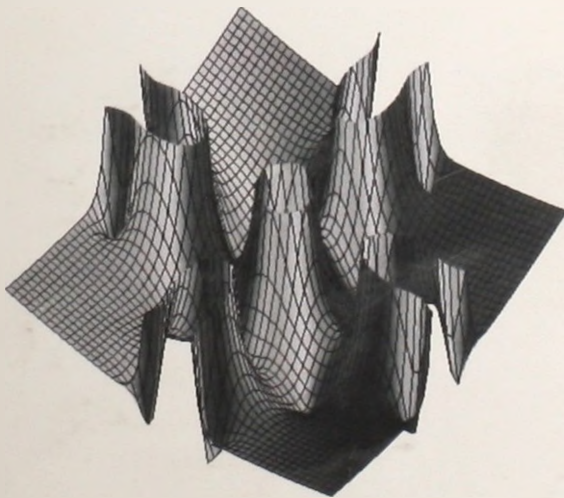


8

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
АССОЦИАЦИЯ «МЕХАНИКА И ТЕХНОЛОГИИ»

**МАТЕРИАЛЫ
XX МЕЖДУНАРОДНОГО СИМПОЗИУМА
«ДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОБЛЕМЫ МЕХАНИКИ КОНСТРУКЦИЙ
И СПЛОШНЫХ СРЕД»
им. А.Г. Горшкова**

Том 1



Москва 2014

531
Д 466

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
АССОЦИАЦИЯ «МЕХАНИКА И ТЕХНОЛОГИИ»

**МАТЕРИАЛЫ XX МЕЖДУНАРОДНОГО СИМПОЗИУМА
«ДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
МЕХАНИКИ КОНСТРУКЦИЙ И СПЛОШНЫХ СРЕД»
имени А.Г. Горшкова**

Ярополец, 17 – 21 февраля 2014 г.

Том 1

**XX INTERNATIONAL SYMPOSIUM «DYNAMIC
AND TECHNOLOGICAL PROBLEMS OF A MECHANICS
OF CONSTRUCTIONS AND CONTINUOUS MEDIUMS»
Dedicated to A.G. Gorshkov**

Yaropolets, 17 – 21 February 2014

Vol. 1

Москва 2014

© Материалы XX Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.1. – М.: ООО "ТР-принт", 2014.- 215 с.

Программный комитет:

Тарлаковский Д.В. (председатель), д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Шклярчук Ф.Н. (зам. председателя), д.т.н., проф. (Россия)
Федотенков Г.В. (ученый секретарь), к.ф.-м.н. (Россия)
Бабешко В.А., академик РАН (Россия)
Баженов В.Г., д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Белосточный Г.Н., д.т.н., проф. (Россия)
Гаврюшин С.С., д.т.н., проф. (Россия)
Гачкевич А.Р., д.ф.-м.н., проф. (Украина)
Герашенко А.Н., д.т.н., проф., ректор МАИ (Россия)
Горячева И.Г., академик РАН (Россия)
Ерофеев В.И., д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Игумнов Л.А., д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Кит Г.С., член-корр. АН Украины (Украина)
Коноплев Ю.Г., академик АН Республики Татарстан (Россия)
Кубенко В.Д., академик НАН Украины (Украина)
Кушнир Р.М., член-корр. АН Украины (Украина)
Локощенко А.М., д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Ломакин Е.В., член-корр. РАН (Россия)
Матвеев А.М., академик РАН (Россия)
Морозов Н.Ф., академик РАН (Россия)
Нестеров В.А., д.т.н., проф. (Россия)
Ожунев Ю.М., академик РАЕН (Россия)
Паймушин В.Н., академик АН Республики Татарстан (Россия)
Плескачевский Ю.М., член-корр. НАН Белоруссии (республика Беларусь)
Рабинский Л.Н., д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Старовойтов Э.И., д.ф.-м.н., проф. (республика Беларусь)
Фетисов Г.П., к.т.н., проф. (Россия)
Шевцов В.А., д.т.н., проф., проректор МАИ (Россия)
Yu Gu, PhD, Professor, Beijing Jiaotong University (Китай)

Симпозиум проводится при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 13-08-06206 г_1_2014).

ISBN 978-5-903391-16-5

© Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2014

Предисловие

XX Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» проводится Московским авиационным институтом (государственным техническим университетом) – МАИ и Ассоциацией «Механика и технологии» при поддержке РФФИ на базе отдыха МАИ «Ярополец» с 17 по 21 февраля 2014 года.

