множества МП, изготавливаемых на станке. На первом этапе методики определяются конструкции МП, а на втором устанавливаются диапазоны значений их характеристик (размеров, точности и шероховатости поверхностей), которые могут быть получены на станке.

## Литература

1. Базров Б.М., Сахаров А.В. Анализ формулировок служебного назначения и технических характеристик различных типов станков // Доклад на Третьей Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», 22 – 25 сентября 2010 г.
2. Базров Б.М. Определение технологического потенциала станочного парка / Доклад на XI международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века». Севастополь, 13-18 сентября 2004 г., 6 с.

## КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЖЕСТКОСТИ МНОГОКООРДИНАТНЫХ МАШИН С ЧПУ

Н.А. Серков <sup>1)</sup>, И.С. Шлесберг <sup>2)</sup>, А. А. Мерзляков <sup>1)</sup>, И.В. Никуличев. <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> - ИМАШ РАН, РФ, г. Москва, <sup>2)</sup> – ОАО НИАТ, РФ, г. Москва

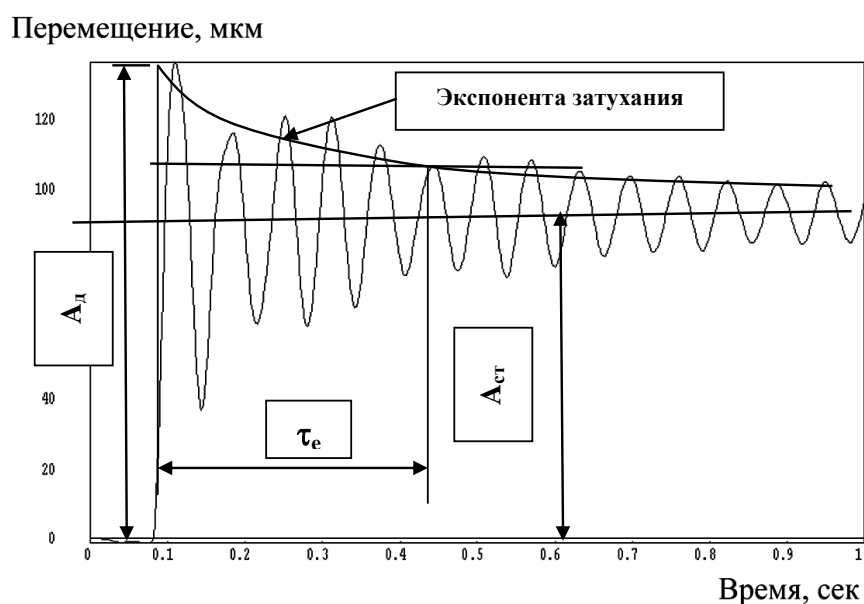
Жесткость - одно из основных свойств машины, определяющее его точность, надёжность, экономичность и долговечность. При исследовании жесткостных свойств машины различают статическую и динамическую жесткости.

В работе представлены результаты измерения интегральной статической и динамической жесткости 5-координатного станка МС-300 (ОАО НИАТ). Исследование статической и динамической жесткости проводилось с помощью измерительных устройств, разработанных и изготовленных совместно ИМАШ РАН и ОАО НИАТ. Устройство измерения статической жесткости позволяет измерять «петлю жесткости» (сжатие - растяжение) при одной установке его на станке. Интегральная динамическая жесткость определяется по отклику на силовое ступенчатое воздействие, реализуемое нагружающим устройством (винтовым домкратом) и спусковым устройством. Предложена комплексная оценка жесткости многокоординатных машин с ЧПУ, включающая 4 составляющие, определяемые по отклику на силовое ступенчатое воздействие (рисунок):

1.  $k_{ст} = 500/A_{ст}$  [Н/мкм] – интегральная статическая жесткость,
2.  $k_d = A_{дин}/A_{ст}$  – коэффициент динамичности,
3.  $\tau_e$  - время релаксации – промежуток времени, в течение которого амплитуда затухающих колебаний уменьшается в  $e$  раз (2,718...),
4.  $f_{осн}$  - основная собственная частота переходного процесса.

Сравнивая несущие системы машин по указанным 4 параметрам можно говорить, что чем меньше  $k_d$  и  $\tau$  и больше  $k_{ст}$ , тем выше жесткость несущей системы и лучше демпфирующие свойства. Знание основной собственной частоты является очень важным при эксплуатации машины для выполнения условия, чтобы внешние вынужденные колебания не были вблизи с  $f_{осн}$ .

Проведен анализ жесткости и работоспособности в соответствии с предложенной методикой для нескольких машин с ЧПУ.



## ПОВЫШЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ МНОГОКООРДИНАТНЫХ МАШИН С ЧПУ МЕТОДАМИ ЦИФРОВОЙ КОРРЕКЦИИ

**Н.А. Серков**  
*ИМАШ РАН, РФ, г. Москва*

Многокоординатная машина с ЧПУ – это совокупность механизмов, осуществляющих движение исполнительного органа по заданной траектории в пространстве путем взаимосвязанного управления отдельными координатными приводами.

Геометрическая точность многокоординатной машины с ЧПУ – это оценка «близости» действительной пространственной траектории движения исполнительного органа к заданной (программной) траектории, воспроизводимой в режиме «холостого хода», т.е. без выполнения рабочего процесса. (Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions). «Способность» машины сохранять геометрическую точность при действии различных сил при выполнении рабочего процесса оценивается показателями статической и динамической жёсткости её несущей системы, а при тепловых воздействиях - показателями термостабильности.

Высокая геометрическая точность многокоординатной машины является базовым (необходимым) условием достижения высокой точности её работы, в частности, является предпосылкой получения готовой детали без проведения её пробной обработки на многокоординатном станке с ЧПУ.

Объёмная точность многокоординатной машины зависит от большого числа факторов: точности изготовления деталей и узлов, статической и динамической жёсткости несущей системы машины, температурной стабильности конструкции и др.

Все направления повышения точности многокоординатной машины с ЧПУ разбиваются на две большие группы:

1) совершенствование конструкции НС машины и технологии её изготовления (уменьшение случайной и функциональной составляющих),

2) совершенствование процесса управления машиной методами цифровой коррекции, направленное на уменьшение функциональной составляющей.

Под цифровой коррекцией понимается воздействие на процесс управления машиной путем использования средств вычислительной техники на основе информации о первичных и интегральных отклонениях в несущей системе, получаемой различными средствами измерения.

Наибольший эффект повышения точности достигается сочетанием рассмотренных направлений.

Цифровая коррекция первичных и интегральных отклонений взаимного положения исполнительных органов многокоординатной машины может осуществляться различными способами:

1) частичная коррекция первичных отклонений механизмов НС машины

2) полная коррекция всех первичных отклонений механизмов НС машины,

3) коррекция по результатам измерения интегральных отклонений взаимного положения ИО машины,

4) коррекция путём изменения параметров кинематической модели, положенной в основу управления машиной.

В докладе рассмотрены различные цифровые способы коррекции пространственной траектории исполнительных органов многокоординатной машины с ЧПУ и выявлены перспективы их развития.



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ПЛЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГТД В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**Б.М. Силаев, Е.Н. Мальцев**

*ФГБОУ ВПО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)», Россия, г. Самара*

Показана высокая актуальность разработки эффективной системы очистки проточной части авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), загрязняемой в зависимости от условий эксплуатации пылью, солями, частицами масла, несгоревшими остатками топлива и др. При этом толщина отложений посторонних веществ на деталях проточной части компрессора может достигать до 1...2 мм. Указанные отложения существенно ухудшают характеристики двигателей – снижение эффективного КПД может достигать до 2...3 % и возрастание расхода топлива до 8...10 %.

Для восстановления топливно-энергетических характеристик двигателей в настоящее время применяют различные методы очистки проточной части. В докладе рассматривается метод влажной очистки проточной части ГТД, в основу которой принято явление гидрогазовой эрозии пленки загрязнений, т.е. изнашивание – разрушение её при движении дисперсной системы частиц жидкой среды в воздушно-газовом потоке работающего двигателя.

Из рассмотрения физических процессов при движении воздушно-жидкостного потока по проточной части двигателя выполнено содержательное описание функционирования системы и процесса очистки, проведена структуризация концептуальной модели системы, позволяющая рассматривать её параметры во взаимодействии с рабочими и конструктивными параметрами двигателя. Показана перспективность использования скомпонованной многофакторной концептуальной модели системы влажной очистки проточной части ГТД как основы для анализа по выявлению наиболее значимых факторов и выбору направлений расчетно-аналитических и экспериментальных исследований. Однако, общее решение системы уравнений, отражающей концептуальную модель системы влажной очистки, представляется весьма сложным и затруднительным. В этой связи реализацию поставленной задачи по очистке предложено проводить путем декомпозиции концептуальной модели на отдельные компоненты – модели второго уровня. Одна из них представляет собой математическую модель процесса влажной очистки, описывающая непосредственно процесс изнашивания-разрушения пленки загрязнений на деталях проточной части двигателя, вторая – отражает геометро-кинематическую модель устройства для реализации указанного процесса.

На основе полученных моделей созданы алгоритмы расчета параметров процесса очистки и устройства. Обоснованы и созданы малоразмерная стендовая установка, на которой проведены экспериментальные исследования, подтверждающие адекватность разработанных моделей. Положительные результаты получены при опытно-промышленных испытаниях ГТД.

Предлагаемые к рассмотрению модельные представления, разработанные на основе положений теории изнашивания, позволяют обоснованно подходить к разработке системы влажной очистки, обеспечивающей стабильность исходных эксплуатационных характеристик и надежности авиационных ГТД разнообразного назначения.

# МЕХАНИЗМ ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ВОДИТЕЛЕЙ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И ПИЛОТОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Скворцов С.А., Глазунов В.А., Костерева С.Д.

*ИМАШ РАН, РФ, г. Москва*

Механизмы параллельной структуры являются перспективным средством для создания тренажеров для подготовки летчиков и водителей транспортных средств [1-3]. Часто используют схемы с шестью кинематическими цепями, однако при этом цепи могут ограничивать взаимное движение. Поэтому появились схемы с тремя цепями, однако при этом механизм может быть не достаточно жестким. Поэтому наиболее предпочтительным, с точки зрения структуры, может быть механизм с четырьмя цепями (Рис. 1), который содержит основание 1, выходное звено 2, подвижные каретки 3, 3', 3'', 3''', начальные кинематические пары 4, 4', 4'', 4''', промежуточные пары 5, 5', 5'', 5''' и 6, 6', а также промежуточные звенья 7'' и 7'''.

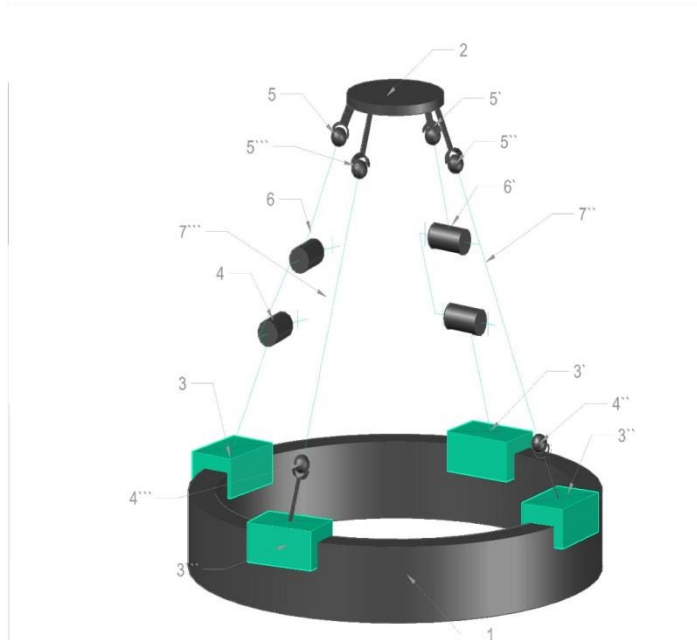


Рис.1

Достоинством этого механизма является достаточная нагрузочная способность при наличии объемной рабочей зоны.

Литература:

1. J.-P.Merlet: Paralle Robots. 2000. Kluwer. 396 p.
2. В.А.Глазунов, А.Ш.Колисков, А.Ф.Крайнев. Пространственные механизмы параллельной структуры. Москва, «Наука» 1991г.
3. В.А.Глазунов. Структура пространственных механизмов, группы винтов и структурные группы. Справочник. Инженерный журнал. 2010. Приложение № 3. 24 с.

## НОВЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ПЕРЕРАБОТКИ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

И.Г. Соловьёв, В.А. Петушков, В.И. Луцки, Ю.В. Чурсанов, В.Ф Соколов

*ИМАШ РАН, ТвГТУ, г. Тверь*

Проблема утилизации бытовых и промышленных отходов с каждым годом становится все более острой во всём мире. Только в России объём отходов ежегодно увеличивается более чем на 160 млн. т.

На сегодняшний день разработаны и используются в основном энергоёмкие технологии уничтожения отходов (лазерные, плазменные, термохимические), загрязняющие окружающую среду. Поэтому переработка отходов и возобновляемых источников углеводородов для производства полезных продуктов и снижения газовых выбросов является одной из самых актуальных проблем современной науки и промышленности. Именно этой теме и посвящена настоящая работа.

Разработаны технологии и оборудование, в основе которых лежат термохимические процессы (пиролиз, коксование, физико-химическая активация), позволяющие перерабатывать самые разные углеводороды и получать в результате углистые вещества и пиротопливо в жидком или газообразном виде, а также сорбенты.

Эти разработки основаны на комплексе выполненных научных исследований в области химии, механики и термодинамики сплошных сред, связанных с выбором оптимальных условий протекания химических реакций и режимов тепло - и массопереноса многофазных реагирующих сред, выбором конструкционных материалов и обоснованием надёжности и ресурса оборудования.

С помощью созданных лабораторных стендов и пилотной установки исследованы режимы переработки различных углеродосодержащих материалов (отходов): автошин и их карбонизата, древесины (опилок, стволовой древесины, коры), остатков сточных вод и работы птицефабрик, костры, соломы, шелухи, нефтешламов, в том числе донных.

Для них разработаны режимы получения требуемых продуктов переработки: от пирогазов (ПГ) с  $Q^p_h = 50$  МДж/м<sup>3</sup>, до углистого вещества (УВ) с содержанием углерода  $\geq 92\%$ , сорбентов с высокой активностью и пирожидкостей (ПЖ) с  $Q^p_h = 40$  МДж/кг. При этом, что очень важно, их содержанием в продуктах можно управлять в пределах: ПГ – 20-100%, ПЖ – 0-70%, УВ – 0-52%.

Полученный спектр режимов позволяет использовать разработанные процессы для выработки эл. энергии (ПГ = 100%) с помощью газотурбинных установок (ГТУ), для металлургических процессов типа OxіCup (УВ - 52% с содержанием С 92% и более) или в качестве топлива (печного, корабельного, частичной замены дизельного) (ПЖ – 60-70%), а также сорбентов с удовлетворительной активностью.

В основу работы реакторов установки положены активные гидродинамические режимы. Экспериментально обоснованы геометрические характеристики и конструкционные параметры аппаратов. Построены методики их инженерных расчётов. Подобраны катализаторы и адсорбенты, для очистки ПГ и ПЖ. Прделанная работа позволила выйти на создание полномасштабных промышленных установок и организацию их производства.

Получены заказы от российских и зарубежных компаний на установки мощностью 30 тыс.т/год по переработке отходов птицефабрик и остатков сточных вод и 10 тыс.т/год по переработке карбонизата автошин. Канадская компания ASTQ сделала заказ на установки большой мощности (до 150 тыс.т/год) по переработке биомасс с выходом пирогазов на ГТУ

## СТАЛЬ И ЧУГУН: КОНКУРЕНЦИЯ ПРОДОЛЖАЕТСЯ В ОБЛАСТИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ СОСТОЯНИЙ

**Л.А. Сосновский<sup>1)</sup>, П.А. Витязь<sup>2)</sup>, В.А. Гапанович<sup>3)</sup>,  
В.В. Комиссаров<sup>4)</sup>, Н.А. Махутов<sup>5)</sup>, Н.В. Псырков<sup>6)</sup>**

<sup>1)</sup>ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Беларусь, Гомель

<sup>2)</sup>Президиум НАН Б, Беларусь, Минск

<sup>3)</sup>ОАО «Российские железные дороги», Россия, Москва

<sup>4)</sup>Белорусский государственный университет транспорта, Беларусь, Гомель

<sup>5)</sup>ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН, Россия, Москва

<sup>6)</sup>ПО «Гомсельмаш», Беларусь, Гомель

В докладе анализируются тенденции мирового производства чугуна и стали, а также технико-экономические аспекты проблемы. Сообщается о разработке специального (патент РБ №15617) высокопрочного чугуна (ВЧ) марки ВЧТГ (Т – ООО «НПО ТРИБОФАТИКА», Г – ПО «Гомсельмаш») и дается сравнение диаграммы пластичность-прочность (рисунок 1) для чугуна ВЧТГ, зарубежных ВЧ, закаленных и упрочненных сталей. В таблице 1 дано сравнение свойств сопротивления усталости чугуна и стали. На рисунке 2 показаны особенности диаграммы прочность-пластичность чугуна ВЧТГ в равнении с чугунами зарубежного производства.

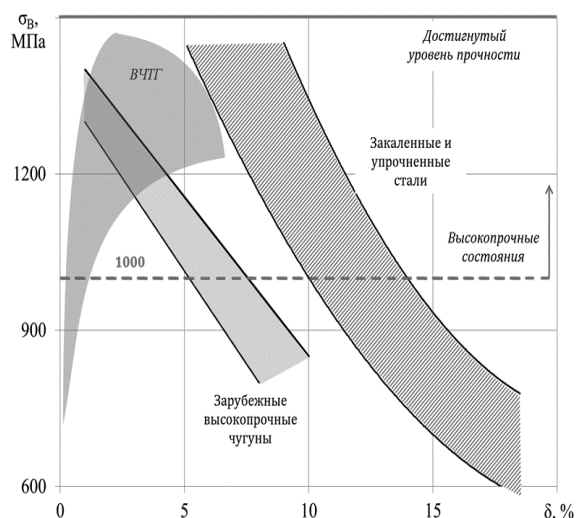


Рисунок 1 – Чугун и сталь: диаграмма пластичность-прочность

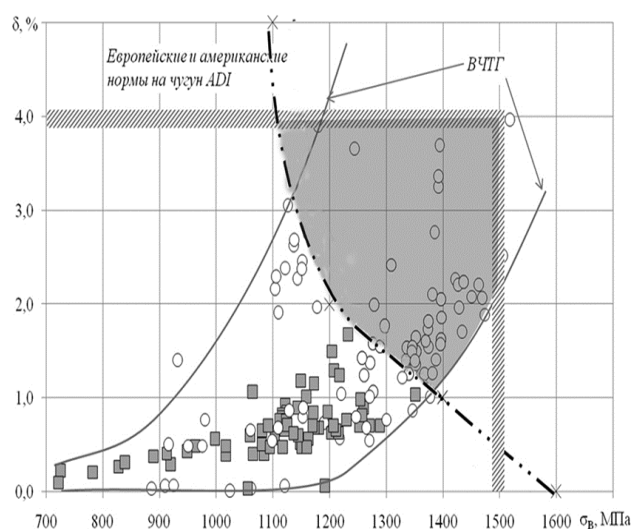


Рисунок 2 – Чугун ВЧТГ: диаграмма прочность-пластичность

Таблица 1 – Чугун и сталь: пределы выносливости

Материал	HB <sub>min</sub>	HB <sub>max</sub>	Предел контактной усталости, МПа		Предел выносливости при изгибе, МПа	
			P <sub>fmin</sub>	P <sub>fmax</sub>	σ <sub>-1min</sub>	σ <sub>-1max</sub>
ЧУГУН с шаровидным графитом (ISO 6336-5:2003(E))	200	300	550,0	700,0	210,0	248,0
Легированная термоупрочненная СТАЛЬ (ISO 6336-5:2003(E))	200	390	706,6	1123,1	302,6	370,6
ВЧТГ (плавка №25)	320	360	900	1050	270	310

В докладе анализируются возможности и эффективность замены стали на чугун для изделий ответственного назначения. Эффективность такой замены подтверждается практическими примерами.