Имя создателя и бессменного председателя с 1995 г. по 2006 г. Горшкова Анатолия Герасимовича присвоено симпозиуму программным комитетом в 2007 году. Это решение утверждено на пленарном заседании XIII симпозиума.

В соответствии с тематикой докладов их обсуждение будет проходить в рамках трех секций.

Секция I «Динамика сплошных сред» (председатель академик РАН Горячева И.Г., сопредседатели: академик НАН Украины, Кубенко В.Д. и д.ф.-м.н., профессор Старовойтов Э.И.).

Секция II «Динамика и прочность конструкций» (председатель д.т.н., профессор Шклярчук Ф.Н., сопредседатели: д.ф.-м.н., профессор Баженов В.Г. и академик Республики Татарстан Паймушин В.Н.).

Секция III «Технологические проблемы новых материалов и конструкций» (председатель академик РАН Матвеевко А.М., сопредседатели: д.т.н., профессор Белашова И.С. и к.т.н., профессор Фетисов Г.П.).

Материалы симпозиума распределены по двум томам. В настоящий первый том вошли тезисы докладов, поступивших в оргкомитет на момент его издания. Во второй том предполагается включить остальные тезисы и отобранные программным комитетом лучшие доклады. Все материалы, в основном, приводятся в авторской редакции.

Председатель программного комитета Д.В. Тарлаковский

РАСЧЕТ ТЕРМОУПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗАГОТОВКИ РАБОЧЕГО КОЛЕСА ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

Абросимов Ю.А., Галимов А.Ф., Еранов А.П., Сибгатуллин Р.Г.

(Казань)

В настоящее время, несмотря на всеобщую компьютеризацию отечественных предприятий, проектирование и отработка технологий закаливания элементов конструкции турбокомпрессоров часто основывается на опыте практической работы технологов, сложившихся технологических традициях использовании известных решений, а также трудоемком и металлоемком методе проб и ошибок. Вместе с тем, теории гидродинамических, тепловых, фазовых, диффузионных, фильтрационных, деформационных и других процессов, протекающих при закаливании элементов турбокомпрессоров, достаточно хорошо разработаны и в общем виде решены многие ключевые задачи. Базой для описания указанных выше процессов служат математические модели, разработанные методами математической физики. На основании изложенного, актуальна проблема разработки метода расчета напряженно-деформированного состояния закаливаемых заготовок и автоматизированной реализации этого метода в апробированных отечественных системах компьютерного моделирования.

Практически все технологические процессы изготовления металлопродукции методами пластического деформирования связаны с формированием в готовых изделиях самоуравновешенной системы остаточных напряжений. При этом актуальной задачей является установление влияния технологии на уровень и характер распределения остаточных напряжений, которые могут достигать значительных величин вплоть до предела текучести и прочности материала, что часто приводит к разрушению конструкций еще при хранении или в первые часы эксплуатации при достаточно низком уровне эксплуатационных нагрузок. Уровень остаточных напряжений является во многих случаях важным параметром, определяющим качество изделий, полученных в результате пластического деформирования. Причины образования остаточных напряжений многообразны (неоднородность пластической деформации, температурного поля, фазовые превращения и т.д.), которые по своей величине могут превосходить напряжения от внешних нагрузок.

Остаточные напряжения в изделиях влияют на развитие замедленного разрушения, статическую, динамическую прочность и коррозионную стойкость изделий. Наличие растягивающих остаточных напряжений повышает склонность металла к коррозии в присутствии агрессивной окружающей среды. Релаксация остаточных напряжений может вызвать нежелательные изменения

геометрических размеров. Этот процесс протекает в различных участках тела с различной интенсивностью в зависимости от величины напряжений, в связи с этим тело упруго деформируется из-за нарушения равновесия напряжений, изменяя первоначальные размеры и форму, что необходимо учитывать при изготовлении прецизионных изделий.

Остаточные напряжения оказывают на материал изделия такое же воздействие, как напряжения, вызываемые эксплуатационной нагрузкой, поэтому причины появления остаточных напряжений и методы их минимизации требуют детального изучения. Проблема остаточных напряжений включает решение комплекса научных и инженерных задач теоретического и экспериментального исследования процессов формирования остаточного напряженного состояния и управления ими, создание методов теоретического определения и экспериментального исследования, изучение влияния остаточных напряжений на прочность и эксплуатационные характеристики деталей машин и элементов конструкций. Теоретическое определение остаточных напряжений требует решения достаточно сложной связанной задачи термоупругопластичности. Снижение уровня остаточных напряжений приводит к необходимости решения оптимизационной задачи механики твердого деформируемого тела. Число таких задач, решенных применительно к технологическим процессам обработки металлов, весьма невелико.