**Л.А. Сосновский<sup>1)</sup>, С.С. Щербаков<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Межведомственная лаборатория «ТРИБОФАТИКА»,  
 Беларусь, Гомель-Минск-Гродно

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет, Беларусь, Минск

Механотермодинамическая (МТД) система в общем случае представляет сплошную термодинамическую среду с распределенными (рассеянными) в ней твердыми телами, взаимодействующими как между собой, так и со средой (рисунок 1).

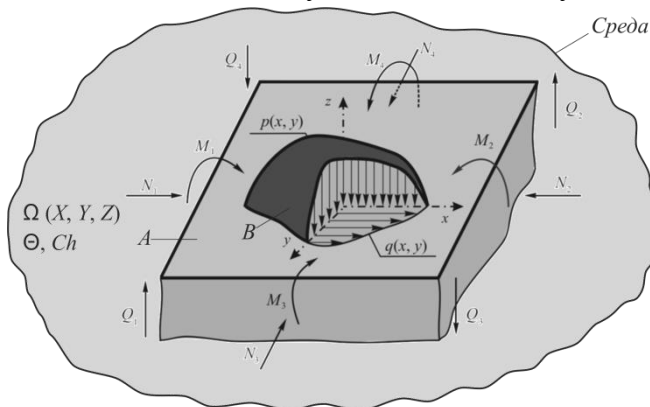


Рисунок 1 – Схема элементарной механотермодинамической (МТД) системы

В докладе с наиболее общих – энергетических позиций, систематизируются и обобщаются результаты исследований [1–5] состояний поврежденности, предельных, а также запредельных (закритических) состояний МТД-системы. Излагается гипотеза об эволюции такой системы, графическая иллюстрация которой представлена на рисунке 2. Комплекс работ выполнен при сотрудничестве с учеными ИМАШ РАН и др.

**Список литературы**

1 Sosnovskiy L.A. Tribo-Fatigue.Wear-fatigue damage and its prediction (Foundations of engineering mechanics). Series: Foundations of Engineering Mechanics.– Springer, 2005. –424 p.

2 Сосновский Л.А., Щербаков С.С. Возможности построения механо-термодинамики // Наука и инновации. –2008. –№ 2 (60). –С.24-29.

3 Сосновский Л.А., Щербаков С.С. Сюрпризы трибофатики. – Гомель: БелГУТ, 2005. –192 с. (есть перевод на англ. яз.:

Sosnovskiy L.A., Sherbakov S.S.Surprises of Tribo-Fatigue. –Minsk: Magicbook, 2009. –200 p.).

4 Sosnovskiy L.A., Sherbakov S.S. Mechano-thermodynamical system and its behavior. Continuum Mech. Thermodyn.–2012, –Vol.24, Issue 3, pp. 239-256.

5 Щербаков С.С., Сосновский Л.А. Механика трибофатических систем.–Минск: БГУ, 2010. –407 с.

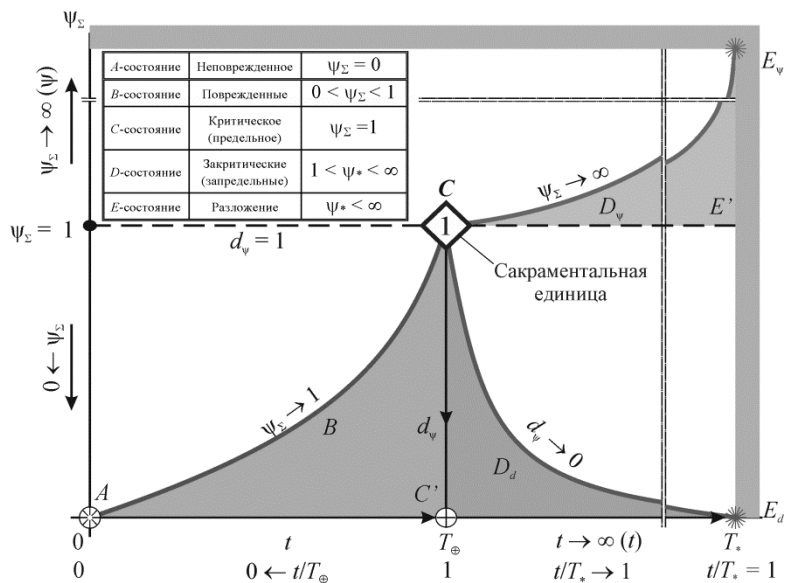


Рисунок 2– К гипотезе об А-эволюции МТД-системы по поврежденности

# ТРИБОФАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ: ОБОБЩЕННЫЙ ЗАКОН ТРЕНИЯ

Л.А. Сосновский<sup>1)</sup>, С.С. Щербаков<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> Белорусский государственный университет транспорта, Беларусь, Гомель

<sup>2)</sup> Белорусский государственный университет, Беларусь, Минск

Сила трения в трибофатической системе  $F$  может рассматриваться как некоторая функция обычной силы трения при скольжении (качении)  $F^{(c)}$ , которая возникает в результате действия контактной нагрузки, и неконтактной составляющей  $F^{(b)}$  силы трения, которая дополнительно возникает вследствие возбуждения неконтактных (циклических) напряжений (деформаций). В общем случае сила трения в трибофатической системе может быть представлена как векторная сумма составляющих  $F^{(c)}$  и  $F^{(b)}$  [1]:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}^{(c)} + \mathbf{F}^{(b)}. \quad (1)$$

В свою очередь  $\mathbf{F}^{(b)}$  может быть разложена на составляющие по параллельному (индекс  $\parallel$ ) и перпендикулярному (индекс  $\perp$ ) движению (скольжению, качению) направлениям  $\mathbf{F}^{(b)} = \mathbf{F}^{(\parallel)} + \mathbf{F}^{(\perp)}$ .

Для определения  $F^{(b)}$  рассматриваются объединенные распределения (зависящие как от контактной, так и неконтактной нагрузок) нормальных  $p$  и касательных  $q$  контактных усилий на площадке контакта  $S$ :

$$p = p[p_c(F_c, S), p_b(F_b, S)], \quad q = q[f, p(F_c, F_b, S), q_b(F_b, S)], \quad (2)$$

где  $p_c, q_c$  и  $p_b, q_b$  – усилия на площадке контакта вызванные действием контактной (индекс  $c$ ) и неконтактной (индекс  $b$ ) нагрузками соответственно. И тогда коэффициент трения в точке  $f^{(\bullet)} = |q|/|p|$ .

В частном случае решение задачи (1) можно свести к формуле [1]

$$f = f^{(c)} + f^{(b)} = f_s \left[ 1 + k_{\sigma/p} \left( \frac{\sigma_{xx}^{(b)}}{p_0} \right) \right]. \quad (3)$$

На рисунке 1 дана иллюстрация полученного решения.

Отметим, что (3) есть, по существу, закон трения в трибофатической системе. Его более общая феноменологическая трактовка дается в следующем виде [1]

$$\tau_{\sigma} = f_s \frac{1 \pm \mu_p f_F}{1 \pm \chi_p (\sigma_a / p_a)} p_{\sigma}, \quad (4)$$

где  $\mu_p, \chi_p$  – деформационные параметры упрочнения-разупрочнения, и  $f_F$  – индекс трения в трибофатической системе.

Таким образом, закон трения в трибофатической системе гласит: в общем случае сила трения пропорциональна как контактной, так и объемной нагрузке, если последняя возбуждает циклические напряжения ( $\pm \sigma_a$ ) в области контакта.

В докладе анализируются полученные решения.

## Литература

1 Щербаков С.С., Сосновский Л.А. Механика трибофатических систем. – Минск: БГУ, 2010. – 407 с.

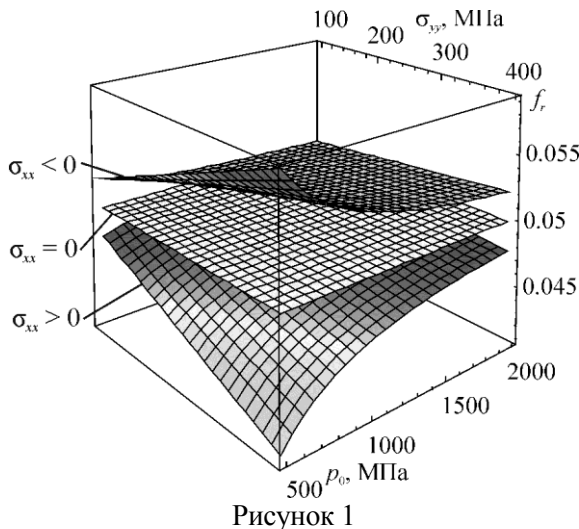


Рисунок 1

## ПЛП-ПОИСК – ЭВРИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ.

Статников И.Н.

ИМАШ РАН, Россия, г.Москва

Очевидно, что начиная со второй половины XX века центр тяжести в решении научно-исследовательских задач перемещается в сторону использования математических моделей (ММ) функционирования объекта, обчислительных с помощью электронных вычислительных машинах (ЭВМ), т.е., идеологии математического моделирования. Конечно, в большинстве случаев решающее суждение об эффективности найденных на ММ решений принадлежит физическому эксперименту.

При этом эффективность решения задачи с помощью ММ безусловно обусловлена степенью адекватности используемой ММ реальному процессу функционирования исследуемого (или проектируемого объекта) и это – всегда отдельная и важная проблема. Эффективность такого подхода (математическое моделирование) к решению задачи обеспечивается постоянно растущими техническими возможностями ЭВМ: память и быстроедействие.

Из арсенала используемых при указанном подходе математических методов очень полезными оказались методы семейства «метод Монте-Карло», к которому относится и метод ПЛП-поиска. Важными моментами в этих методах является возможность получения численной информации на ММ при отсутствии предварительного знания о свойствах функции (или функций), выдвигаемой (-ых) как критерии качества исследуемого (проектируемого) объекта, а также одновременного изменения значений исследуемых параметров в количестве большем двух;

Проблемы, которые могут быть решены при использовании ПЛП-поиска ( в отдельности или одновременно):

а) определение существенных ( релевантных ) параметров в смысле их вероятностного ( с требуемой вероятностью) влияния на значения каждого критерия ; иначе говоря, статистическим путем оценить изменения в среднем производных от каждого критерия по каждому исследуемому параметру;

б) определение областей концентрации наилучших решений по каждому критерию при выбранной метрике;

в) на основе выделенных существенных параметров и областей построить регрессионные зависимости

$$\hat{\Phi}_k(\bar{\alpha}) = \varphi(\alpha_1, \dots, \alpha_m), m \leq J,$$

где:  $\bar{\alpha} = (\alpha_1, \dots, \alpha_j)$  – вектор исследуемых параметров;

г) выделить в  $K$ - мерном пространстве критериев множество точек Парето ( или, если возможно, построить поверхность Парето); в случае задания какой – либо схемы компромисса выделить на основе результатов в п.п. «а» и «б» области концентрации компромиссных решений.

Возможности ПЛП-поиска:

количество входных параметров (одновременно варьируемых коэффициентов ММ) - до 51.

количество критериев качества, предъявляемых к исследуемому(= проектируемому) объекту: ТЕОРЕТИЧЕСКИ - не ограниченное; ПРАКТИЧЕСКИ - ограничивается временем счета одного варианта (= одного вычислительного эксперимента).ТИП ММ - любой (дифференциальные уравнения, алгебраические зависимости и т.д.)

# НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

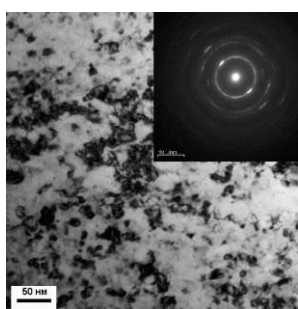
В.В.Столяров

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, [vlstol@mail.ru](mailto:vlstol@mail.ru)

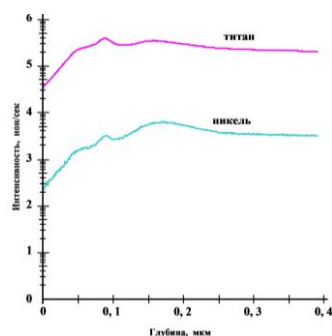
Многие физико-механические свойства сплавов являются структурно-чувствительными и потому зависимыми от различных по природе внешних воздействий – температуры, деформации, напряжении. В работе рассматривается роль интенсивной пластической деформации, импульсного тока, ультразвуковой обработки (УЗО) и ионной имплантацией (ИИ).

Исследованы титановые (TiNi, ВТ6, ВТ1-0), алюминиевые (Д16, АВЕ) и сверхпроводящие (NbTi) сплавы. Электропластическая прокатка (ЭПП) выполнена на полосах и прутках сечением около 20 мм<sup>2</sup> в интервале деформаций  $\epsilon = 0.2-2.5$  при наложении импульсного тока плотностью  $\geq 50$  А/мм<sup>2</sup> и длительностью импульса 10<sup>-4</sup> с. УЗО проводилась с частотой 20 кГц, амплитудой 0.5-50 мкм и статическим усилием от 50 до 150 Н. Для ИИ применялись ионы Ti и Ni с дозой 2x10<sup>17</sup> ион/см<sup>2</sup>. Деформируемость оценивалась по достижению максимальной степени деформации до разрушения при прокатке, а проявление электропластического эффекта – при растяжении образцов с током.

Введение импульсного тока для всех титановых сплавов повышает технологическую пластичность в 2-5 раз по сравнению с холодной прокаткой. Эффект тока тем выше, чем ниже пластичность исходного сплава, что позволяет достичь высоких степеней деформации ( $\epsilon \geq 2$ ) и сформировать сильно фрагментированную микроструктуру. Влияние тока на деформируемость в алюминиевых сплавах зависит от наличия в них эвтектической составляющей и может снижать деформацию до разрушения. Использование последующей электроимпульсной обработки или отжига приводит к созданию объемной субмикро- или нанокристаллической микроструктуры, размер зерен в которой



а



б

Рис.1. Структура после УЗО (а) и распределение элементов после ИИ (б) в TiN

Установлено, что дополнительные внешние воздействия на образцы после ЭПП, измельчают структуру до наноразмерной области (УЗО, рис.1а) и формируют фазовый состав в поверхностном слое, отличный от основы (ИИ, рис.1б). В результате появляется возможность создания градиентных по структуре и фазовому составу сплавов с отличающимися свойствами поверхности и объема образца. Методом ВИМС в TiNi сплаве демонстрируется, что ИИ титаном является более эффективным упрочняющим воздействием по сравнению с имплантацией никелем.



# НАУКОЁМКИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

А.Г. Суслов

*Московский государственный индустриальный университет, Россия, г. Москва*

Так как технология машиностроения как наука призвана разрабатывать и совершенствовать теорию технологического обеспечения и повышения качества машин с наименьшей себестоимостью их изготовления, то ученые-технологи за последние десятилетия совершенствовали и создавали новые технологические методы обработки заготовок, обеспечивающие повышение качества деталей машин.

Причем в последние годы практически создана система научно обоснованного совершенствования существующих и создания новых методов обработки заготовок, исходя из функционального назначения рабочих поверхностей деталей машин. К сожалению, зачастую при проектировании деталей, не всегда учитываются технологические возможности в обеспечении закономерного изменения формы и качества рабочих поверхностей деталей машин. Так, практически все криволинейные поверхности трения (кулачки, чашки дифференциалов, поверхности катания железнодорожных колес и др.), учитывая различные условия эксплуатации их отдельных участков (давление, скорость, температура) для сохранения исходного профиля, обеспечивающего их долговечность, должны иметь закономерное изменение качества (шероховатость, микротвердость и др.). Причем до сих пор не в полной мере используют гостовские параметры шероховатости поверхностей деталей машин  $t_p$ ,  $S_m$  для повышения их долговечности и безотказности.

Технологи при создании новых методов обработки подошли к стадии совместного рассмотрения процессов изготовления и эксплуатации деталей машин. В этом скрыты огромные резервы в повышении конкурентоспособности отечественных изделий машиностроения. Этот подход позволяет ряд явлений из эксплуатации перенести в изготовление и наоборот.

Так, пластические деформации в резьбовом соединении шпилька–корпус, возникающие при эксплуатации можно перенести в изготовление с использованием технологии гладкорезьбовых соединений. Это позволяет повысить долговечность этих соединений и снизить технологическую себестоимость их изготовления. Процесс нанесения на поверхности трения мягких покрытий можно перенести из изготовления в эксплуатацию с использованием электрохимико-механического процесса и т.д. Причем совершенствование существующих технологических методов осуществляется целенаправленно и научно обоснованно путем теплового, силового и химического воздействия на зону обработки.

## АНАЛИЗ МАКРОСКОПИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ.

С.Ю. Тарасов, В.Е. Рубцов, А.В. Колубаев, В.В.Горбатенко

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, Томск*

Исследование пластического деформирования при трении является очень важным для понимания процессов формирования поверхностных слоёв со свойствами, отличными от свойств основного материала. В рамках этой задачи актуальным представляется, в том числе, изучение макроскопических неоднородностей деформирования. Так как именно макроскопическое распределение напряжений в поверхностном слое, формируемое отдельными большими пятнами контакта или группами пятен, определяет размер, расположение и движение зон локализации, т.е. областей, в которых достигаются максимальные деформации материала.

В качестве испытательной установки в работе использовался стенд, спроектированный и построенный в Юргинском технологическом институте. Для регистрации полей смещений и деформаций в зоне контакта применяли метод цифровой корреляции изображений, однако в отличие от традиционного способа, когда систему реперных меток создают аэрозольной краской, в данном эксперименте в качестве реперов использовали спекл-структуру, сформированную при освещении поверхности когерентным светом лазера. Это позволило избежать дополнительной обработки исследуемой поверхности и расширить допустимый температурный диапазон испытания. Кроме того, данный метод, обеспечивая высокий уровень разрешения при измерении векторов смещений, не требует дополнительных мер по виброзащите, что делает его весьма удобным для применения совместно с испытательными машинами трения.

Анализ полей деформаций, возникающих на боковой грани образца при испытании, показал, что в процессе трения в поверхностном слое возникают несколько областей с особым распределением деформаций растяжения и сжатия. Характерный порядок следования зон растяжения и сжатия в направлении параллельном поверхности скольжения, а также совместное движение этих зон позволил идентифицировать наблюдаемые области как отдельные пятна контакта.

Для того, чтобы проследить за движением пятен контакта в процессе трения была построена хронограмма развития деформаций, которая показывает как картина деформирования меняется со временем, что позволяет визуализировать перемещение пятен контакта.

Анализ хронограммы показал, что большинство пятен контакта в процессе трения не меняют своего размера и движутся с постоянной скоростью равной скорости контртела. Кроме того наблюдались пятна, которые изменяли свой размер и скорость, предположительно за счет попадания в контакт частиц износа.

Обнаружено, что при данных условиях нагружения на пятнах контакта идет интенсивная знакопеременная пластическая деформация, величина которой не зависит от размера пятен. Расчеты показали, что максимальные пластические деформации сжатия и растяжения составляют до 8%, а величина накопленных в материале образца деформаций каждого знака достигают 50% и более после однократного прохождения пятна контакта.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-08-00324).*

# ЭЛЕКТРОЛИЗЕР НА МОРСКОЙ ВОДЕ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ШИРОКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

**В.С. Терещук, А.А. Ковалев**

*ИМАШ РАН, Россия, Москва*

Объектом исследования являются электролизные ячейки, разработанные в ИМАШ, отличающиеся тем, что катоды изготавливаются из различных сплавов А1, а аноды в виде медной пластины или спиральной медной трубки, внутри которой протекает охлаждающая жидкость - вода.

Такой электролизер может применяться в обычных автомобилях, когда даже небольшая добавка водорода к бензину существенно экономит расход топлива, улучшает процесс сгорания и экологию выхлопных газов.

Подобные устройства уже поставлены на поток по продаже всем желающим на Украине, и у нас в России в г. Барнауле, но там электролит греется, у нас - нет и КПД выше, за счет использования активного катода.

Цель работы - выявление зависимости газопроизводительности по водороду электролизной ячейки от материала катода, от степени солености электролита, нагрева электролита, выявление оптимальных режимов работы электролизной ячейки по току и по напряжению на электродах.