Согласно современным представлениям теории разрушения тело после пластической деформации оказывается пораженным микротрещинами. Остаточные растягивающие напряжения в результате длительного воздействия на микротрещины могут вызвать их увеличение до критических размеров и привести к макроразрушению металла. Кроме того, растягивающие остаточные напряжения способствуют раскрытию микротрещин и проникновению в них агрессивной среды, что приводит к снижению коррозионной стойкости поверхностных слоев металла. В свою очередь, сжимающие напряжения препятствуют коррозионному воздействию агрессивной среды на поверхности микротрещин.

В работе реализован алгоритм расчета связанной динамической задачи термоупругости на основе метода конечных элементов. Исследуется развитие зон пластического деформирования в рабочем колесе центробежного компрессора при резком и поэтапном его охлаждении в жидкой или газообразной среде. Расчет проводится на основе трехмерных линейных 8-узловых конечных элементов сплошной среды, узловыми неизвестными которого являются проекции вектора перемещений на координатные оси рабочей плоскости и температура.

Предложенная авторами методика расчета позволяет эффективно решать трехмерные задачи термопластического деформирования элементов конструкций при резком изменении внешних тепловых воздействий.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 12-01-00955, № 12-01-97026, № 12-01-31212, № 13-97057, № 13-01-97058.

Литература

1. *Абросимов Ю.А., Бережной Д.В., Еранов А.П., Сибгатуллин Р.Г.* Расчет заклепочных соединений колеса центробежного компрессора // Научно-технический вестник Поволжья. №5, Казань, 2013. – С.90-93.

2. *Абросимов Ю.А., Бережной Д.В., Еранов А.П., Сибгатуллин Р.Г.* Расчет деформирования ротора центробежного компрессора в процессе его насадки на вал // Научно-технический вестник Поволжья. №5, Казань, 2013. – С.94-97.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЯЗКО- И ПОРОУПРУГИХ ТЕЛ

Аменицкий А.В., Белов А.А., Игумнов Л.А., Инатов А.А., Лебедева Е.А.

(Нижний Новгород)

Исследуются волновые поля в упругих, пороупругих и поровязкоупругих телах. Рассматриваются начально-краевые задачи соответствующих линейных трехмерных теорий.

Применяется гранично-элементная методика, построенная с использованием интегрального преобразования Лапласа. Численное обращение преобразования Лапласа основано на модификации метода Дурбина и на шаговом алгоритме.

На основе представленных гранично-элементных схем численно решены трехмерные краевые задачи. Дан их апостериорный анализ. Рассмотрены задачи: о действии силы на торец консоли; о действии вертикальной силы на поверхность полупространства, в том числе ослабленного полостью под площадкой нагружения; о действии силы на призматическое тело расположенное на полупространстве. Задачи рассматриваются в упругой, вязкоупругой и пороупругой постановках. В задаче о действии вертикальной силы на полупространство проведено исследование влияния продолжительности действия нагрузкина на форму отклика поверхностной волны. Вязкоупругие свойства материалов описываются соотношениями классических и модифицированных регулярных моделей (Максвелла, Фойгта, стандартного вязкоупругого тела), а также слабосингулярной модели с ядром Абеля. Проведено сравнение вязкоупругих решений с пороупругими решениями при

тех же параметрах материала. Отмечено сходство поведения отклика перемещений на начальном временном интервале пороупругой и вязкоупругой модели (модели стандартного вязкоупругого тела).

Расчетные примеры демонстрируют высокую вычислительную точность и устойчивость представленных ГЭ-схем как с применением интегрального преобразования Лапласа совместно с методом Дурбина, так и схема с использованием шагового метода.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 12-08-00984-а, 12-01-00698-а, 13-08-00658-а, 13-08-97091_р_поволжье_а, 14-08-31415_мол_а, 14-08-00811-а).

ФОРМИРОВАНИЕ ЖАРОСТОЙКИХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ СИЛИЦИДНОГО ТИПА НА НИОБИИ

Андрюшин С.Г., Астапов А.Н., Еремина А.И., Касаткин А.В., Терентьева В.С.

(Москва)

На образцах ниобия разработаны методы синтеза комбинированных силицидных покрытий систем: Nb-Si, Nb-B-Si, Nb-Mo-Si, Nb-W-Si, Nb-(Mo;W)-Si; проведены предварительные эксперименты по изучению температурно-временных характеристик защитной способности полученных покрытий при высокотемпературном окислении на воздухе в интервале температур 1400 – 1680°C. В качестве материала основы использовалась отожженная проволока из ниобия чистотой 99,9 вес.%. Покрытия наносили после механической обработки подложки в одну, две или три стадии, в зависимости от типа защитной системы. Окисление проводили путем нагрева исследуемых образцов на воздухе прямым пропусканием электрического тока.

Покрытия систем Nb-Si и Nb-B-Si получали методом термодиффузионного насыщения основы кремнием (в одну стадию) или бором и кремнием (в две стадии) соответственно. Для проведения силицирующей обработки (насыщение кремнием) образцы ниобия помещали в контейнер из тугоплавкого материала, заполненный порошком элементарного кремния (размером частиц от 1 до 5 мкм) с добавлением галогенидного активатора – до 5% от массы загрузки. Термообработку проводили в вакуумной электропечи при температуре порядка 1200°C в течение 5 – 10 часов (в зависимости от требуемой толщины покрытия) в вакууме не хуже 0,1 Па. В результате получали силицидные покрытия системы Nb-Si толщиной от 60 до 110 мкм.

Для получения боросилицидных покрытий (системы Nb-B-Si) на поверхности образцов из Nb перед силицирующей термообработкой предварительно формировали слой борида. Борирование (насыщение бором) проводили в смесях порошков различных боридов (размером частиц от 50 до

100 мкм) с добавлением галогенидного активатора – до 10% от массы загрузки. В качестве основного компонента смесей применяли карбид бора (B_4C). Термообработку проводили в электропечи в атмосфере аргона или в вакууме не хуже 0,1 Па, при температурах 1100 – 1150°C в течение 1 – 2 часов (в зависимости от требуемой толщины покрытия). В результате на поверхности образцов формировали слои боридов Nb толщиной от 20 до 70 мкм. На второй стадии проводили силицирующую обработку полученных композиций по той же технологии, что и при получении покрытий системы Nb-Si. В результате общая толщина полученных боросилицидных покрытий системы Nb-B-Si составляла от 80 до 120 мкм.

Покрытия системы Nb-W-Si получали в две стадии. На первой стадии на поверхность образцов из ниобия методом газофазного осаждения (CVD) наносили слой вольфрама толщиной от 50 до 120 мкм. Газофазное осаждение проводили в смесях водорода и гексофторида вольфрама при температурах 500 – 600°C в течение 1 – 2 часов. На второй стадии проводили силицирующую термообработку полученной композиции Nb-W по вышеописанной технологии силицирования ниобия при получении покрытий системы Nb-Si. Общая толщина полученных покрытий системы Nb-W-Si составляла, в зависимости от режимов, от 140 до 250 мкм.

Покрытия системы Nb-Mo-Si получали в две стадии. На первой стадии на поверхность образцов из ниобия методом плазменного напыления наносили слой молибдена толщиной 15 – 20 мкм. Затем, на второй стадии, проводили силицирующую термообработку полученной композиции Nb-Mo по той же технологии силицирования ниобия, что и при получении покрытий системы Nb-Si. Общая толщина полученных покрытий системы Nb-Mo-Si составляла, в зависимости от режимов, от 70 до 120 мкм.

Покрытия системы Nb-(Mo;W)-Si получали в три стадии. На первой стадии, как и в предыдущем случае, на поверхность образцов из ниобия наносили слой молибдена толщиной 15 – 20 мкм. На второй стадии на поверхность полученной композиции Nb-Mo методом CVD наносили слой вольфрама толщиной порядка 100 – 120 мкм. На третьей стадии проводили такую же силицирующую термообработку, как и в случае выше описанных систем. Общая толщина полученных комбинированных покрытий системы Nb-(Mo;W)-Si составила порядка 230 – 250 мкм.

Кинетические закономерности формирования покрытий исследовались методами гравиметрии. На каждой стадии получения всех типов покрытий определялась толщина образующихся слоев и покрытия в целом (для всех образцов), а также проводился выборочный контроль сформированной структуры покрытий методами металлографии. Методами

рентгеноструктурного анализа исследовался фазовый состав образующихся покрытий на всех стадиях их получения.