В процессе работы проводились замеры газопроизводительности по водороду, расход охлаждающей жидкости, степень ее нагрева, замер тока и напряжения в электролизной ячейке.

В результате исследования впервые были выявлены следующие эффекты:

- после подачи электрического тока в электролизную ячейку катод из сплава алюминия типа Д16 на катоде продолжает выделять водород и после отключения тока;
- при использовании в качестве электролита обычной водопроводной воды или при небольшой ее солености (до 3,5 г/л) с катодом из Д16 электролит нагревается сильнее в 1,5 - 2,5 раза, чем затраченная электроэнергия на нагрев электролита.
- при нормальной солености морской воды (35-40 г/л) электролит практически не греется с катодом из Д16, а КПД электролиза практически приближается к 100% по выходу водорода.

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ ПАТРУБКОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ И ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

В.А. Тихонов, А.Г. Чистяков

*Институт машиноведения РАН, Россия, Москва*

Доклад посвящен разработкам в ИМАШ РАН и ОАО «Калужский турбинный завод» **виброзащитных компенсационных патрубков** на основе слоистых упругих элементов – тонкослойных резинометаллических элементов – ТРМЭ. Вторая часть доклада включает результаты вибрационных испытаний нового авиационного материала и гидроупругих опор «Агрон» для транспорта, разработанных совместно с Нижегородским филиалом ИМАШ РАН.

Разработаны предложения по пректированию и по расчету характеристик компенсационных патрубков для циркуляционной трассы подводных судов. В результате совместных разработок были изготовлены и внедрены новые эффективные конструкции ПК в двух проектах судов «Ясень» и «Борей».

Эффективность применения ТРМЭ в угловых и прямоточных компенсационных патрубках – ПК (до 20 дБ в частотном диапазоне 10-200 Гц). Снижена переходная жесткость патрубков в 10-100 раз при изменении давления.

С помощью оригинального стенда определены вибрационные характеристики тестовых образцов из алюминиево-литиевого сплава (*Al-Li*), модифицированного специальным наполнителем  $Al_2O_3$ : частотные зависимости диссипативного параметра от %-го содержания включений для **нового авиационного материала**.

Наблюдается различие ширины полосы частот отдельных кривых, связанной с диссипативными свойствами материала и конструкции и дрейф резонансной частоты в зависимости от уровня возбуждения и материала образца. Показано, что увеличение содержания наполнителя приводит к уменьшению собственных частот образцов и росту диссипативного параметра материала. Определено различное влияние нелинейных свойств материала и внешних факторов.

Проведены экспериментальные исследования **гидроупругих опор** типа «Агрон», разработанных Нижегородским филиалом ИМАШ РАН на статическую нагрузку  $P=350\text{кг}$  в диапазоне 5-200Гц для автомобильного и ж-д транспорта.

Различное поджатие в осевом направлении гидроопоры сказалось на амплитудно-частотных характеристиках при динамическом нагружении «белым шумом» и синусоидальной нагрузкой.

В результате анализа характеристик при статическом нагружении отмечена существенная нелинейность при осевом сжатии, а при номинальной нагрузке поджатия наблюдается наибольший перепад сил и значительная – до 20 дБ виброизоляция.

### Литература

1. Кирюхин А.В., Тихонов В.А., Чистяков А.Г. Вибрационные характеристики углового компенсационного патрубка с тонкослойными эластомерными элементами // ПМНМ. 2007, №1, С. 103-108.
2. Тихонов В.А., Чистяков А.Г., Радина О.В. Вибрационные испытания при исследовании механических свойств образцов из алюминиевых сплавов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008, №2, С. 101-106.
8. Тихонов В.А., Чистяков А.Г. и др. Заводские испытания гидроупругих опор. Статические и динамические характеристики // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009, №6, С. 91-95.

# ВЛИЯНИЕ ВТОРИЧНЫХ СТРУКТУР, ОБРАЗУЮЩИХСЯ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТРЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТРИБОСИСТЕМ НА ИХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

И.А.Тодер<sup>1)</sup> А.Е.Миронов<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>ОАО АХК «ВНИИМЕТМАШ им. акад. А.И.Целикова».Россия, г.Москва

<sup>2)</sup>ОАО «ВНИИЖТ».Россия, г.Москва.

Выбор эффективного антифрикционного материала применительно к уплотнительным манжетам для опор прокатных валков потребовал проведения исследований материалов на базе литьевого полиуретана СКУ-7Л, наполненного порошками цветных металлов. Исследование этих материалов в трибоконтакте со сталью проводилось с учетом синергетических подходов к выбору материалов трущихся пар, которые получают все большее распространение в мире [1-3]. Основным критерием таких подходов является анализ свойств и состава вторичных структур, получаемых на поверхностях трения. Состав указанных вторичных структур зависит от наличия компонентов, входящих как в состав трущихся тел, так и в смазку. Изучение вторичных структур при различных условиях смазки и нагружения были проведены Н.А. Буше и его сотрудниками [4-6] для используемых на железнодорожном транспорте металлических материалов – бронз, алюминиевых антифрикционных и поршневых сплавов, материалов электрических контактов и токосъема. Исследование таких важных для триботехники материалов, как металлополимеры, с точки зрения их способности создавать защитные вторичные структуры, ранее не проводились. Такие исследования начали проводиться совместно институтами «ВНИИМЕТМАШ», «ВНИИЖТ» и «ИПМ» РАН с конца девяностых годов и сопровождали процесс разработки новых материалов на основе композиционного полиуретана, наполненного металлическими порошками, применительно к уплотнительным манжетам для прокатных станов. Первые же эксперименты показали кардинальное снижение коэффициента трения и многократное увеличение износостойкости нового материала. Проведенные исследования позволили расширить диапазон используемых материалов для разрабатываемых во «ВНИИМЕТМАШ» уплотнительных узлов и значительно повысить их эффективность.

В настоящем докладе подводятся итоги проделанных исследований, а также, некоторые выводы и обобщения, касающиеся механизмов процесса образования указанных вторичных структур.

## Литература.

1. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. –М.: Мир. – 1973
2. Костецкий Б.И. Бершадский Л.И. Об общей закономерности структурной приспособляемости материалов при трении // Доклады АН СССР, Т. 191-1970, № 6, с. 1339-1342.
3. Бершадский Л.И. Самоорганизация и надежность трибосистем. –Киев: Об-во «Знание» УССР. – 1981
4. Буше Н.А., Миронов А.Е., Зайчиков А.В. «Управление самоорганизацией для достижения совместимости трибосистем». «О природе трения твердых тел». Международный симпозиум. Гомель. Беларусь. Тезисы докладов. Стр. 32-33. Гомель 1999 г.
5. Gershman I.S., Bushe N.A., Mironov A.E. Self-organizing at friction and development of wearproof materials // Proc. WorldTribologyCongressIIIWTC-2005.Washington/ 2005, 63889
6. Буше Н.А., Миронов А.Е., Маркова Т.Ф. Синергетический подход к разработке новых антифрикционных материалов для нужд железнодорожного транспорта «Трибология и надежность» Труды VI Международной конференции (4-6 октября 2006 г.). Санкт-Петербург, 2006, стр. 132-134.

## СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Торбек Ю.<sup>1</sup>, Раков Д.Л.<sup>2</sup>

*1 - Проф., д.т.н. авиакосмического института Берлинского технического университета*

*2 - С.н.с, к.т.н. ИМАШ РАН*

Большое число факторов конструктивного, технологического, эксплуатационного, экономического и экологического характера, влияющих на процесс создания новой техники, предопределили необходимость использования системного анализа и синтеза при проектировании новых технических систем (ТС). Актуальность их использования в сфере создания и освоения новых машин обусловлена научно-техническим прогрессом, появлением и внедрением новых технических решений (ТР), материалов и технологий, все возрастающими потоками информации. Вышесказанное увеличивает число возможных реализаций ТР, как отдельных узлов и устройств, так и ТС в целом.

В работе И.С.Голубева приведены данные по автоматизации проектно-конструкторских работ. Экспертным путем рассмотрены и сопоставлены такие этапы процесса проектирования, как составление технического задания, разработка технических предложений, эскизное и рабочее проектирование, подготовка производства. Приведенные данные говорят о том, что эксперты выразили мнение о первоочередной автоматизации поисковых работ этапа технических предложений при одновременной автоматизации всех прочих этапов проектно-конструкторских работ. Синтез структуры, с различной степенью детализации, может быть осуществлен на различных этапах процесса проектирования. Однако, наибольший эффект может быть получен на ранней стадии процесса проектирования - этапе технического предложения, характерной особенностью которого является ограниченность информации о свойствах будущей технической системы, что заставляет, в первую очередь, обращаться к структуре системы и содержащейся в ней информации.

При помощи кластерного анализа осуществляется выбор из морфологического множества вариантов нескольких перспективных, для которых проводится детальное исследование. В докладе рассматриваются вопросы моделирования уравнений движения перспективных транспортных систем с учетом начальных условий и накладываемых на них ограничений.

Сделаны выводы об области существования исследуемых ТС, а также анализ их весовых характеристик и сопоставление с прототипами.

# ПРЕИМУЩЕСТВА ИМПУЛЬСНОГО ТОКА ПЕРЕД ДРУГИМИ ВИДАМИ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОВ

О.А. Троицкий, В.И. Сташенко

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН*

В настоящее время научно обоснованы, экспериментально разработаны и реализованы различные способы усовершенствования процессов обработки металлов давлением (ОМД) путем применения ультразвуковых воздействий, многовалковых калибров, роликовых волок и других устройств. Вместе с тем большие возможности для решения этих же задач в технологиях ОМД дает переход к приемам и способам, дающим более высокую пластичность обрабатываемого металла с помощью электрического тока. Импульсный ток высокой плотности и безопасного напряжения (менее 30 В), примененный в зоне деформации металла, позволяет существенно снижать сопротивление металла деформированию (на 30 – 35%) и повышать его пластичность. Амплитудная плотность тока составляет величину порядка 500-800 А/мм<sup>2</sup>, длительности импульсов  $(1,5-2) \cdot 10^{-4}$  с, частота следования импульсов сотни и тысячи Гц. При этом сопутствующий нагрев металла не превышает 100-200°С.

Импульсный ток высокой плотности оказывает силовое действие электронами проводимости, создавая давление «электронным ветром» на дислокации и иные дефекты, участвующие в пластической деформации металла, создавая также значительную силу электрон-фононного увлечения. Помимо этого импульсный ток создает вибрацию решетки, подобную действию ультразвука, за счет пинч-эффекта или пондеромоторного действия тока через собственное магнитное поле тока. Разработан механизм депиннинга (открепления) дислокаций от примесей металла под действием собственного магнитного поля тока за счет спиновой конверсии и спин-зависимых реакций дислокаций с парамагнитными примесями, приводящий к разупрочнению металла. Указанные физически обоснованные механизмы и процессы объединяет понятие электропластический эффект (ЭПЭ), который действует в условиях пластической деформации металла при одновременном действии импульсным током.

В случае применения импульсного тока в процессах ОМД имеют место следующие технологические:

- 1) Повышение производительности станов в 1,5 раза.
- 2) Устранение операций промежуточных отжигов.
- 3) Увеличение остаточной пластичности заготовок до 30%.
- 4) Возникновение оптимального текстурирования.
- 5) Подавление аустенитно-мартенситных превращений в сталях.
- 6) Снижение сопротивления металла деформированию на 30-35%.
- 7) Снижение энергопотребления приводами станов в тех же пределах.
- 8) Значительные энергосбережения за счет устранения операций промежуточных отжигов.
- 9) Улучшение физико-механических свойств и качества продукции.
- 10) Возможность перераспределения продольной и поперечной деформаций при прокатке металлов с током.
- 11) Сокращение длины промышленных установок и поточных линий за счет исключения камер защитного газа и ванн травления.
- 12) Улучшение экологической обстановки в цехах при производстве металлопродукции.

## ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОПЛАСТИЧЕСКОЙ ПРОКАТКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, ПРИПОЕВ И НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

О.А.Троицкий, В.И. Стащенко

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

При холодной обработке металлов давлением (ОМД) повышается сопротивление металла деформированию и возникают нежелательные структурно-фазовые превращения. Практически после каждого перехода на заготовках из нержавеющей стали и титановых сплавов проводят дорогостоящие, энергоемкие операции промежуточных отжигов, продолжительные по времени. Процесс можно рационализировать применяя технологию электропластической прокатки (ЭПП). Наиболее эффективно использование импульсного тока, которому при амплитудных плотностях тока  $10^3$ - $10^4$  А/мм<sup>2</sup>, длительности импульсов тока  $10^{-4}$ с свойственно пластифицирующее действие на металл в очаге деформации с передачей импульсов силы и энергии в зону деформации металла. Возникают также вибрации заготовки, соответствующие частоте следования импульсов тока (500 -1000) Гц за счет пинч-эффекта (пондеромоторного действия импульсного тока). Снижается сопротивление металла деформированию на 30-35%

При ЭПП титановых сплавов ВТ1-00, ВТ6, ВТ16 было установлено повышение общей степени деформации без промежуточных отжигов. Единичное обжатие ВТ6 при ЭПП достигали 57%, тогда как без тока они составляли величину не более 15%. Общая деформация при ЭПП достигала значений 72%.

В образцах после ЭПП, несмотря на более высокую степень деформации, трещины отсутствуют. Частицы  $\beta$ -фазы толщиной менее 1,5 мкм и длиной до 2 мкм распределены довольно равномерно по сечению образца. В отдельных опытах был оценен сопутствующий нагрев образцов при ЭПП, который не превышал 200°С.

Электропластическая прокатка полос нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т толщиной 2,08 мм осуществлялась за несколько проходов без промежуточных отжигов. Деформация (за проход) составила: 20%, 50%, 75%, суммарная 100%. Амплитуда тока была порядка 800 А, длительность  $10^{-4}$  сек, частота порядка 500-600 Гц. Структурные исследования образцов стали, прошедших ЭПП при разных степенях деформаций показали, что в стали происходит интенсивное «размывание» всех типов границ структуры и коагуляция карбидов, видимо, увеличивалась подвижность дислокаций. Происходил отпуск деформационного мартенсита. Сталь приобретала более высокую пластичность с небольшим увеличением прочности. ЭПП нержавеющей стали позволяет реализовать технологию обработки металлов давлением без применения операций промежуточного отжига.

ЭПП ленты из припоев ПЖК-35, ВПР -4 толщиной 1мм проводилась по тем же режимам. После многоходовой (20 проходов) ЭПП была получена толщина 0,2мм, удлинение на 300-400% без видимых разрушений и растрескиваний. Такая же деформация без тока приводила к растрескиванию и расслоению материала. Наблюдалось значительное уширение ленты (на 18%) при уменьшении длины по сравнению с образцами прокатанными без тока. Образцы прошедшие ЭПП показали повышенную остаточную пластичность и увеличение предела прочности.



## ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ МЕХАНИЗМОВ НЕЗАВИСИМОГО ДВИЖЕНИЯ

Уалиев Г., Уалиев З.Г.

*Институт механики и машиноведения Казахстан, Алматы*

*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.

Рассматривается динамика механизмов независимого движения с существенно упругими звеньями, у которых движение осуществляется под действием потенциальной энергии деформированных упругих звеньев.

Раскручивание деформированных валов и расжатие упругих пружин осуществляются под действием потенциальных энергий деформированных упругих тел. Движение таких исполнительных механизмов в этом переходном процессе, где осуществляется заданная технологическая работа, независит от движения двигателя. Эти механизмы носят название- механизмы независимого движения.

В докладе 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 предоставляются как связи, так и источники движения.

Значения переменных инерционных коэффициентов динамической модели машин определяются из уравнения движения отдельных приводимых к общему валопроводу. Значения приведенных моментов сил могут быть определены известными методами для каждого приводимого механизма. Законы движения, без учета колебательных явлений динамических ошибок входных звеньев отдельных механизмов определяются из характеристики двигателя и функции положения.

Необходимо отметить, что в каждом периоде движения изменяются класс механизма, число подвижных звеньев и кинематических пар, характер изменения внешних нагрузок и сил сопротивления. Таким образом, указанные механизмы независимого движения являются механизмами переменной структуры с упругими звеньями и связями.

В докладе сформулирована обратная задача динамики механизмов с существенно упругими звеньями и получено аналитическое решение уравнения движения. Решение обратной задачи позволяет автоматизировать построение математических моделей многомассовых систем без определению центра масс и моментов инерции деталей многозвенных механизмов. Инерционные параметры механизмов независимого движения определяются как решение обратной задачи динамики и используются при составлении дифференциальных уравнений движения звена приведения.

### Список использованной литературы

1. Уалиев Г., Уалиев З.Г. Математическое моделирование динамики механических систем с нелинейными характеристиками. - Алматы, 2007-332 с.
2. G.Ualiyev. Mathematical models of dynamic of mechanisms with sufficient elastic past //The ninth IFToMM INTERNATIONAL Symposium on Theory of mechnes and mechanisms. Bucharest, Romania, Surom, 2005, vol. 1, p.215-219.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
РАСКАТКИ ДИСКОВ ДЛЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НОВОГО  
ПОКОЛЕНИЯ.**

**Ф.З. Утяшев<sup>1)</sup>, А.Р. Ибрагимов<sup>2)</sup>, д.ф.-м.н. Назаров<sup>1)</sup>.**

*<sup>1)</sup>ИПСМ РАН, Россия, Уфа*

*<sup>2)</sup>ИМАШ РАН, Россия, Москва.*

Обеспечение устойчивого процесса раскатки жаропрочных дисков в условиях сверхпластичности достигается за счет взаимодействия приводов заготовки и деформирующего инструмента. Основой для систем управления механизмами стана для раскатки дисков является четкое определение физических параметров элементов приводов, таких как жесткость механических передач от электродвигателей до инструмента, заготовки или перемещаемых узлов стана, собственные частоты колебания приводов, естественные характеристики движения механизмов в режимах разгона, торможения или скачка нагрузки. Особенностью создания математической модели технологии раскатки дисков является включение в расчетную модель элемента – деформируемой заготовки. Расчетный элемент деформируемого участка связывает звенья модели приводов заготовки и инструмента. При этом, деформируемый участок оказывает влияние на общую модель, состоящую из упругих элементов, тем, что создает силы и моменты сопротивления движению модели. Эти силы сопротивления зависят от взаимного перемещения механизмов привода заготовки и инструмента. Таким образом, математическая модель технологического процесса раскатки представляется как упругопластическая система, в которой элементы приводов обладают упругими свойствами, а элемент заготовки – пластическими.

## ИЗМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГРАФИТСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТОВ ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ С ТОКОСЪЁМОМ

**В.В. Фадин<sup>1</sup>, М.И. Алеутдинова<sup>1,2</sup>, В.Е. Рубцов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Россия, Томск,*

<sup>2</sup>*Северский технологический институт НИЯУ МИФИ, Россия, г. Северск*

Характер структурных изменений, происходящих в контактном поверхностном слое (ПС) при нагружении материала трением и электрическим током зависит от начальной структуры контактного материала. Изучение эволюции и разрушения ПС в условиях высокоэнергетического внешнего воздействия, которое можно реализовать электрическим током с контактной плотностью более  $100 \text{ А/см}^2$ , представляет особый интерес. Необходимым этапом этого изучения является получение представления о взаимосвязи первичной структуры, свойств контакта и структуры ПС. Целью настоящей работы является изучение взаимосвязи первичной структуры, структурных изменений поверхностного слоя и функциональных характеристик контакта композитов состава Cu+Fe+графит при нагружении трением и электрическим током с контактной плотностью более  $100 \text{ А/см}^2$  по стальному контртелу без смазки.

Спечённые материалы имели составы: 1. Cu+70%Fe+10%графит, 2. Cu+40%Fe+10%графит, 3. Cu+70%ШХ15+10%графит, 4. Cu+40%ШХ15+10%графит. Образцы спекали в вакууме при температуре  $1100^\circ\text{C}$  в течение 2 часов. Триботехнические испытания проведены в условиях скользящего токосъёма без смазки при давлении  $0,13 \text{ МПа}$ , скорости скольжения  $5 \text{ м/с}$  на машине трения СМТ-1. Нагружение осуществлено по схеме “вал-колодка”. Контртелом служила сталь 45 (50 HRC). Путь трения составлял  $9 \text{ км}$ .

Зависимость электропроводности контакта всех композитов от плотности тока имеет максимум. Максимум электропроводности контакта композитов 1-2 имеет значение около  $300\text{-}320 \text{ См/см}^2$  и около  $250 \text{ См/см}^2$  в контакте композитов 3-4. Более высокая электропроводность контакта композитов 1-2 приводит к более низким термическим напряжениям и разрушениям в пятнах контакта и, соответственно, к более высокой износостойкости. Металлографическое исследование поперечного шлифа поверхности трения на оптическом микроскопе Neophot-21 показало, что структурные изменения представлены в виде слоя вторичных структур толщиной около  $30 \text{ мкм}$ . Рентгеновский фазовый анализ показал, что на поверхности трения расположены медь, ОЦК-железо и оксид FeO. Таким образом оксид FeO образует шарж на поверхности трения, что способствует увеличению сдвиговой устойчивости поверхностного слоя и увеличению износостойкости. Морфологический вид поверхности трения похож на застывшую жидкость, что указывает на появление жидкой фазы в процессе контактирования. Последний фактор способствует увеличению площади фактического контакта и должен увеличивать электропроводность контакта. Однако более высокие характеристики контакта композитов 1-2 указывают на целесообразность применения чистых металлов в качестве структурных составляющих первичной структуры токосъёмных композитов.

*Работа выполнена по проекту Ш.23.2.4 программы Ш.23.2 фундаментальных исследований СО РАН и при финансовой поддержке РФФИ (грант 13-08-00076-а).*

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА В АНАЛИЗЕ ВИБРАЦИИ

**М.С. Фельдман**

*Технион, Израиль, Хайфа*

В отличие от других интегральных преобразований таких как Фурье или Лаплас, преобразование Гильберта (ПГ) не является преобразованием между разными (частотной либо временной) областями. Оно просто определяет дополнительную мнимую часть по заданной вещественной части функции, путем сдвига каждой составляющей сигнала на ее четверть периода. Таким образом, новая комплексная функция обуславливает способ определения мгновенной амплитуды (огibaющей) и мгновенной частоты сигнала [1]. Использование мгновенной частоты и амплитуды позволяет легко извлекать компоненты из многокомпонентного нестационарного сигнала. В общем случае нестационарной вибрации это также позволяет проводить точный анализ передачи и диссипации энергии вибрации и ее воздействия на долговечность машин [2].

Современные методы декомпозиции, основанные на преобразовании Гильберта, предназначены для простого представления произвольного многокомпонентного нестационарного сигнала в виде суммы квазигармоник с возможной аperiodической составляющей. Декомпозиция на основе преобразования Гильберта рекомендуется для извлечения конечного числа нестационарных компонент с различными и априорно неизвестными мгновенными параметрами. Типичные примеры таких изменяющихся во времени сигналов являются вибрации ротора при запуске или остановке.

В течение последних двух десятилетий преобразование Гильберта применяется все более широко для экспериментального изучения и идентификации нелинейных колебательных систем во временной области [3]. Самые первые результаты показали, что по огibaющей и мгновенной частоте можно определить модальные параметры колебательной системы [4]. В дополнение к идентификации модальных параметров преобразование Гильберта позволяет определять непараметрически конкретные нелинейные элементы конструкции, например, какие как, зазор или нелинейное трение. Соответствующие методы идентификации непосредственно извлекают скелетную кривую и кривую затухания для нелинейных колебательных систем. Это позволяет нам решать обратную задачу идентификации, а именно, проблему оценки нелинейных статических упругих и демпфирующих характеристик действующих сил в реальном времени. Метод преобразования Гильберта рекомендуется для эффективного и точного представления нелинейного взаимодействия в механической системе и изучения ее нестационарного поведения.

### Литература

1. Feldman M. Hilbert Transform Applications in Mechanical Vibration. London:Wiley, 2011. - 320 p.
2. Feldman M. Hilbert transform in vibration analysis // Mechanical Systems and Signal Processing. - 2011. - Vol. 25, Issue 3. - Pp. 735-802.
3. Feldman M. Hilbert Transforms // Encyclopedia of Vibration. - New York: Academic Press, 2001. - Pp. 642-648.
4. Feldman M.S. Investigation of the natural vibrations of machine elements using Hilbert transform // Soviet Machine Science. - 1985. -No 2. - Pp.44-47.

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ БУРОВЫХ ШТАНГ ПРИ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

Л.А. Хаджиева, А.Б. Умбеткулова, А.С. Сергалиев

Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Казахстан, Алматы

Работа посвящена прикладным задачам динамической устойчивости стержневых систем. Рассматривается устойчивость движения буровых штанг, применяемых в нефтегазодобывающей промышленности. Основными факторами браковки скважины является ее искривление и поломка буровых штанг, которая вызвана неустойчивостью прямолинейной формы штанги. Причиной тому могут быть различные факторы, такие как динамические поперечные воздействия; большие инерционные силы, возникающие при бурении; начальная кривизна штанги; концентраторы напряжений, центровка машины и другие факторы. Задача динамического моделирования упругих систем с учетом нелинейных осложняющих факторов является одной из мало исследованных задач динамики промышленного оборудования. Сложность описания нелинейной динамики деформируемых элементов и разнообразие причин, вызывающих нелинейность, столь значительны, что проблемы прогнозирования их прочности и надежности остаются одними из наиболее трудных и наименее разработанных.

Рассматривается вращающаяся буровая штанга под действием переменной продольной силы и переменного крутящего момента:

$$M(x, t) = \alpha_1 M_0(x) + \beta_1 M_t(x) \cdot \Phi_M(t) \quad (1)$$

$$N(x, t) = \alpha_2 N_0(x) + \beta_2 N_t(x) \cdot \Phi_N(t) \quad (2)$$

где  $\Phi_M(t)$  и  $\Phi_N(t)$  – периодические функции.

Уравнения изогнутой оси для прямолинейной штанги задаются как:

$$EJ_v \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \left( 1 - \frac{3}{2} \left( \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \right) \right] + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ M(x, t) \frac{\partial U}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ N(x, t) \frac{\partial V}{\partial x} \right] + K_1 V = - \frac{\gamma F}{g} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (3)$$

$$EJ_u \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} \left( 1 - \frac{3}{2} \left( \frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 \right) \right] + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[ M(x, t) \frac{\partial V}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ N(x, t) \frac{\partial U}{\partial x} \right] + K_1 U = - \frac{\gamma F}{g} \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial t^2},$$

где  $K_1 = \gamma F \omega^2 / g$ ,  $\gamma$  – удельный вес материала;  $F$  – площадь поперечного сечения;  $EJ_u$ ,  $EJ_v$  – жесткость штанги относительно осей  $y$ ,  $z$ ;  $U$  и  $V$  – перемещения точек упругой линии штанги в плоскостях  $XOZ$  и  $XOY$ .

Для численного анализа применяется метод разделения переменных, где форма изгиба оси буровой штанги задается спектром гармонических форм.

В результате получены профили колебаний для пространственных перемещений  $U$  и  $V$  для первого и кратных приближений. Анализируя параметрическую кривую от  $U$  и  $V$ , характеризующую форму изогнутой оси штанги в любой момент времени, можно судить об ее устойчивости или неустойчивости при различных геометрических и физических характеристиках. Проведя сравнительный анализ полученных результатов для нелинейной модели с результатами ранее исследованных линейных моделей, выявлены нелинейные эффекты, которые остаются за рамками линейных теорий колебаний, что подтверждает принципиальный характер разработанных и исследованных нелинейных моделей буровых штанг с учетом конечности их деформаций.

## КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ВИНТОВЫХ ПЕРЕДАЧ СКОЛЬЖЕНИЯ

**И.Ю. Цуканов**

*Московский государственный индустриальный университет, Россия, г. Москва*

В связи с развитием модульного принципа построения машин возрос спрос на винтовые пары с трением скольжения, используемые в настоящее время, чаще всего, в отдельных агрегатах, таких как системы позиционирования, актуаторы и др. Учитывая тот факт, что современные механизмы, где использование передач с трением скольжения целесообразно, работают при небольших и средних нагрузках, потеря долговечности будет возникать вследствие износа винтовых поверхностей. Износостойкость во многом определяется качеством поверхности, поэтому обеспечение долговечности должно проводиться в неразрывной связи проектирования и изготовления элементов винтовой пары. Исходными данными для проектирования винтового механизма скольжения являются осевые нагрузки, скорости скольжения, путь трения (за цикл), особенности рабочей среды, срок службы и допустимый износ. Для обеспечения требуемой долговечности винтовой пары можно предложить методику, включающую следующие основные этапы. В начале проектирования определяется средний диаметр резьбы по критерию допускаемого контактного давления для материала гайки. После назначают материал ходового винта и по критериям прочности на растяжение (сжатие) и устойчивости определяют внутренний диаметр и шаг резьбы. Точность и качество резьбы винта можно назначить по нормам станкостроения, исходя из точности винтового механизма. Как правило, точные винты подвергаются многопроходному шлифованию. Если по критериям прочности допустима сталь, не подвергаемая закалке, то целесообразно выполнять точение, шлифование и электромеханическую обработку винтовой поверхности для придания ей требуемой микротвердости. При предварительном точении резьбы целесообразно выполнять коррекцию положения резца для устранения кинематической погрешности шага. Далее выполняются расчеты ходовой гайки. Рассчитав толщину стенки гайки по критерию прочности и конструктивным соображениям, определяется распределение контактных давлений и нагрузок по ее виткам. Выполняется расчет наиболее нагруженного витка на изгиб и срез, исходя из которого, определяется предел прочности материала гайки. Исходя из условий эксплуатации, выбирается смазочный материал, после чего производится выбор твердости материала гайки по критерию износостойкости на основе разработанного метода расчета на износ при параметрах качества винтовой поверхности гайки, соответствующих лезвийной обработке. По пределу прочности и значению твердости выбирается материал гайки. Если расчетная интенсивность изнашивания для более экономичного материала превышает допустимую менее, чем в 2 раза, то выбирать необходимо данный материал и применять технологические методы повышения износостойкости винтовых поверхностей гаек, такие как отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. На чертеже ходовой гайки проставляются параметры шероховатости винтовой поверхности  $Ra$ ,  $Sm$ ,  $tm$  и микротвердость поверхности. После определения методов обработки производится расчет режимов обработки, обеспечивающих требуемые параметры качества винтовых поверхностей винта и гайки по теоретическим или экспериментальным зависимостям.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛОГОВОГО И ФОТОУПРУГОГО МЕТОДОВ

**О.И. Челябинна**

*РОНЦ МГОУ имени В.С. Черномырдина, Россия, Подольск*

Прочностная надежность и ресурс эксплуатации элементов конструкций энергетического машиностроения зависят от уровня и характера распределения температурных напряжений. Среди экспериментальных методов определения последних заслуживают внимания следующие: аналоговое моделирование (пластинчатая аналогия) и поляризационно-оптический метод (фотоупругость). Упомянутые направления исследований развиваются самостоятельно и взаимно не пересекаются [1, 2]. Между тем сочетание этих методов позволит полнее использовать преимущества каждого из них для получения достоверных экспериментальных результатов. В данном сообщении предлагается обосновать синтез аналогового и поляризационно-оптического методов моделирования температурных напряжений. Сущность аналогового метода моделирования термонапряжений заключается в математической идентичности бигармонических уравнений для функции напряжений реальной системы и функции прогиба модельной пластины [3]. Физическая сущность поляризационно-оптического метода моделирования термонапряжений заключается в изменении скорости распространения поляризованного монохроматического света при наличии внутренних напряжений в оптическом материале. Это сопровождается образованием интерференционных полос, которые соответствуют тому или иному термонапряженному состоянию. При этом разность фаз поляризованного света зависит от разности главных напряжений модельной пластины (плоская задача термоупругости). В модельной пластине из оптического материала создают внутренние напряжения, эквивалентные температурным. Цена полосы в единицах напряжений находится из тестового примера (например, растяжение вдоль координатной оси). Несомненным достоинством этого метода моделирования термонапряжений является его наглядность. Действительно, интерференционные полосы характеризуют все особенности распределения термонапряжений и допускают количественное описание.

Два метода моделирования температурных напряжений взаимно дополняют друг друга и способствуют получению достоверных результатов. Модельную пластину из оптического материала нагружают распределенным давлением и получают функцию прогиба. Через модельную пластину с идентичным внешним давлением проходит поляризованный монохроматический свет и возникают интерференционные полосы. Они соответствуют термонапряжениям и дают наглядную картину их распределения.

### Список литературы

- [1] Иванов А.С. Математические аналогии в механике сплошной среды. М.: МГОУ, 2009, 179с.
- [2] Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. Пер. с англ. М.: Наука, 1979, 560с.
- [3] Драгунов Ю.Г., Власов Н.М., Иванов С.Д., Федик И.И. Самоуравновешенные внутренние напряжения. М.: МГОУ, 2010, 391с.

# ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАГРУЖЕННОСТИ, ДЕФЕКТНОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ НАТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

А.С.Чернятин

*ИМАШ РАН, Россия, Москва*

В работе изложены основы методики и соответствующего программного комплекса для определения параметров напряжённо-деформированного состояния (НДС), дефектности натуральных объектов с трещинами, а также степени деградации материалов на основе математической обработки данных экспериментов. Разработанный методический подход базируется на расчетной оценке указанных параметров ( $P_j$ ) из условия минимума целевой функции ( $I$ ), отражающей комплексное расхождение между массивами экспериментальных данных ( $e_i^*$ ) и результатов численных решений ( $e_i$ ) соответствующих модельных задач.

Для получения  $e_i^*$  используются методы электронной цифровой спекл-интерферометрии или корреляции цифровых изображений, которые позволяют регистрировать поля перемещений на поверхности исследуемых объектов непосредственно в цифровом виде в натуральных условиях. Массив  $e_i^*$  может быть обусловлен как непосредственным нагружением объекта, так и другими воздействиями на нагруженную область (например, высверливанием малого отверстия). Для расчёта  $e_i$  на основе решения соответствующих модельных задач используется МКЭ.

В отличие от традиционных экспериментально-расчётных способов определения параметров (НДС), базирующихся на использовании априори известных аналитических или приближённо устанавливаемых соотношений между искомыми параметрами  $P_j$  и экспериментальными данными  $e_i^*$ , методика не имеет принципиальных ограничений на область применения и позволяет учесть все конкретные особенности решаемой задачи.

Для реализации предложенного подхода разработан «гибкий» вычислительный комплекс, включающий программы с графическим интерфейсом (в среде MATLAB) и параметрические макросы (в среде ANSYS), которые обеспечивают:

1. интерактивное формирование массива экспериментальных данных  $e_i^*$  по экспериментально полученным цифровым картинкам полей деформационных откликов;
2. решение прямой задачи расчёта величин деформационных откликов  $e_i$  в назначенных точках измерений при заданных значениях параметров  $P_j$ ;
3. решение обратной задачи определения параметров  $P_j$  на основе минимизации целевой функции  $I(e_i, e_i^*)$ , в качестве которой могут быть приняты как среднеквадратическое и максимальное отклонения, так и функции специального вида;
4. численное исследование влияния разбросов различных факторов на точность определения величин параметров  $P_j$ .

Ряд разработок из области прикладной математики и программирования позволил существенно увеличить скорость решения задач и повысить точность результатов.

Эффективность метода иллюстрируются примерами решения практических задач:

- оценка нагруженности трубопроводов, имеющих дефекты типа трещин;
- оценка размеров трещин на наружной и внутренней поверхностях трубопроводов;
- исследование пространственного распределения остаточных напряжений;
- оценка деградации свойств материала по толщине детали.

Показана возможность применения методики для одновременного определения разнородных параметров (нагруженности и геометрических параметров дефектов).



## СПЕЦИАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НОВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ ВЫСОКОДЕМПФИРУЮЩИХ СТАЛЕЙ МАССОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ

**И. Б. Чудаков, Н. М. Александрова, С. Ю. Макушев**  
*ФГУП “ЦНИИчермет им.И.П.Бардина”, Россия, Москва*

Известно, что применение сплавов высокого демпфирования (СВД) позволяет добиться значительного улучшения шумовых и вибрационных характеристик промышленных изделий [1]. В определенных случаях (например, когда изделие в ходе эксплуатации подвергается воздействию высоких температур), применение СВД является единственным экономически целесообразным способом борьбы с вредными вибрациями, т.к. применение пластиков, резин или актуаторов активного гашения вибрации становится невозможным. Значение СВД для экономики будет возрастать, т.к. в последнее время во многих индустриальных странах допустимые уровни вибрации и шумов стали весьма жестко регламентироваться законодательно. Однако массовое применение широко известных СВД (таких, как сплавы на основе металлических систем Mn-Cu, Ni-Ti, Ni-Co) в гражданских отраслях промышленности является труднореализуемым по экономическим соображениям. В последние 10-15 лет значительные усилия ученых и инженеров были направлены на разработку высокодемпфирующих сплавов и сталей на основе систем Fe-Al и Fe-Al-Si [2]. В дополнение к высокой демпфирующей способности, приемлемому уровню мехсвойств и высокой технологичности, сплавы на основе системы Fe-Al выгодно отличаются от аналогов своей низкой себестоимостью (благодаря отсутствию в своем составе дорогостоящих компонентов, благодаря тому, что для производства этих материалов может быть использовано высокопроизводительное оборудование современных металлургических предприятий [2]). В настоящей работе анализируется комплекс специальных свойств высокодемпфирующих сталей типа 01Ю5Т [3].

Табл. 1. Уровень свойств 2-х конструкционных сталей (01Ю5Т и массовой стали Ст. 3)

Характеристика	Сталь 01Ю5Т	Сталь Ст. 3
Модуль упругости $E$ , МПа	180000 - 200000	210000–215000
Демпфирующая способность $\psi_{\max}$ , %	25 - 50	0,2 ~ 1,0
Область рабочих температур, °С	-150 ÷ + 550	-40 ÷ + 425
Предел текучести $\sigma_{0.2}$ , МПа	320 - 450	не менее 240
Предел прочности $\sigma_B$ , МПа	420 - 600	не менее 380
Относительное удлинение, %	30 - 40	25 - 27
Плотность, г/см <sup>3</sup>	7,3	7,9

Сопоставление свойств сталей (Табл. 1) показывает, что стали типа 01Ю5Т могут быть напрямую применены взамен ныне используемых без принципиального изменения конструкции изделия. Анализ комплекса демпфирующих, механических и специальных свойств сталей типа 01Ю5Т показывает, что эта конструкционная высокодемпфирующая сталь может быть успешно использована в промышленности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Kawahara K. Key engineering materials, 2006, Vol.319, pp. 217-223.
- [2] Chudakov I.B. et al. Solid State Phenomena, 2008, Vol. 137, pp.119-128.
- [3] Чудаков И.Б. и др. МитОМ, 2012, №5 (683), с.33-37.

## ЛОКАЛИЗАЦИЯ СДВИГА В МОНОКРИСТАЛЛАХ МЕДИ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА СЖАТИЕ И ТРЕНИЕ

А.В.Чумаевский<sup>1)</sup>, С.Ю.Тарасов<sup>2)</sup>, Д.В.Лычагин<sup>1)</sup>, Е.А.Колубаев<sup>2)</sup>, С.А.Беляев<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, Российская федерация, г. Томск, пл. Соляная 2, 634003

<sup>2)</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Российская федерация, г. Томск, пр. Академический 4/2, 634021

В работе исследована организация сдвига на боковых гранях монокристаллов с ориентацией оси нормального давления  $[110]$  при сжатии и трении в направлении  $[1\bar{1}\bar{1}]$ . Сжатие производили при комнатной температуре со скоростью 0,35 мм/мин. Трение по схеме «диск-палец» при скорости скольжения 500 мм/с по кварцевому стеклу при нормальной нагрузке 12 Н и пути трения 200 м.

При деформации монокристаллов на поверхности боковых граней формируется деформационный рельеф, отражающий сущность процессов, происходящих в объеме кристалла, и представленный совокупностью следов от сдвига по плоскостям скольжения. Локализация сдвига в монокристаллах с данной кристаллографической установкой происходит с образованием мезопачек следов сдвига ( $МП$  на рис. 1). При трении максимальные напряжения достигаются вблизи области контакта, и образование мезопачек начинается от данной области. Максимальная высота мезопачек приходится на приторцевую область, при удалении от торца высота мезопачки убывает до нуля у второго её края ( $МП$  на рис., а). При сжатии на начальных этапах деформации основными концентраторами напряжений являются боковые и приторцевые ребра монокристалла. Образование мезопачек по плоскости сдвига, задействованной в деформации изначально происходит от боковых ребер монокристалла ( $МП$  на рис. 1, б). Мезопачки по второй плоскости формируются от торцевых ребер только при достижении  $\sim 10\% \epsilon$ . В центральной области по второй плоскости образуются полосы следов сдвига между мезопачками по первой плоскости ( $СС$  на рис. 1, б). Примечательно, что при трении пересекающиеся мезопачки по двум плоскостям скольжения занимают большую площадь, чем при сжатии.

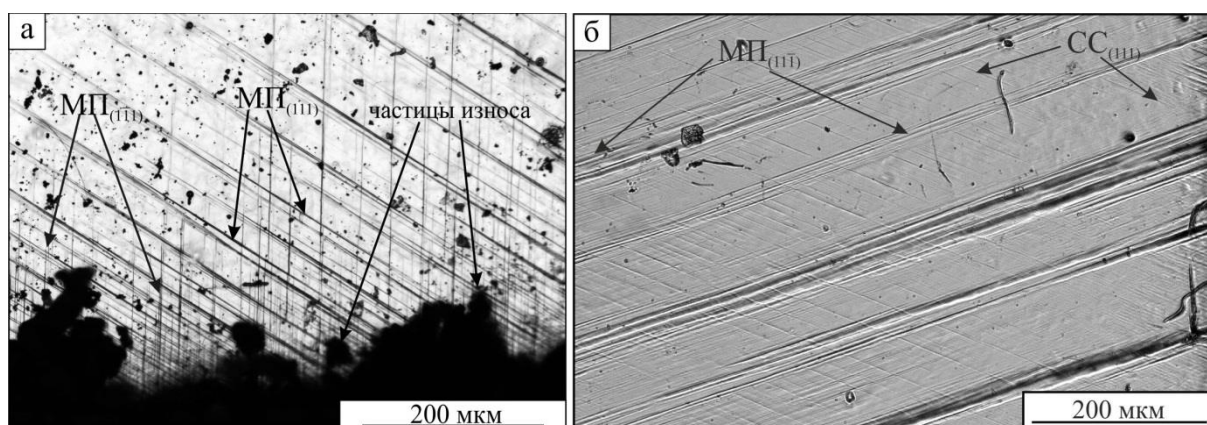


Рис. 1. Локализация сдвига в мезопачках следов при трении (а) и при сжатии (б)

Локализация сдвига в мезопачках следов показывает, что при сжатии роль концентраторов напряжений на начальном этапе деформации выполняют боковые ребра, а затем – торцевые. При трении боковые ребра монокристаллов не являются концентраторами напряжений.

## МАКРОФРАГМЕНТАЦИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА [110]- МОНОКРИСТАЛЛОВ ПРИ ТРЕНИИ ПО СХЕМЕ «ДИСК-ПАЛЕЦ» И ОДНООСНОМ СЖАТИИ

А.В.Чумаевский <sup>1)</sup>, С.Ю.Тарасов <sup>2)</sup>, Д.В.Лычагин <sup>1)</sup>, Е.А.Колубаев <sup>2)</sup>, С.А.Беляев <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет, Российская федерация, г. Томск, пл. Соляная 2, 634003

<sup>2)</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Российская федерация, г. Томск, пр. Академический 4/2, 634021

Исследованы монокристаллы меди технической чистоты, выращенные по методу Бриджмена, с ориентацией оси нормальной нагрузки [110] подвергнутые сжатию и трению по схеме «диск-палец». Размеры образцов составляют 3,5×3,5×7 мм.

Деформационный рельеф в обоих случаях представлен следами сдвига и мезопачками следов (рис. 1). При трении картина рельефа разбивается на 4 фрагмента, обусловленные схемой напряженного состояния и площадью контакта образца с контртелом (рис. 1, а). Наибольшая плотность следов сдвига по плоскостям скольжения достигается во фрагменте 1, в котором достигаются максимальные касательные напряжения. Средняя плотность следов сдвига приходится на фрагмент 4. Минимальная плотность следов сдвига во фрагментах 2 и 3, сдвиг по плоскостям скольжения в которых обусловлен составляющей силы нормального давления.

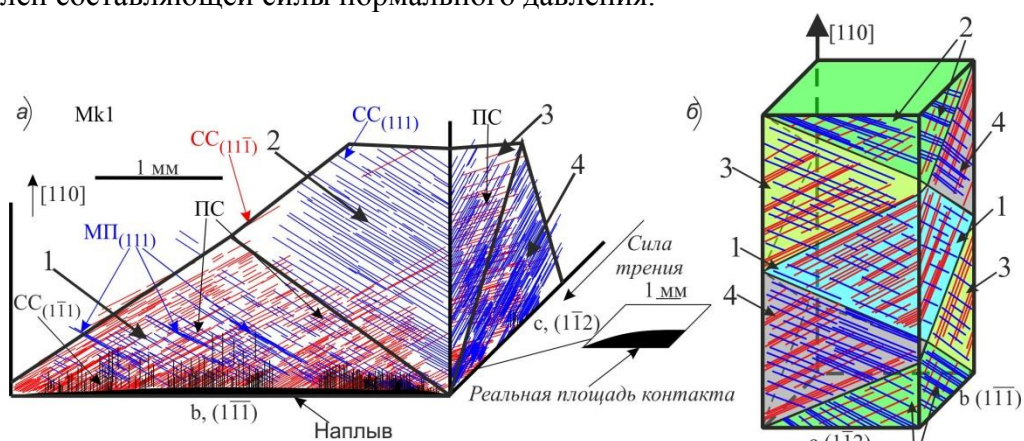


Рис. 1. Макрофрагментация деформационного рельефа при трении (а) и сжатии (б)

При сжатии монокристаллов данной кристаллографической ориентации наблюдается иная картина рельефа (рис. 1, б). Фрагментация образцов обусловлена в большей степени возможностью выхода плоскостей сдвига на боковые грани. Сдвиг по плоскости, вступающей в деформацию первой приходится на область, в которой эта плоскость со всех сторон выходит на боковые грани (1 и 4 на рис. 1). Сдвиг по второй плоскости происходит в основном в областях, в которых данная плоскость контактирует с пуансонами испытательной машины (2 и 4 на рис. 1). На пересечении данных областей (4 на рис. 1) и в свободных от них местах (3 на рис. 1) образуются вторичные фрагменты со смешанным распределением следов сдвига. Симметричное расположение фрагментов в монокристалле приводит к тому, что его форма в процессе деформации практически не изменяется.

Таким образом, при данных методах нагружения макрофрагментация деформационного рельефа обусловлена различными факторами. При сжатии наибольшую роль играет возможность выхода носителей сдвига на боковые грани, т.е. стесненность сдвига, а при трении – схема напряженного состояния.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАВИТАЦИИ В ПРОТОЧНОМ ГЕНЕРАТОРЕ ВИХРЕВОГО ТИПА

О.В. Шмырков, Н.В. Гун

*Филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН Научный центр  
нелинейной волновой механики и технологии РАН, Российская Федерация, Москва*

При втекании высоконапорных тангенциальных и радиальных струй в камере вихревого генератора проточного типа возникает развитая кавитация. Наибольшая интенсивность кавитации реализуется в донной части генератора вблизи мест втекания и взаимодействия струй между собой и с проточной поверхностью. При втекании тангенциальных струй эрозия донной поверхности происходит в виде глубокой кольцевой впадины в периферийной части дна. Вдоль оси генератора возникает вихревая каверна, предохраняющая центральную часть донной поверхности от воздействия струй. При втекании радиальных струй эрозия образуется по всей донной поверхности. Наличие противодействия в камере за генератором приводит к возникновению пиков давления резонансного типа. С увеличением величины противодействия эти пики распространяются в область больших частот до  $f = 20$  кГц. В тоже время при увеличении давления за генератором интенсивность кавитации в донной области снижается при втекании струй обоих типов. Получено, что интенсивность кавитации в донной области существенно зависит от типа втекающих струй, формы проточной части генератора, а также от положения места втекания струй относительно дна и диаметра камеры генератора.

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТКАНЫХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ И ЧЕЛОВЕКА ПРИ КОНТАКТНОМ ОБОГРЕВЕ

А.А.Шульженко, М.Б.Модестов, Б.М.Модестов  
*ИМАШ РАН, Россия, Москва*

Целью данной работы является рассмотрение процессов, происходящих в системе: человек – тканый нагреватель – термоизоляционные слои – внешняя среда. Было подробно описано распределение температур в пределах этой системы [1]. Тканый нагреватель работал в условиях контактного обогрева.

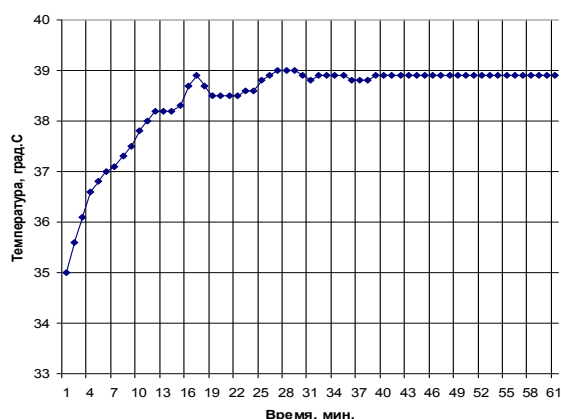


Рис. 1. Зависимость изменения температуры на поверхности тканого нагревателя от времени.

Возникающие колебания температуры на поверхности тела человека являются реакцией на воздействующий на человека тепловой сигнал. Такая реакция связана с включениями системы терморегуляции человека: открытием капилляров и, самое главное, потовыделением. Именно в период потовыделения происходит основное изменение коэффициента теплоотдачи на поверхности тела человека, и температура начинает снижаться. Под воздействием нагревателя пот постепенно высыхает, и температура снова повышается до момента нового включения системы терморегуляции, приводящего к новому снижению температуры. При наличии здоровой системы терморегуляции у человека таких колебаний может быть несколько.

Так как в рассматриваемой системе присутствует обратная связь, то есть не только температура нагревателя воздействует на человека, а и система терморегулирования человека воздействует на температуру в области тканого нагревателя (рис.1), то данные свойства можно использовать в качестве основы системы терморегулирования при построении систем обогрева человека.

Созданная технология, позволяющая изготавливать серийные тканые электронагревательные элементы с высоким уровнем повторяемости электрических и тепловых параметров, предоставляет еще одну возможность - в рамках системы тканый электронагреватель-человек-внешняя среда можно строить приборы и изучать реакцию человека на прецизионный тепловой сигнал, получать дополнительную (к уже существующим способам исследования человека) информацию о состоянии организма человека.

Результаты исследования можно также использовать для разработки широкого круга изделий, работающих на принципах контактного обогрева биологических объектов.

1. Шульженко А.А., Модестов Б.М., Модестов М.Б. Некоторые особенности теплового взаимодействия нагревателей и человека при контактном обогреве. М., Проблемы машиностроения и надежности машин, 2008, № 4, с. 97-102.

## ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТРИБОЛОГИИ

**Л.Ш. Шустер**

*Уфимский государственный авиационный технический университет  
Россия, г. Уфа*

Полученные в работе теоретико-экспериментальные обобщения по адгезионному взаимодействию твердых металлических тел с учетом температуры и давления на контакте позволяют комплексно решить проблему оптимизации процессов трения и изнашивания при повышенных температурах фрикционного контакта. Комплексность решения состоит в следующем.

Установлено, что температура  $\theta_{\text{пор}}$  порога совместимости трущихся поверхностей, которая в значительной мере определяет эксплуатационные возможности тяжело нагруженных трибосопряжений (ТНТС), функционально связана с температурой  $\theta_{\text{хар}}$ , которая обуславливает важнейшие характеристики технологической обрабатываемости материалов фрикционной пары. Причем, величины температур  $\theta_{\text{пор}}$  и  $\theta_{\text{хар}}$  скорректированы между собой так, что факторы, способствующие повышению одной из них, неизбежно приводят к снижению другой. К числу этих факторов относятся: структурно-фазовый и химический составы контактирующих материалов, их физико-механические характеристики. Это положение позволяет одновременно оптимизировать и работу ТНТС, и технологические операции механической обработки деталей этих сопряжений. Для этого необходимо температуру  $\theta_{\text{пор}}$  принять близкой к рабочей (эксплуатационной) температуре контакта в проектируемом трибосопряжении. Из соответствующей математической модели определить требуемые структурно-фазовый и химический составы контактирующих материалов, а затем по ним подобрать соответствующие конструкционные материалы и назначить их химико-термическую обработку (или создать новые материалы и технологии). При этом появляются возможности сразу же оценить и технологическую обрабатываемость выбранных материалов и оптимизировать чистовые операции механической обработки деталей трибосопряжения: назначить наиболее износостойкую марку инструментального материала; вести автоматизированное управление технологического режима обработки с целью достижений наименьшего (или заданного) изнашивания инструмента, а также формирования показателей состояния обработанного поверхностного слоя, обеспечивающих наибольший ресурс деталей трибосопряжений; практически исключить вероятность появления брака и т.д. Так как при этом взамен стендовых испытаний предлагается проводить менее длительные и трудоемкие исследования по адгезионному взаимодействию с учетом температуры и давления на фрикционном контакте, то существенно сокращаются сроки конструкторской и технологической подготовок производства.

Разработана термодинамическая модель изнашивания твердых тел, полученная из условия устойчивости стационарного состояния с минимальным производством энтропии на подвижном фрикционном контакте. На основании этой модели предложены и апробированы принципы рационального выбора и применения материалов (и покрытий) деталей ТНТС и технологических инструментов.

# ПРИМЕНЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В СТРУЙНО- ВИХРЕВЫХ МЕЛЬНИЦАХ

Н.И. Яковенко, С.С. Панин, Е.А. Брызгалов, Д.В. Курменев

*Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук «Научный  
центр нелинейной волновой механики и технологии РАН» (Москва)*

В Научном центре нелинейной волновой механики и технологий РАН (НЦ НВМТ РАН) под руководством академика Ганиева Ривнера Фазыловича ведутся работы по созданию новых типов машин и аппаратов работа которых основана на явлениях и эффектах нелинейной волновой механики. Теоретической базой для выполнения данных работ является, научные основы нелинейно волновой механики, созданные коллективом НЦ НВМТ РАН. Последние результаты работ представлены [1-6].

Целью работы является исследование влияния акустических генераторов на процессы измельчения сыпучих сред в струйно-вихревых мельницах.

Для реализации данной работы коллективом НЦ НВМТ РАН была разработана и изготовлена струйная вихревая мельница Рис. 1.

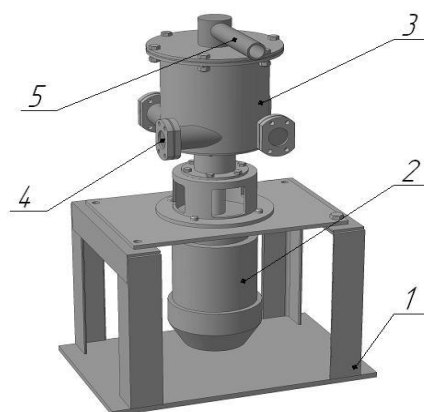


Рисунок 1.

Конструкция волновой мельницы смонтирована на жесткой неподвижной станине (1). Обработка образца происходит в рабочей камере (3) с четырьмя входными патрубками (4), в одном из которых размещаются различные типы волновых генераторов. Через входные патрубки (4) в рабочую камеру (3) поступает сжатый воздух. Конструкция рабочей камеры (3) предусматривает два типа подачи сжатого воздуха: встречные потоки и тангенциально направленные, а также возможность комбинирования воздействия воздушных струй и волновой обработки с механическим воздействием вращающихся лопаток, на обрабатываемую среду внутри рабочей камеры (3). Вращающиеся лопатки расположены в рабочей камере (3), и имеют привод от внешнего электродвигателя (2). Для удаления измельченного материала в конструкции волнового измельчителя предусмотрен выпускной патрубков (5). После чего был проведен ряд экспериментов на лабораторном стенде по исследованию измельчения твердых сыпучих сред методами волновой



механики и проведена оценка степени влияния акустических генераторов на интенсификацию процессов измельчения в струйно-вихревых мельницах.

#### Список литературы

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. 712 с.
2. Ганиев Р.Ф. Волновые машины и технологии (Введение в волновую технологию). М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. 192 с.
3. Веденин А.Д., Ганиев О.Р., Ганиев С.Р., Панин С.С. и др. Волновые технологии и машины (Волновые явления в технологиях.) М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. 66 с.
4. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Панин С.С. и др. Наука и технологии // Экспериментальное исследование влияния нелинейных волновых эффектов в многофазных средах. Тр. XXIII Российской школы. М.: Миасс, 2003. С. 224-232.
5. Панин С.С. Исследование микроструктуры магнитодиэлектрика, полученного с использованием волновой технологии / Ганиев Р.Ф., Брызгалов Е.А., Войтко В.В., Корнеев А.С., Михеев С.Ю., Николаенко В.С., Панин С.С. // Справочник. Инженерный журнал. – М.: 2011. - № 2 – с. 3-7
6. Панин С.С. Нелинейные волновые эффекты в течениях неоднородных жидкостей в полях внешних сил / Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Панин С.С., Яковенко Н.И. // Международная научная школа молодых учёных и специалистов «Механика неоднородных жидкостей в полях внешних сил»: сб. тез. докл. // Москва ИПМ РАН. – М.: 2011. – с. 67



## МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРИ ТРЕНИИ

З.В.Игнатъева<sup>1</sup>, М.М. Хрущов<sup>1</sup>, В.А.Левченко<sup>2</sup>, В.Н.Матвеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт машиноведения им. А.А.Благонравова, РАН

<sup>2</sup>Химический факультет МГУ им. М.И.Ломоносова

Одним из актуальных трендов современной трибологии является исследование твердых углеродных покрытий нового поколения, обладающих рядом уникальных свойств, открывающих возможности для создания принципиально новых технологий и конструкций приборов и механизмов триботехнического назначения. Обращает на себя внимание, что большинство опубликованных исследований углеродных покрытий направлено на оценку их трибологических характеристик, в то время как собственно механизм разрушения покрытий практически не исследован. В настоящей работе исследован механизм разрушения двух твердых углеродных покрытий (монокристаллического и аморфного) при испытаниях на трение по схеме «сфера-диск» в режиме граничной смазки. Исследования проводились методом оптической микроскопии на микроскопе Neofot-32 с использованием системы компьютерной обработки и моделирования оптических изображений ImageExpert 3. Показано, что разрушение покрытия в зоне дорожки трения осуществляется за счет изнашивания вершин столбчатых кристаллитов, а также за счет выламывания как отдельных кристаллитов, так и групп их, что приводит к образованию объемных дефектов сплошности покрытия. При этом для монокристаллического углеродного покрытия более характерно образование дефектов сплошности покрытия в результате выламывания отдельных столбчатых кристаллитов, которые могут служить микрорезервуарами для удерживания смазочного материала в зоне трения. В то же время при большей площади повреждения поверхности покрытия и оголения материала подложки возможно развитие процессов схватывания, т.е. нарушение нормальной работы пары трения при повышенных температурах, что и наблюдалось при трибологических испытаниях (а-С)покрытия.

**Ключевые слова:** углеродное покрытие, граничная смазка, разрушение поверхности.

## КОЛЕБАНИЯ СЖАТО-СКРУЧЕННОЙ БУРОВОЙ ШТАНГИ С УЧЕТОМ НАЧАЛЬНОЙ КРИВИЗНЫ

А.Б. Кыдырбекулы<sup>1)</sup>, Л.А. Хаджиева<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Институт механики и машиноведения им. У.А. Джолдасбекова, Казахстан, Алматы

<sup>2)</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, Алматы

Целью работы является моделирование движения буровых штанг неглубинного бурения, применяемых в нефте-газодобывающей промышленности, с учетом начальной кривизны.

Известно, что в технологическом плане процесс бурения скважины является одним из финансово- и трудоемких этапов в добыче природного сырья, который в дальнейшем должен обеспечить их безаварийную добычу. Одной из проблем процесса бурения являются искривления скважин, вызванные колебаниями буровых штанг под воздействием различных факторов геологической, технической и другой природы. К таковым можно отнести переменность осевых сил и крутящих моментов, начальная кривизна буровой штанги и др. Интенсивность искривления скважин зависит от величины колебаний буровых штанг, в связи с чем анализ последних представляет научный и практический интерес.

В работе моделируется движение сжато-скрученной буровой штанги, потерявшей статическую устойчивость прямолинейной формы за счет ее начальной кривизны. Моделируется она, как свободно опертая балка с несближающимися концами. Начальная кривизна буровой штанги задается как  $V_0(x)$  – начальное смещение буровой штанги от недеформированного положения ее продольной оси. На конце буровой штанги действуют переменная осевая сжимающая нагрузка  $N(x, t)$  и переменный крутящий момент  $M(x, t)$ :

$$M(x, t) = \alpha_1 M_0(x) + \beta_1 M_t(x) \cdot \Phi_M(t) \quad (1)$$

$$N(x, t) = \alpha_2 N_0(x) + \beta_2 N_t(x) \cdot \Phi_N(t) \quad (2)$$

где  $\Phi_M(t)$  и  $\Phi_N(t)$  – периодические функции. Буровая штанга вращается со скоростью  $\omega$ . Допускается конечность деформаций буровой штанги, ведущая к нелинейности динамической модели.

Исследуется влияние начальной кривизны буровой штанги на ее нелинейные колебания. Проведено квазианалитическое исследование динамики буровой штанги. Используется метод разделения переменных – метод Бубнова-Галеркина. При этом решение нелинейной модели задавалось в виде разложения по спектру основных форм колебаний. Поскольку уравнения движения оказываются связанными через нелинейные члены, возбуждение одной формы колебаний может привести к перекачке части ее энергии в другие первоначально невозбужденные формы и вызвать колебания по этим формам.

В работе исследованы случаи колебаний по первым трем формам изгиба оси буровой штанги. Проведен численный анализ нелинейных колебаний буровой штанги в зависимости от ее геометрических и физических параметров, а также начальной кривизны. Исследования проводились для стальных и дюралюминиевых буровых штанг. Установлено, что увеличение длины буровой штанги (до 500 м) ведет к росту амплитуд колебаний, причем для стальной штанги они превышают величины амплитуд колебаний дюралюминиевой штанги. Начальная кривизна буровой штанги оказывает существенное влияние на ее колебания. Результаты исследований тестируются линейной моделью.

## АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ВЕРОЯТНОСТЕЙ РАЗРУШЕНИЯ И ЗАПАСОВ

Н.А.Махутов, В.В.Зацаринный

ИМАШ РАН, Россия, г.Москва

Традиционные расчёты на прочность для случаев статического и циклического нагружения предполагают определение запасов по деформациям  $e$ , напряжения  $\sigma$  и числам циклов  $N$

$$e_k/e_a=n_e, \sigma_k/\sigma_a=n_\sigma, N_k/N=n_N \quad (1).$$

Эти величины запасов зависят от типа конструкций, их ответственности и варьируются в пределах

$$n_\sigma=1,2 - 2,5; n_e=2 - 5; n_N=5 - 20 \quad (2).$$

Для оценки надёжности и безопасности машин и конструкций в расчёт по выражению (1) вводятся вероятностные расчётные характеристики с индексом  $P$ , где  $P$  – значение соответствующих параметров для заданной вероятности. Для их определения проводятся статистические испытания конструкционных материалов при статическом и циклическом нагружениях (по 10 - 20 образцов на каждый уровень циклических напряжений и для однократного статического нагружения).

Вероятность образования разрушения или недопустимых пластических деформаций при заданных и варьируемых величинах  $\sigma$ ,  $\sigma_a$  и  $e_a$  получается из условия (2) при  $n_\sigma=1$  и  $n_e=1$ . Для случаев в пределах упругого решения задач по (1) и (2) соответствующие исследования проводились в ИМАШ РАН в течении десятилетий (С.В.Серенсен, В.П.Кобаев, И.М.Петрова, И.Г. Гадолина), а также в других организациях (ЦИАМ, ЦАГИ, ЦНИИ ПСК). В тех случаях, когда деформирование образцов и натуральных конструкций происходит в упругопластической области, связь между напряжениями и деформациями становится нелинейной и многопараметрической

$$\sigma=f(e, \alpha_\sigma, m, N, t, \tau) \quad (3)$$

где  $\alpha_\sigma$ - теоретический коэффициент концентрации упругих напряжений;

$t$  - температура;

$\tau$  – время нагружения;

$N$  – число циклов нагружения до образования трещин циклического разрушения;

$m$  –коэффициент упрочнения в упругопластической области.

Это существенно усложняет реализацию традиционных соотношений (2). Экспериментальная проверка подхода на основе (2) и (3) проводилась в ИМАШ РАН (Н.А.Махутов, В.В.Зацаринный, В.А.Новиков) на гладких цилиндрических и плоских образцах с концентратором из сталей X18H10T и 15X2НМФА при нормальных и повышенных температурах (650 и 350<sup>0</sup>С соответственно).

В докладе приведены результаты расчётно-экспериментального анализа применимости выражений (1 – 3).

## **НЕКОТОРЫЕ НЕРЕШАЕМЫЕ ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИХ РЕШЕНИЯ. СРЫВ ВИХРЕЙ ПРИ ПЛОХОМ ОБТЕКАНИИ И ПЕЧАЛЬНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ТАКОГО СРЫВА**

Ланда П.С.

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова*

В настоящем докладе мы обсуждаем так называемые нерешаемые задачи, т.е. задачи, для которых нельзя записать динамических уравнений. Причиной этого является возникновение в таких системах непредсказуемых явлений, которые являются случайными, но не стохастическими, т.е. они не могут быть описаны некоторым распределением вероятностей. Подобные проблемы часто возникают в гидродинамике. Такие задачи не могут быть решены ни аналитически, ни численно. Широко известным примером таких задач является изучение поведения упругого тела при его плохом обтекании потоком жидкости. При таком обтекании без всяких видимых причин могут возникнуть сильные автоколебания этого тела, называемые срывным флаттером. Совсем недавно от такого флаттера погиб наш замечательный глазной врач Федоров. Срывной флаттер принципиально отличается от классического флаттера крыльев дозвуковых самолетов, связанного с взаимодействием изгибных и крутильных колебаний. Исследовать срывной флаттер можно только качественно, используя относительно простые математические модели, основанные на экспериментальных данных. Следует отметить, что эти модели не являются изоморфными исследуемой системе просто потому, что мы не можем адекватно записать уравнений этой системы. В силу универсальности теории колебаний можно ожидать, что эти модели будут в каких-то чертах отражать поведение исследуемой системы. В наших работах [1] в качестве такой модели используется автоколебательная система с двумя степенями свободы, в которой важную роль играет явление затягивания частоты. Поведение этой системы существенно зависит от расстройки между частотой автоколебаний задающей системы и собственной частотой колебаний дополнительной системы. Показано, что существуют области расстроек, где автоколебания невозможны. Исследование этих областей исключительно важно в целях предотвращения очень опасного срывного флаттера.

### Литература

1. Landa P.S, McClintock P.V.E. Aeolian tones and stall flutter of lengthy objects in fluid flows. *J. of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 2010, v. 43, 375101 – 375109.

# ИННОВАЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

С.Д. Иванов

*ПИ(ф) МГОУ имени В.С. Черномырдина, РФ, Подольск*

В настоящее время инновационные технологии контроля и диагностики выпускаемой продукции занимают значительную долю в промышленном секторе экономики страны. Этому способствует стремительное развитие информационных оптических систем на базе современной электроники. Однако в области проведения научных исследований, к примеру, остаточного напряженного состояния исследуемых объектов с переменными свойствами, такие универсальные системы не могут быть применимы в силу отсутствия специализированных функциональных блоков, способных проводить качественную и количественную диагностику поверхностей точечного и микромасштабного характера.

Используемые в отечественной промышленности голографические и спекл-интерферометрические методы определения остаточных напряжений имеют, наряду с очевидными преимуществами, целый ряд недостатков, которые препятствуют широкому распространению этих методов. Перечислим основные проблемы внедрения оптических методов:

1. Отсутствие количественных оценок возникающих деформаций.
2. Узкий спектр применимости, связанный с большой подготовительной работой перед проведением эксперимента, в одних случаях и с малым количеством получаемой от эксперимента информации в других.
3. Нарушение сплошности исследуемых объектов. Само нарушение сплошности (высверливание) сопряжено с проблемами уменьшения точности эксперимента за счет вибрации от высверливания, что приводит к усложнению интерферометра.

С целью устранения вышеперечисленных недостатков в Подольском институте (филиале) МГОУ им. В.С. Черномырдина были разработаны инновационные методы голографической и спекл-интерферометрии на базе изготовленных интерферометров улучшенной конструкции.

Разработанные инновационные технологии диагностирования основаны на новом методе тарировки приборов наномеханики и методе голографии, использующего две длины волны. Эти методы позволили повысить точность измерений и существенно расширить функциональные возможности измерительных интерферометров. Появилась возможность осуществлять одновременное определение как нормальных, так и тангенциальных напряжений.

## ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ СТАЛИ Р6М5

А.В. Кондрашина

*МГОУ имени В.С. Черномырдина, РФ, Москва*

Сведения о характере разрушения многофазных материалов в оптимальных температурно-скоростных условиях сверхпластической деформации и при изменении этих условий, о влиянии на разрушение дисперсности и соотношения структурных составляющих ограничены. Отмечается, что разрушение начинается с образования пор на тех межфазных границах, где проскальзывание наиболее заметно.

Многие эксперименты, например на одноосное растяжение, показали, что разрушению материала предшествует образование и развитие межзеренных и межфазовых пор. Установлено, что образование пор при сверхпластической деформации под действием растягивающих напряжений характерно почти для всех сверхпластичных материалов. Наиболее вероятным местом зарождения пор являются границы зерен и фаз и особенно места тройных стыков. Известно, что в многофазном материале поры обычно появляются около крупных включений вследствие концентрации напряжений при блокировании этими включениями зернограницного скольжения [1, 2]. Установлено также, что чем меньше способность материала к порообразованию в различных температурно-механических условиях, тем больше его относительное удлинение при деформировании, что характерно для условий сверхпластической деформации стали Р6М5.

Для определения особенностей порообразования и разрушения стали Р6М5 при растяжении в различных температурно-скоростных условиях исследовали зону разрыва образцов в сечениях, проходящих через ось растяжения. Результаты количественной оценки участков разрушения показывают, что при растяжении в условиях сверхпластической деформации процесс порообразования выражен менее сильно, чем при повышенной пластичности, объемная доля пор ниже, размер (средний и максимальный) их меньше, они менее вытянуты в направлении растяжения, ниже показатель формы [3]. Так, площадь участка пор составляет  $0,065 \pm 0,008$  мм<sup>2</sup>, их объемная доля  $5,0 \pm 0,7$  %, максимальный диаметр  $20,0 \pm 2,9$  мкм (средний диаметр  $15,0 \pm 1,5$  мкм), показатель формы пор  $2,8 \pm 0,35$ .

При деформации в условиях сверхпластичности и повышенной пластичности на образцах стали Р6М5 образуется шейка. При этом деформация локализуется на межфазных поверхностях раздела, что приводит к более глубоким повреждениям – образованию укрупненных пор и трещин вблизи поверхности разрушения. Исследование особенностей разрушения стали Р6М5 показывает, что зона повреждений порами сосредоточена у оси образца. Это может быть причиной локализации деформации и снижения пластичности материала.

### Список литературы

1. Гуляев А.В. Сверхпластичность стали. – М.: Металлургия, 1982, 56с.
2. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. – М.: Металлургия, 1984, 264с.
3. Кондрашина А.В., Кузовлева О.В., Гвоздев А.Е. Деформация, структурообразование и разрушение стали Р6М5. – Деформация и разрушение материалов. №8, 2007, с.11-16.

# ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАДАЧА ПРЕДЕЛЬНОГО ТЕРМОУПРУГОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ТЕПЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Л.И. Миронова

ПИ(ф) МГОУ имени В.С. Черномырдина, РФ, Подольск

В процессе проектирования конструкций, работающих в условиях тепловых нагрузок, разработчику важно знать ресурс работоспособности разрабатываемого изделия, обеспечивающего прочностную надежность и эксплуатационную стойкость. Такая оценка определяется совокупностью критериев предельного состояния, к которым относятся, как правило, принятые величины наибольших нормальных напряжений, наибольших главных деформаций, наибольших касательных напряжений, энергии формообразования или комбинация этих параметров[1]. Предлагается следующий подход в рассмотрении данной проблемы.

Для реальных инженерных задач, связанных с определением предельных состояний конструкций в условиях действия температурных градиентов, необходимо установить условие перехода от упругой стадии деформирования к пластической стадии, критерием которого может быть критерий минимума функционала упругой энергии тела[2]. Задача нахождения температурного силового фактора условного перехода сводится к нахождению экстремума, т.е. относится к классу экстремальных задач. Ее математическая формулировка определяется стандартной записью  $f_0(x) \rightarrow \inf(\sup); x \in C$ . Необходимым условием локального минимума будет правило Лагранжа

$\mathfrak{F}_x = \sum_{i=0}^m \lambda_i f_i'(x^*) = 0$ . Функционал упругой энергии тела является квадратичным, к нему

применимы условия Лежандра и Якоби, при которых функционал является неотрицательным. В решении экстремальной задачи элемент  $x^*$  доставляет экстремум тогда, когда множители Лагранжа  $\lambda_0, \dots, \lambda_n$  не все равны нулю, и таковы, чтобы

выполнялись следующее соотношение  $\sum_{i=0}^n \lambda_i (\Lambda_i x^* + a_i) = 0$ , где  $\Lambda$  - линейный непрерывный

оператор  $\Lambda: X \rightarrow X$ ,  $\lambda$  - собственное значение оператора, если существует вектор  $x \neq 0$ , такой, что  $\Lambda x = \lambda x$ . При решении задачи осесимметричного локального нагрева цилиндрической оболочки в условиях действия градиентного температурного поля по ее толщине в качестве таких множителей могут быть приняты функции перемещения, деформации и т.д. Используя алгоритм решения экстремальной задачи из работы [2], приведем полученное решение экстремальной температуры в следующем виде

$T_2 \approx 3,14 \sqrt{\frac{h}{R}} \cdot T_0 [1,3y_0 + e^{-1,3y_0} ((1+1,3y_0) \cos 1,3y_0 - \sin 1,3y_0)]$ . Здесь  $y$ -линейная координата

по дуге окружности поперечного сечения оболочки при  $\nu = 0,3$ .

## Список литературы

1. Миронова Л.И. Оценочные параметры в одном уточненном методе определения предельного состояния конструкции. – Проблемы машиностроения и автоматизации. №4, 2012, с.107- 111.
2. Миронова Л.И. Параметры оптимального управления термонапряженным состоянием конструкций оболочечного типа при термическом нагружении. – Проблемы машиностроения и автоматизации. №1, 2013, с.101-105.

## MAINTAINABILITY-RELATED SAFETY ANALYSIS FOR MINING EQUIPMENT

**L. Papic<sup>1</sup>, M. Pantelic<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Faculty of Technical Sciences, Serbia, Cacak

**I. Z. Aronov<sup>2</sup>**

<sup>2</sup>VNIIS, Russia, Moscow

Scientific results which are presented in this paper provides a new view on development maintenance conception of mining equipment. Results of investigation and applications methods Failure Modes, Effects and Criticality Analysis, Event Tree Analysis and Safety Control Chart have big research and practical value for mining equipment risk minimization [1]. These methods are in detail presented into the paper. Also, big importance have results of application other methods and approaches for improvement mining equipment maintenance conception as: life cycle engineering, reengineering, reliability analysis and safety analysis.

A new safety based maintenance concept suggested in the paper. Starting from system statistical safety analysis [2], considered step by step, it has been denoted that safety analysis in the period operation is performed mainly in situations when accident has never been happened. Using FMECA method was performed initial events of excavator unit screening (exclusion from the list of initial events whose effects are not significant). Benefits of FMECA of excavator unit maintenance enable initial events list reduction for performing the ETA. ETA methodology allows the determination of accident scenarios on the base of initial events, for the excavator unit. One initial event of them represents excavator unit's disturbance - accident precursor [3]. Safety control chart was created from where determined worst initial event. It is suggested on new safety assess adoption in systems operation stage based on disturbance sequence (accident scenario) modeling.

Effective maintenance concept of the mining equipment has been developed and proposed on the basis of universal possible usages analysis of corrective, periodically preventive, predictive, proactive and safety based maintenance concepts in modern conditions. Starting from certain advantages and disadvantages of each concept, effective maintenance concept of the equipment was reached by balanced approach, i.e. their appropriate combination. However, it has been indicated that traditionally used systems reliability characteristics are not sufficient for complete description of their effectiveness. It was established as a reason that reliability characteristics do not indicate function disturbance level during the system operation. It is suggested on new safety assess indicators adoption in the system operation stage based on disturbance sequence modeling. It is very important that inappropriate maintenance concept must not put under question safety, i.e. cause system accident condition. Any accident condition would result with staff health and life threats and great economical losses through reengineering and system launch costs. Because of that safety based maintenance concept was considered in this paper.

### References

- [1] Papic L., Pantelic M.: Implementation Methodology for Risk Minimization into Maintenance Process of Production System at Coal Mines, Report of Contract No. 4617 (In Serbian), DQM Research Center - Kolubara Metal, Prijedor - Vreoci, 2009, 468 p.
- [2] Papic L., Pantelic M., Aronov J., Verma A. K.: Statistical Safety Analysis Of Maintenance Management Process Of Excavator Units, International Journal of Automation and Computing, 7(2), May 2010, pp. 146-152.
- [3] Aleksandrovskaya L. N., Aronov I. Z., Kruglov V. I., Kuznetsov A. G., Patrakov N. N., Sholm A. M.: Bezopasnost' i nadezhnost' tekhnicheskikh system, Umiversitetskaya kniga, Logos, Moskva, 2008, 376 s.



## **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СОЗДАНИИ СОВРЕМЕННЫХ НАУЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ**

**Т.М.Томила, Б.Н.Бахтин, А.С.Гребенников, М.М.Лактионова,  
С.Н.Пономарева**

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

Рассматриваются современные методы разработки и наземной отработки новых научных космических приборов, работающих в условиях экстремальных динамических нагрузок в космосе. Основным требованием при создании механических конструкций таких приборов является обеспечение прочности при минимальной массе и сохранении функциональных свойств приборов. Существенной особенностью разработки таких конструкций является то, что сами конструкции и способы их крепления к космическому аппарату, индивидуальны для каждого проекта.

В докладе приведены результаты математического и компьютерного моделирования и экспериментальных исследований вибрационных и прочностных свойств конструкций таких приборов на всех этапах их создания. Для реализации натурных испытаний приборов по заданным внешним воздействиям – гармонической и случайной вибрации, удару - созданы специализированные стенды, разработаны методики проведения испытаний и программное обеспечение. Обсуждаются особенности использования автоматизированных стендов с управлением по обратной связи.

Приведены примеры конструкций приборов, спроектированных и успешно прошедших натурные испытания по методикам ИМАШ РАН и предназначенных для проектов Роскосмоса и иностранных космических агентств, в том числе прибора БТН для МКС (2008г.), прибора LEND для космического аппарата LRO(запуск 2009г.), прибора DAN для марсохода Кьюриосити (запуск 2011г.), а также приборов для перспективных проектов, которые находятся в стадии разработки.

## **ПРОБЛЕМА АКУСТИЧЕСКОГО «STEALTH»: СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ**

**Ю.И. Бобровницкий**

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

Как сделать произвольное тело невидимым – классическая проблема, не имеющая пока практического решения ни в оптике, ни в электродинамике, ни в акустике. Повышенный интерес к проблеме и высокая публикационная активность последних лет является следствием разработки двух новых теоретических методов ее решения, один из которых – импедансный метод – предложен и разрабатывается в ИМАШ РАН.

В докладе дается сравнительный анализ существующих теоретических методов решения проблемы в ее акустическом варианте, обсуждаются перспективы их практической реализации. Особое внимание уделено импедансному решению. Приведены результаты лабораторных экспериментальных исследований, проводимых в ИМАШ РАН, которые подтвердили правильность теории и показали высокую эффективность импедансного метода. Обсуждается его реализуемость.

## **СТРАТЕГИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ РЕАБИЛИТАЦИИ (ТСР) ЛЮДЕЙ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ ЗА СЧЕТ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОПРОТЕЗОВ И БИОРОБОТОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ.**

**А.К. Скворчевский<sup>1)</sup>, Е.И. Воробьев<sup>1)</sup>, К.А. Скворчевский<sup>2)</sup>, А.М. Сергеев<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>ИМАШ РАН, <sup>2)</sup>МФТИ, Россия, Москва)

Доклад посвящен актуальной теме и обусловлен тем обстоятельством, что исследования новых классов биопротезов и биороботов напрямую связано с государственной программой «Социальная поддержка жителей города Москвы на 2012-2016 годы, где предусмотрено развитие средств реабилитации, а также оснащение потребителей высокотехнологичными реабилитационными изделиями. В целом на технические средства реабилитации (ТСР) из бюджета города планируется израсходовать за 5 лет более 7 млрд. рублей, что позволит обеспечить уже в 2015 году 100% потребностей инвалидов города в необходимых средства реабилитации и протезно-ортопедических изделий. Эта работа не имеет аналогов за рубежом.

В докладе изложены результаты наших исследований антропоморфных биопротезов рук и ног и показаны возможности достижения максимальной комфортности во всех жизненных обстоятельствах для людей с ограниченными физическими возможностями. А это главная задача при использовании протезов идентичных (антропоморфных) органам человека. Создать эти протезы в настоящее время важнейшая фундаментальная научная задача.

Для этого нами исследуется возможность создания новых принципов управления протезами с использованием тактильной информации, получаемой от активных точек тела человека, посредством квантовых датчиков ВОИС и ВОБР. Для передачи силовых сигналов к биопротезам исследуются возможности искусственной мышцы на основе гидролазерного эффекта обладающей энергетическими параметрами естественной мышцы. Будут доложены результаты применения разработанных нами алгоритмов управления биопротезами рук и ног.

## **ИССЛЕДОВАНИЯ АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ АНТРОПОМОРФНЫМИ БИОПРОТЕЗАМИ, РАЗРАБОТАННЫМИ НА ИСКУССТВЕННЫХ МЫШЦАХ.**

**Е.И.Воробьев, А.К. Скворчевский, А.М. Сергеев, Н.С. Ковалев, А.А. Акентьев**

ИМАШ РАН, Россия, Москва

В докладе изложены результаты исследований алгоритмов управления антропоморфными биопротезами. Сложность этого заключается в том, что для осуществления разнообразных движений человек может использовать почти 800 мышц. Может показаться, что пытаться управлять системой с таким большим числом степеней свободы почти бессмысленно. Положение усугубляется еще и тем, что механизмы управления у человека в значительной степени неизвестны. Известны лишь некоторые глобальные связи управления, однако, открытые нами феномены живых систем, на основе современных квантово – информационных потенциалов алгоритмов управления заложенных в органах человека, позволяет нам сделать научно – обоснованную попытку применить искусственные мышцы на основе гидролазерного эффекта.

«Искусственная мышца» на основе гидролазерного эффекта использует тот же важный феномен живой природы, состоящий в том, что жидкость, находящаяся в сосудах или капиллярах под определенным давлением, расширяется и сжимается под действием когерентного оптического излучения (Ю.С. Кишварь, Г.П. Агравал, «Оптические солитоны».-М., 2005 г.). При этом создается гидродинамическое давление, а затем сила, способная привести в движение определенные объекты. Наши исследования показали, что это может составить принципиально новое направление исследований по созданию когерентно способных искусственных мышц для биопротезов человека.

Материалы этих исследований будут использованы в Государственной программе «Социальная поддержка жителей города Москвы на 2012 – 2016 гг.» в качестве новых классов антропоморфных биопротезов и биороботов для реализации новых технических средств реабилитации (ТСР) людей с ограниченными возможностями. Области применения: биомеханика, медицина, социальные учреждения реабилитации людей с ограниченными возможностями.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ АКТИВНЫХ ТОЧЕК ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ БИОПРОТЕЗАМИ И БИОРОБОТАМИ.**

**К.А. Скворчевский<sup>1)</sup>, Е.И.Воробьев<sup>2)</sup>, А.К.Скворчевский<sup>2)</sup>  
А.М. Сергеев<sup>2)</sup>, Т.В.Силова<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>МФТИ, <sup>2)</sup>ИМАШ РАН, Россия, Москва

В докладе приведены результаты исследований светочувствительных точек тела человека как источника биологической информации, что составляет специфику биомеханических живых систем и вызваны тем обстоятельством, что живые организмы (в том числе и человек) в силу их атомно – физиологического строения, полиморфности и композиций твердых, упругих, эластичных структур, жидких и газообразных фаз представляют собой крайне сложную гетерогенную колебательную систему с распределенными параметрами. Авторами представлены разработанные научные основы, методики и технические средства на основе волоконно оптических измерительных систем (ВОИС) для исследования задач биомеханических живых систем, а именно, - биологические основы тактильной информации и искусственной мышцы, биологическая электродинамика, а также дана физическая модель светочувствительности.

Для обеспечения функции управления биопротезами нами созданы новые принципы управления на основе квантовых датчиков ВОИС и ВОБР. Для передачи силовых сигналов к биопротезам исследуются возможности искусственной мышцы на основе гидролазерного эффекта, обладающей энергетическими параметрами естественной мышцы.

# ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ВАРИАНТОВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ АНАЛОГОВ ВЕСТИБУЛЯРНОГО АППАРАТА ЧЕЛОВЕКА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИХ В КИБЕРПРОТЕЗАХ И КИБЕРРОБОТАХ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

С.В.Петухов <sup>1)</sup>, К.А.Скворчевский<sup>2)</sup>, А.А.Акентьев<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>ИМАШ РАН, <sup>2)</sup>МФТИ, Россия, Москва)

Доклад посвящен вопросам использования волоконно – оптических измерительных систем (ВОИС) для построения функционального аналога вестибулярного аппарата человека. Речь идет о построении такой технической системы, которая по своим характеристикам чувствительности, габаритам, весу и надежности – была бы сопоставима или превосходила натуральный вестибулярный механорецептор.

Последний, как известно, включает в себя систему полукружных каналов и систему отолитов, в совокупности дающих организму информацию о характере угловых и линейных движений головы и ее ориентации относительно вектора гравитации.

Построение такого функционального аналога вестибулярного аппарата в русле общей для совместимой биомеханики проблемы тотального протезирования организма человека, расширения возможностей частичной или полной замены тех или иных органов человека в зависимости от требований медицинского, биотехнологического, военного или иного характера. Последовательно и активно в мире исследуются варианты протезирования едва ли не любых органов тела человека. Возможности объединения организма человека и машинных устройств в единую систему «человек – машина» (киборга), представленную в габаритах тела человека, разрабатываются во многих прикладных аспектах, например, военном для расширения и усиления функциональных возможностей солдат и эффективности использования ими военной техники. Также возможно использование сенсорных протезов в создании для человека реалистичных виртуальных миров, в тренажерах для летчиков, космонавтов, подводников, а также в технических средствах реабилитации (ТСР) людей с ограниченными физическими возможностями.

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБРАБОТКЕ МНОГОФАЗНЫХ РАСТВОРОВ.**

**Артамонов В.Ю., Шамов Н.А., Султанов Д.Р.**

*Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук «Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН» (Москва)*

В статье приведены результаты экспериментальных исследований влияния кавитационно-волнового приготовления буровых растворов на улучшение их структурно-реологических свойств и описан механизм диспергирования твердой фазы. Применяемые в практике бурения во многих случаях технологии и оборудование низкопроизводительны и не позволяют получить буровые растворы высокого качества, поэтому предложен ряд новых технологических и конструкционных вариантов, которые позволяют интенсифицировать процесс создания слоя кольматации в породе, повысить устойчивость стволов скважин и производительность их бурения.

### Литература

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технология. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. – Изд. 2-е, дополн. – М.: Институт компьютерных исследований; Научно-издательский центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2011. – 780 с.
2. Ультразвуковая обработка дисперсий глинистых минералов / Н.Н. Круглицкий, С.П. Ничипуренко, В.В. Симуров, В.В. Минченко / Под ред. Н.Н. Круглицкого. – Киев: Наукова Думка, 1971.
3. Маслов В.В., Коновалов Е.А., Плаксин Р.В. Исследование кавитационной технологии приготовления буровых технологических жидкостей // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море: Научно-техн. ж-л, 2006 – № 6. – С. 38-40.

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛНОВОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ СКВАЖИН ОТ ПРОБЛЕМНЫХ  
ОТЛОЖЕНИЙ.**

**С. Р. Ганиев, Ю.С.Кузнецов, Н.А.Шамов**

*Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института  
машинovedения им. А.А. Благонравова Российской академии наук «Научный центр  
нелинейной волновой механики и технологии РАН» (Москва)*

Приведены математические модели описания динамики твердых сферических частиц в волновом поле, на примере частиц незащемленного проппанта в трещине пласта с низким пластовым давлением после его гидроразрыва. Дана формула для определения объемной скорости фильтрации из трещины при ее очистке от высоковязкой эмульсии и частиц проппанта, которая должна быть не меньше, чем скорость при суточном дебите нефти при эксплуатации скважины после гидроразрыва. Разработано несколько вариантов оборудования, обеспечивающего разрушение прочных пробок проппанта в скважине и очистку трещины разрыва, которые позволят избежать имеющих место в настоящее время аварийных ситуаций.

Литература

1. Ультразвук: Маленькая энциклопедия / Под ред. И.П. Галяминой. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
2. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технология. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. – Изд. 2-е, дополн. – М.: Институт компьютерных исследований; Научно-издательский центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2011. – 780 с.
3. Шамов Н.А. Устройство для удаления технологических отложений, промывки и освоения скважин с низкими пластовыми давлениями (варианты). Патент 2364705 RU, кл. E21 B37/00, E21 B21/00; Бюл. № 23 , 2009. – 27 с.: ил.



## **АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДИАГНОСТИКИ АРТЕРИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МЕТОДАМИ ВОЛНОВОЙ МЕХАНИКИ.**

**Д.Л.Ревизников, Л.Е.Украинский, И.Г.Устенко**

*Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук «Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН» (Москва)*

Разработан функциональный диагностический комплекс с неинвазивным съемом информации о пульсовых явлениях в магистральных артериях на основе апланационной тонометрии и анализа полученных данных методами нелинейных волновых процессов. Создана математическая теория, позволившая разработать оригинальные алгоритмы анализа пульсовых волн, основанная на обработке двух сигналов с разных сосудов. Она позволяет определить все характерные точки пульсовых волн, измерить скорость их распространения, по которой можно судить об упруго-демпфирующих свойствах сосудов. Разработанная математическая модель дает возможность получить детальную пространственно-временную картину течения крови в различных артериях с учетом таких эффектов, как нестационарный импульсный характер поступления крови от сердца, упругость оболочки сосудов, отражение пульсовой волны от бифуркаций и терминальных сосудов. Обработка данных измерений позволяет осуществить формирование осреднённой периферийной пульсовой волны, синтез и контурный анализ центральной пульсовой волны, декомпозицию центральной пульсовой волны на прямую и обратную волны.

Комплексное применение высокоточной регистрирующей аппаратуры и разработанного математического аппарата является основой для создания эффективной диагностической базы нового поколения.

## БИОМЕХАНИКА ДВИЖЕНИЙ И ГЕНЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ НАСЛЕДУЕМЫХ ВОЛНОВЫХ И ЦИКЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

С.В.Петухов, В.И.Свирин, И.В.Степанян, Л.В.Хазина

*Институт машиноведения РАН, Россия, Москва*

50 лет назад произошло великое объединение живых организмов: основы молекулярной системы генетического кодирования оказались одинаковыми у всех видов организмов. Возникло новое понимание самой жизни: «Жизнь есть партнерство между генами и математикой»[1]. Но какая математика является партнером генетического кода? Исследования этого фундаментального вопроса, проводимые в Отделе биомеханики ИМАШ РАН, выявили связи молекулярно-генетической системы с известными формализмами инженерной теории помехоустойчивого кодирования, например, ортогональными системами функций Радемахера и Уолша; матрицами Адамара; проекционными операторами; гиперкомплексными числовыми системами, включая кватернионы Гамильтона [2-4]. Данный доклад представляет ряд результатов по связи ансамблей элементов молекулярно-генетической системы с проекционными операторами, а также примеры использования этих операторов при моделировании иерархий генетически наследуемых циклических и волновых процессов в живых организмах на основе циклических групп преобразований.

Для биомеханики познание математических особенностей кооперативной системы генетического кодирования важно потому, что она занимается генетически наследуемыми физиологическими структурами. Последние несут на себе печать особенностей генетического кодирования в силу их согласованности с ними, необходимой для передачи этих структур по цепи поколений изволюционного выживания. В частности, живой организм представляет собой огромный хор взаимно связанных наследуемых циклических процессов на разных его уровнях. Для моделирования множества циклических биопроцессов оказывается возможным использовать проекционные операторы, которые давно применяются в математике, физике, химии, цифровой технике связи, логике и с которыми, как недавно обнаружено [4], связаны феноменологические секреты генетического кодирования. В частности, в докладе показано использование в ИМАШ сумм генетических проекционных операторов для моделирования различных – типовых и аномальных - походок человека и животных на основе оригинальной математики многомерных векторных пространств с избирательным управлением (кодированием) циклических процессов в подпространствах. Эта математика дает также новые подходы в области систем с искусственным интеллектом, включая робототехнику. Обсуждаются биотехнологические, медицинские и другие аспекты данных исследований.

### **Литература:**

- 1) Stewart I. Life's other secret: The new mathematics of the living world. - New-York: Penguin, 1999.
- 2) Петухов С.В. Матричная генетика, алгебры генетического кода, помехоустойчивость. – М., РХД, 2008, 316 с.
- 3) Petoukhov S.V., He M. Symmetrical Analysis Techniques for Genetic Systems and Bioinformatics: Advanced Patterns and Applications. - Hershey, USA: IGI Global, 2010.
- 4) Petoukhov S.V. The genetic code, algebra of projection operators and problems of inherited biological ensembles. - <http://arxiv.org/abs/1307.7882>, 30.07.2013, 43с.

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ СПИРАЛИ И ПРОЕКЦИОННЫЕ ОПЕРАТОРЫ ГЕНЕТИЧЕСКОЙ БИОМЕХАНИКИ

С.В.Петухов, В.И.Свирин, И.В.Степанян, Л.В.Хазина

*Институт машиноведения РАН, Россия, Москва*

Спиральное устройство биологических тел пронизывает всю живую материю на самых разных уровнях и ветвях биологической эволюции. Например, в теле человека генетически наследуемые из поколения в поколение спиральные конструкции представлены в сердце, сосудах, костях, нервах, органе слуха (улитка уха), клеточной организации эмбриона (зиготы) и пр. Структура сухожилий и связок выглядит в виде спиралей, которые в свою очередь состоят из тройной спирали коллагена. Спиральные волны в сердце являются причиной аритмий. Спиральные движения наблюдаются при росте корней и побегов, обеспечивают движение множества бактерий и пр. В связи со спиральными биоконфигурациями все потоки жидкостей в организме – крови, лимфы, мочи – имеют спиральный характер. Недаром в науке с давних времен спирали называются «линиями жизни» [1]. Еще В. Гете рассматривал спирали как символ жизни.

Спиральная организация в живых организмах имеет генетически наследуемый характер и каким-то образом связана с помехоустойчивым генетическим кодированием. В настоящем докладе представлены полученные в отделе биомеханики ИМАШ данные [2-4] о связи системы генетического кодирования с проекционными операторами, давно применяемыми в математике, физике, информатике, логике и пр. Показывается также, что специальный класс генетических проекционных операторов позволяет моделировать иерархии спиральных структуры, характерные для живой материи, в том числе для известных биологических законов филлотаксиса (листорасположения), сопряженных с числами Фибоначчи. На этой основе разработана оригинальная матричная математика многомерных векторных пространств с избирательно управляемыми (кодируемыми) структурами и процессами в их подпространствах.

Учет спиральных принципов наследуемой биологической организации полезен для ряда технических и физиотерапевтических методов. В качестве примера в докладе рассматривается физиотерапевтическое применение оригинальных гидроволновых стимуляторов, созданных в научной школе Р.Ф.Ганиева. Эти стимуляторы генерируют спирализованную струю вакуум-прессующего действия, в том числе, для целей массажа. В настоящее время лаборатория биомеханических систем ИМАШ совместно с Научным центром НВМТ и медиками ведет их тематическое медико-клиническое исследование.

### Литература:

1. Т.А. Cook “The Curves of Life”. - London, Constable and Co, 1914, 490 p.
2. Петухов С.В. Матричная генетика, алгебры генетического кода, помехоустойчивость. – М., РХД, 2008, 316 с.
3. Petoukhov S.V., He M. Symmetrical Analysis Techniques for Genetic Systems and Bioinformatics: Advanced Patterns and Applications.- Hershey, USA: IGI Global, 2010.
4. Petoukhov S.V. The genetic code, algebra of projection operators and problems of inherited biological ensembles. - <http://arxiv.org/abs/1307.7882>, 30.07.2013, 43 с.

# РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАРДИОМЕХАНОСИГНАЛОВ ЧЕЛОВЕКА

И.С. Явелов, А.В. Рочагов

*Институт машиноведения РАН, Россия, Москва*

Одной из задач, решаемых в отделе биомеханики ИМАШ РАН, является усовершенствование методов и средств обеспечения надежности систем «человек-машина» на основе контроля функционального состояния человека-оператора как ответственного звена управления, а также на основе профессионального отбора кандидатов в операторы с учетом профессиональных заболеваний и пр. При этом особое внимание уделяется состоянию сердечно-сосудистой системы. Среди большого количества методов исследования сердечно-сосудистых заболеваний одним из распространенных современных методов является сфигмография, в основе которой лежит получение сигнала, отражающего изменение пульсовой волны давления в сосуде не инвазивным способом. Развитие сфигмографии связано с совершенствованием датчиков пульсовой волны и методов ее обработки, а также изменением представлений о гемодинамике и свойствах сердечно-сосудистой системы.

Созданная в ИМАШ РАН на основе волоконно-оптических датчиков-зондов аппаратура предназначена для исследования пульсовых волн и механосигналов сердца и является результатом более чем тридцатилетней работы коллектива по внедрению данного направления сенсорной техники [1, 2, 3].

Частотные характеристики по полосе пропускания такого датчика соответствуют диапазону  $0 \div 200$  Гц, а вторичного тракта -  $0.3 \div 20$  Гц. Высокое пространственное разрешение обусловлено достаточной чувствительностью датчика и локальностью измерения пульсаций (диаметр пелота у датчика равен 3 мм).

Принцип работы датчиков основан на модуляции светового потока за счет движения чувствительных механических элементов (мишеней) относительно торца световодов синхронно с колебаниями сосудистой стенки.

Технические испытания, проведенные на территории ИМАШ РАН, подтвердили их достаточное разрешение с точки зрения особенностей измеряемых сигналов. Кроме того, были проведены клинические испытания на территории РК НПК Росздрава (Чазовский центр), доказавшие, что разработка ИМАШ не уступает передовым западным образцам, внедряемым австралийской фирмой «Сфигмокор».

## **Литература:**

1. Явелов И.С., Рочагов А.В. Компьютерная диагностика и анализатор «Пульс». – М. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006.- 160с.
2. Явелов И.С., Каплунов С.М., Даниелян Г.Л. Волоконно–оптические измерительные системы. Прикладные задачи. /Под ред. д.т.н. С.М. Каплунова.- М - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2010. 304с.
3. Явелов И.С., Колпаков Е.В. Компьютерный анализатор пульсовой волны и электрической активности сердца «Пульс». //Медицинская техника. 2003, № 4, с.11-16.

## БИОМЕХАНИЧЕСКИЙ СПОСОБ СНЯТИЯ СТРЕССА И ОЗДОРОВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕКА

Х.М.Алиев, Е. С. Корпачева, А.С.Кахидзе

*Институт машиноведения РАН, Россия, Центр защиты от стресса, Москва*

Нами модифицирован способ снятия стресса и выработки навыков стрессоустойчивости на основе сочетания двух методик – «Синхрометода Ключ Х.М. Алиева» и «Волновой площадки» конструкции А.С. Кахидзе. Занятия волновой гимнастикой, циклично сочетающие Синхрогимнастику и волновые упражнения на площадке, способствуют восстановлению и укреплению здоровья, гармонизации всех систем организма, улучшению работы ЦНС и уменьшению внешнего воздействия стресс-факторов на человека. Данный комплекс может быть использован для уменьшения и профилактики психофизиологической усталости и стресса, выравнивания мышечного тонуса, улучшения общего самочувствия и настроения, улучшения микроциркуляции всех звеньев тела и туловища, особенно в области позвоночника, восстановления после переутомления, последствий травм, стресса.

“Синхрометод Ключ” - наиболее быстрый и эффективный способ организации при стрессе состояния «мозговой разгрузки» для восстановления истощенных и нарушенных функций организма. Включает ряд уникальных упражнений, в том числе волновые упражнения для предварительной “разгрузки” и элементы “Синхрогимнастики”. Метод Х.М.Алиева, учитывающий закономерности работы мозга, запускает мощный и эволюционно “мудрый” механизм сохранения внутреннего равновесия и мобилизации к достижению желаемых человеком целей.

Волновая биомеханическая Площадка, конструкции А.С.Кахидзе является адаптивным устройством для биомеханического воздействия на опорно-двигательный аппарат человека, защищена патентом России, разработана на основе методик волнового действия на человека, предложенных Ф.К.Агашиным и М.Ф.Агашиным в 1967-1998 гг. Площадка рассчитана на самостоятельные колебания человека на ней в режиме комфортной частоты и усилий, позволяет варьировать амплитуду перемещений тела человека при уменьшении и сглаживании усилий ног и всего тела, создает дополнительно микроколебания, биомеханическую вариативность и координационную сложность. За счет устойчивых колебаний на площадке у человека происходит тренировка стрессоустойчивости: человек испытывает в коротком начальном периоде некоторый стресс, а затем быструю адаптацию. Его ЦНС, рецепторы, вестибулярный аппарат и др. получают дополнительно мощный управляемый поток физиологических сигналов, расширяющих и размывающих “спектр стрессорного состояния”.

Волновая “проприорецептивная разминка” помогает человеку подготовиться к вариативному смещению акцента внимания, биомеханическому и психологическому переключению и “готовит” человека к волновым упражнениям Синхрогимнастики, а Синхрогимнастика, в свою очередь, при циклическом использовании указанных методик по индивидуальному подбору пользователя, является превентивной подготовкой к адаптированному восприятию волновой разминки с площадкой. Последующие упражнения происходят в большей степени “автоматически и рефлекторно”, обеспечивают выработку навыков стрессоустойчивости, что позволяет легче адаптироваться к стресс-факторам и быстрее восстанавливать психофизиологический баланс при стрессах различного происхождения.

# **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИНСТРУМЕНТА ХИРУРГИЧЕСКОГО РОБОТА-МАНИПУЛЯТОРА ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ**

**Ю.В. Богданова, А.М. Гуськов**

*МГТУ им. Н.Э. Баумана, НИЦ «Курчатовский институт», Россия, Москва*

Рассматривается проблема позиционирования инструмента семистепенного хирургического Робота-Манипулятора на примере биопсии головного мозга, как операции, требующей исключительной точности попадания в точку цели. Работа посвящена численному моделированию движения инструмента многофункционального хирургического Робота-Манипулятора от точки к точке по заданной траектории с погрешностью позиционирования не более 0,05 мм. Задача численного моделирования решена в программном пакете MATLAB<sup>®</sup> RoboticsToolbox + Simulink<sup>®</sup>. Координаты заданной траектории движения преобразуются в соответствующие присоединенные координаты сочленений решением обратной задачи кинематики. В качестве схемы управления выбран метод вычисления управляющий моментов. Получаемые положения, скорости и ускорения сочленений подаются на вход решения обратной задачи динамики, вычисляющей моменты в сочленениях, необходимые для реализации заданного движения с учетом закона управления. Текущее положение, скорость и ускорение сочленений получаются решением прямой задачи динамики. Проведен анализ динамических свойств Робота-Манипулятора. Высокие показатели точности позиционирования инструмента доказывают адекватность имеющейся модели Робота-Манипулятора и пригодность выбранной схемы управления.

## **ИНТЕРАКТИВНОЕ ДИСТАНЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ШАГАЮЩИМИ МАШИНАМИ НА ОСНОВЕ АНАЛОГИИ С ЧЕЛОВЕЧЕСКИМ ТЕЛОМ**

**Тулупов С.И.**

*Научно-учебный центр «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана и НБИКС-  
Центр НИЦ «Курчатовский институт», Россия, Москва*

В докладе представлены изыскания в технической области разработок интерактивных управляющих устройств, в основе которых лежит активный экзоскелет. В данном случае рассматривается управление подвижными частями роботов, которое строится на аналогии этих роботов с телом человека, с его движениями. Целью осязаемого докладом проекта является разработка системы интерактивного управления шагающими машинами, которая состоит из трёх систем: системы ориентирования тела (а также в последующих разработках, возможно, придания линейных и угловых ускорений) оператора в пространстве, системы активного экзоскелета, системы телеприсутствия. Основной идеей разрабатываемого устройства служит двунаправленное управление, при котором учитываются вместе сигналы от устройства управления и от объекта управления. В докладе рассмотрены основные предпосылки к созданию подобных устройств и актуальность в настоящее время разработок в этой области. В процессе работы над проектом были проведены исследования по взаимодействию в реальном времени оператора и модели антропоморфного робота (в частности, был проведён эксперимент по удержанию стабильного положения робота оператором с помощью регулирования двух торсовых подвижностей), были разработаны математические модели, на которых были проведены эксперименты по апробации предложенных методов управления одной подвижностью, были выведены формулы и схемы управления по предложенному методу, был промоделирован двуногий робот и приведены теоретические основы удержания устойчивости передвижения его по программной траектории. Все изложенные моменты представлены в докладе.

## РАЗРАБОТКА ЭКЗОСКЕЛЕТА НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА

**Тулупов С.И.**

*Научно-учебный центр «Робототехника» МГТУ им. Н.Э. Баумана и НБИКС-  
Центр НИЦ «Курчатовский институт», Россия, Москва*

В докладе излагается последовательность разработки метода проектирования экзоскелета нижних конечностей человека. Целью освящаемого докладом проекта являлись составление архитектуры экзоскелета, проектирование его конструкции на основании предложенной архитектуры и кинематической схемы, разработка приводных систем и системы управления для управления экзоскелетом. В докладе рассмотрены основные предпосылки создания экзоскелета и принципы, на которых построена разработка подобных систем в настоящее время. Результатом проекта стала методика, которая позволяет разработчику наиболее эффективно вести разработку экзоскелета нижних конечностей, в основу которого заложен принцип получения информации о намерениях человека через информационные устройства, не контактирующие с оператором. В процессе работы над проектом были получены: кинематическая схема устройства; чертежи и технические данные о приводных системах, удовлетворяющих по своей мощности условиям эксплуатации; чертежи конструкции экзоскелета; твердотельные и математические модели с полным и редуцированным количеством подвижностей; схема управления и основные уравнения движения для устройства, регулируемого по предложенным схемам; вариант вычисления управляющих сигналов для экзоскелета; уравнения, которые позволяют вычислить управляющие сигналы, не прибегая к оснащению устройства сложными дорогостоящими датчиками.



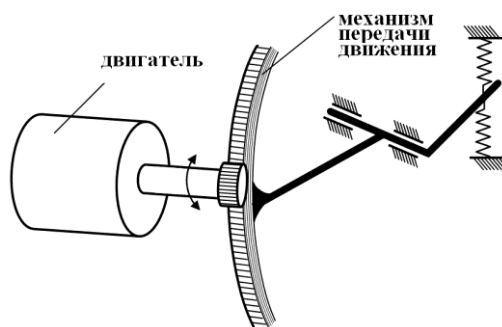
## ПРОБЛЕМЫ ДИНАМИКИ И УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДНЫХ СИСТЕМ С ДВИГАТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

С.Ю.Мисюрин, Г.В.Крейнин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Россия, Москва

В работе исследуется зависимость динамики привода, передающего движение от двигателя на объект управления, от величины передаточного отношения механизма. На первом этапе простейшая модель привода с двигателем, имеющим линейную механическую характеристику, который обрабатывает постоянный сигнал управления; выходное звено привода несет постоянную комбинированную инерционную и силовую нагрузки. На последующем этапе анализируются модели приводных систем, с двигателем такого же типа, обрабатывающих гармонический алгоритм управления.

Передаточное отношение  $i$  механизма является одним из факторов, существенно влияющих на динамику привода (см. рис.). Увеличением  $i$  увеличивают движущую силу (момент) на выходном звене привода, но ценой возрастания хода двигателя, его скорости и усложнения структуры передаточного механизма. Величина  $i$  влияет также на время цикла привода, энергетическую эффективность, мощность двигателя, качество отработки требуемого закона движения выходного звена и другие показатели.



Заметную роль здесь играет тип механической характеристики двигателя, т.е. закон изменения движущей силы  $P_x$  двигателя в функции его скорости. На динамику привода оказывают влияние и многие другие факторы, как, например, закон управления, задержка в отработке задающего сигнала, податливость двигателя и т.д. Эти вопросы неоднократно затрагивались в работах [1,2]

В наиболее простом случае механическая характеристика линейна, что присуще, например, электрическому двигателю постоянного тока с независимым возбуждением. Движущая сила двигателя в этом случае определяется соотношением  $P_x = P_{x\max} \gamma - k\dot{x} = P_{x\max} (\gamma - \dot{x}/\dot{x}_h)$ , где  $P_{x\max}$  - максимальная величина  $P_x$  (соответствующая  $\dot{x} = 0$ ),  $k = P_{x\max} / \dot{x}_h$ ,  $\dot{x}_h$  - скорость холостого хода (при нулевой нагрузке),  $|\gamma| \leq 1$  - функция параметров состояния двигателя, определяемая законом управления. Уравнение движения выходного звена привода  $m\ddot{y} = P_{y\max} (\gamma - \dot{y}/\dot{y}_h) - P_L - P_C$ , где  $m = m_x i^2 + m_y$ ;  $m, m_x, m_y$  - соответственно полная масса, масса подвижного звена двигателя (приведенные к выходному звену) и масса управляемого объекта;  $i = \dot{x}/\dot{y}$ ;  $\dot{y}_h = \dot{x}_h/i$  - скорость холостого хода двигателя, приведенная к выходному звену,  $P_{y\max} = P_{x\max} i$ ,  $P_L$  - постоянная силовая нагрузка на выходном звене,  $P_C = c_y y$  - упругая (позиционная) нагрузка ( $c$  - коэффициент упругости).

1. Крейнин Г.В., Мисюрин С.Ю. О некоторых общих закономерностях в динамике приводов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. №6. С.15-21.
2. Крейнин Г.В., Мисюрин С.Ю. К выбору закона управления позиционной системы. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. №4. с. 79-87.

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ НА МИКРОСТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРНЫХ МЕТАЛЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

А.А. Назаров<sup>1</sup>, А.А. Самигуллина<sup>1</sup>, Р.Р. Мулюков<sup>1</sup>, Ю.В. Царенко<sup>2</sup>, В.В. Рубаник<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа, Россия*

<sup>2</sup>*Институт технической акустики НАНБ, г. Витебск, Беларусь, ita@vitebsk.by*

Наноструктурные (НС) материалы, полученные методами интенсивной пластической деформации (ИПД), такими как кручение под квазигидростатическим давлением (КГД) и равноканальное угловое прессование (РКУП), характеризуются наличием неравновесных границ зерен, содержащих внесенные дислокации и являющихся источниками дальнедействующих внутренних напряжений. При этом НС материалы обладают существенно более высокой прочностью, но пониженной пластичностью по отношению к крупнозернистым материалам, а также пониженной термической стабильностью микроструктуры и свойств. Для применений этих перспективных материалов в машиностроении важно повышение термической стабильности и пластичности с сохранением достигнутого высокого уровня прочности. Традиционные методы, основанные на отжиге, приводят к значительному обратному снижению достигнутой прочности наноматериалов.

Работа посвящена исследованию возможности повышения термостабильности и пластичности наноматериалов путем воздействия ультразвуком умеренной амплитуды, которое приводит к релаксации внутренних напряжений, усовершенствованию структуры наноматериалов.

Предложена модель релаксации неравновесной структуры границ и стыков зерен в наноматериалах при воздействии ультразвуковых напряжений.

Исследовано воздействие ультразвуковой обработки (УЗО) на структуру и термостабильность наноструктурного никеля, полученного методом КГД. Обнаружено, что, действительно, при определенных оптимальных значениях амплитуды напряжений ультразвук снижает уровень внутренних напряжений в этих материалах, приводит к релаксации неравновесных границ зерен, к повышению термической стабильности структуры.

При воздействии УЗО на УМЗ никель, полученный методом РКУП, обнаружено заметное повышение пластичности при испытаниях растяжением. При амплитуде напряжений 20 МПа происходит рост пластичности с 12% после РКУП до 14.5% после УЗО. При этом предел прочности не только сохраняется, но даже несколько возрастает.

Рассмотрена также возможность деформационного измельчения зерен путемковки ультразвуком высокой мощности. Создана оснастка, позволяющая осуществлять ковку попеременно вдоль различных осей, как это делается при деформационном наноструктурировании методом всесторонней изотермической ковки. С помощью этой оснастки проведена всесторонняя ковка образцов меди марки М1 в виде куба со стороной 6×6×6 мм. При осадке вдоль каждой оси степень деформации составила  $e=0,3$ , образцы были откованы тремя циклами осадки вдоль всех трех осей, так что суммарная накопленная деформация составила примерно  $\Sigma e=2,7$ . Измерения микротвердости образцов показали значения около 1300-1350 МПа, что превышает микротвердость меди, полученной РКУП за 8 проходов ( $\Sigma e=9,2$ ). Таким образом, предварительные исследования позволяют предположить, что ультразвуковая ковка может приводить к более эффективному измельчению зерен и упрочнению, чем при РКУП.

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ КОЛЕБАНИЙ

**А.С.Корнеев**

*Научный Центр нелинейной волновой механики и технологии РАН – филиал Института машиноведения им. А.А.Благонравова РАН (ИЦ НВМТ РАН),  
Россия, Москва*

Гидродинамические генераторы колебаний являются одним из возможных типов генераторов, используемых в волновых технологиях [1, 2]. Для расчета их характеристик использовалась система уравнений неразрывности и Навье-Стокса [3], двухпараметрической модели турбулентности [4] и уравнение переноса массовой доли пара для модели кавитации [5]. Течение считалось осесимметричным. Проведен расчет нестационарного турбулентного закрученного течения воды в цилиндрическом канале с расширением при наличии кавитации. Параметры задачи соответствовали условиям эксперимента [1].

В ходе расчета выводились значения давления в точке, соответствующей месту расположения датчика давления в работе [1]. После выхода на режим установившихся колебаний полученная зависимость давления от времени аппроксимировалась рядом Фурье и строилась амплитудно-частотная характеристика колебаний (АЧХ). Положения главного максимума на расчетной (рис. 1) и экспериментальной (рис. 2) АЧХ согласуются.

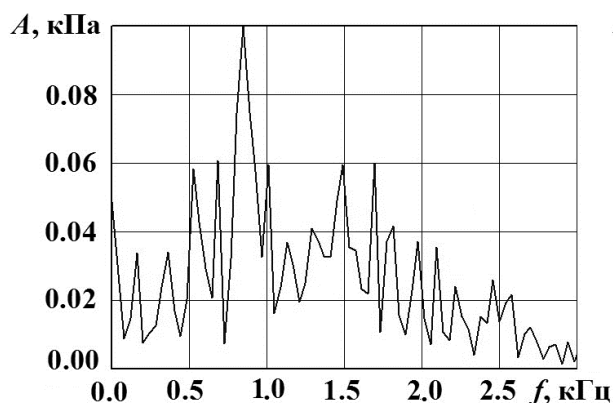


Рис. 1. Расчетная АЧХ колебаний

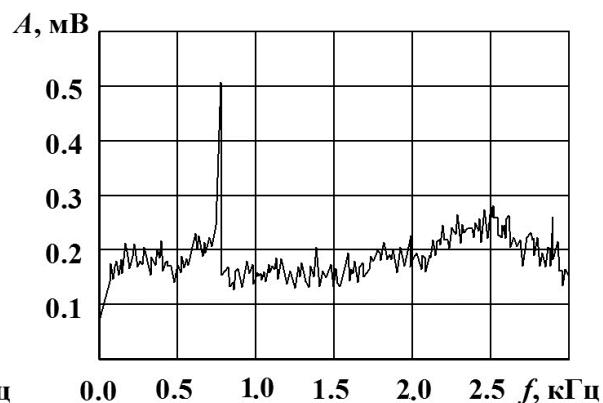


Рис. 2. Экспериментальная АЧХ колебаний [1]

В работе также был выполнен анализ динамики кавитационной каверны, возникающей в приосевой зоне канала. Показано, что пульсации этой каверны приводят к возникновению незатухающих колебаний давления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е., Корнеев А.С.//ДАН. 2007. Т. 416. № 3. С. 1–3.
2. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технология. М.: Научно-издательский центр “Регулярная и хаотическая динамика”, 2008. 712 с.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 840 с.
4. Launder В.Е., Spalding D.B.//Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1974. V. 3. P. 269-289.
5. Singhal A.K., Athavale M.M., Li H.Y., Jiang Y.//J. of Fluids Engineering – Transactions of the ASME. 2002. V. 124. № 3. P. 617-624.

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТРЕХЗВЕННОГО ПЛАВАЮЩЕГО РЫБОПОДОБНОГО РОБОТА**

**Б.В. Лушников, А.В. Мальчиков, Е.С. Тарасова, С.Ф. Яцун.**

*Department of Theoretical Mechanics and Mechatronics, South-West State University*

Разработана математическая модель динамики плавающего подводного автономного робота, основанного на бионических принципах движения с мехатронным приводом и с учетом взаимодействия корпуса с окружающей средой, позволяющая исследовать влияние различных параметров конструкции робота и факторов среды на кинематические и динамические характеристики его движения и управления, проводить оптимальный синтез его конструкции и системы управления, осуществлена проверка адекватности математической модели динамического поведения мобильного подводного робота методами компьютерного моделирования в Simulink/MATLAB.

## **ДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛЗАЮЩЕГО ЗМЕЕПОДОБНОГО РОБОТА**

**Г.С. Наумов, С.Ф. Яцун.**

*Department of Theoretical Mechanics and Mechatronics, South-West State University*

В работе исследован трёхзвенный робот, перемещающийся за счет управляемых сил сухого трения, действующих на центральные точки контакта робота с шероховатой горизонтальной поверхностью и подчиняющихся закону Кулона. Разработана математическая модель механизма, представлены алгоритмы реализации различных типов движения, а также результаты численного моделирования и сравнение с аналитическими результатами.

## **РЕАБИЛИТАЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНЫХ КОНЕЧНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА**

**М.С. Понедельченко, С.Ф. Яцун**

*Department of Theoretical Mechanics and Mechatronics, South-West State University*

В работе рассматривается аппарат для реабилитации нижних конечностей человека после травм, который представляет собой трехзвенный механизм с тремя активными шарнирами, изучены закономерности управляемого движения аппарата с учетом вязких и упругих свойств ноги для заданных управляющих воздействий, получены диаграммы временных зависимостей изменения угловых характеристик звеньев механизма.