Предварительные эксперименты по исследованию температурно-временных характеристик работоспособности образцов из ниобия, защищенных полученными покрытиями, в условиях высокотемпературного окисления на воздухе показали последовательное увеличение эффективности защитного действия покрытий в ряду Nb-Si, Nb-B-Si, Nb-Mo-Si, Nb-W-Si, Nb-(Mo;W)-Si. Так в интервале температур поверхности $T_w = 1550 - 1580^\circ\text{C}$ суммарная экспозиция образцов до разрушения ансамбля «ниобий – покрытие» составила 2-2,5 часа – для системы Nb-Si; 3-3,5 часа – для Nb-B-Si; 6-8 часов – для систем Nb-Mo-Si и Nb-W-Si; 8-9 часов – для системы Nb-(Mo;W)-Si. При $T_w = 1650 - 1680^\circ\text{C}$ – до 1 часа – для системы Nb-B-Si; 4-6 часов – для системы Nb-Mo-Si; 10-11 часов – для системы Nb-W-Si и до 12 часов – для системы Nb-(Mo;W)-Si.

УПРОЩЕННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УДЛИНЕННОЙ ТОНКОСТЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ С ТЕПЛОЗАЩИТНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Антуфьев Б.А., Коновалов А.В.

(Москва)

Рассматривается задача о колебаниях и динамическом поведении удлиненной тонкостенной конструкции несущей дополнительно нанесенное защитное покрытие. Динамика конструкции описывается на основании балочной модели оболочки, а защитное покрытие трактуется как инерционный слой, изменяющий только динамические характеристики системы. Часть этого покрытия может быть уничтожена в результате механического повреждения и положение этого участка при решении задачи определяется через обобщенные функции. Тогда задача сводится к уравнению поперечных колебаний балки с разрывными массовыми коэффициентами. Для его решения используется метод Бубнова, в соответствии с которым динамические прогибы конструкции представляются в виде разложений по формам собственных колебаний гладкой балки с неизвестными функциями времени (обобщенными координатами). Проблема в дальнейшем сводится к решению системы линейных дифференциальных уравнений движения балки, которая решается численно. Как частный случай рассмотрена задача определения нижней части спектра частот собственных колебаний конструкции. В этом случае задача также методом Бубнова сводится уже к системе линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов в разложении прогибов балки. Собственные частоты колебаний определяются из условия равенства нулю ее определителя.

Рассмотрены примеры и исследовано влияние различных конструктивных параметров на собственные частоты колебаний конструкции и ее динамические прогибы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 13-08-01053).

ВЫЯВЛЕНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Si-TiSi₂-MoSi₂-B-Y-SiC НА УКМ В ГИПЕРЗВУКОВЫХ ПОТОКАХ ПЛАЗМЫ

Астапов А.Н., Африди А.Р., Жестков Б.Е., Репин А.О., Терентьева В.С.

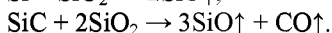
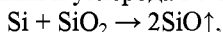
(Москва)

Работа выполнена в продолжение систематических исследований, посвященных разработкам высокотемпературных защитных покрытий на жаропрочные углеродсодержащие композиционные материалы (УКМ), формируемых методами наслоенного нанесения. Результаты ранее проведенных стендовых испытаний [1] показали, что применение покрытий системы Si-TiSi₂-MoSi₂-B-Y-SiC обеспечивает эффективную защиту УКМ от окисления и эрозионного уноса в сверх- и гиперзвуковых потоках воздушной плазмы вплоть до температуры поверхности $T_w = 1800^\circ\text{C}$ – не менее 400 сек., $T_w = 2100^\circ\text{C}$ – не менее 20 сек., самозалечивание технологических и эксплуатационных дефектов ($\varnothing \leq 0,6$ мм) и защиту острых кромок деталей ($R \geq 0,5$ мм). С целью дальнейшего повышения функциональных свойств защитных покрытий и расширения температурно-временных границ их работоспособности в настоящей работе проведено исследование механизма разрушения покрытий указанной системы в условиях ступенчатого нагрева поверхности гиперзвуковым потоком воздушной плазмы в широком диапазоне температур – вплоть до $T_w = 1900\div 1950^\circ\text{C}$. Стендовые испытания проводили в лаборатории «Моделирование условий полета аппаратов с гиперзвуковыми скоростями» ФГУП «ЦАГИ» на установке с высокотемпературной аэродинамической трубой ВАТ-104, оснащенной индукционным плазмотроном.

В результате было установлено, что, начиная с температур $T_w \sim 1650^\circ\text{C}$ в условиях сильного разрежения ($P_w \sim 0,05\div 0,1$ атм.), наблюдается эрозионный унос поверхностных слоев покрытий, сопровождающийся сублимацией кремнезема, скорость которых существенно возрастает как с увеличением температур на поверхности конструкционной стенки, так и с понижением давления окружающей среды. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными по стеклокерамическим покрытиям [2], содержащим в своем составе как свободный, так и связанный в химические

соединения кремний, а также со справочными данными по скорости испарения кремнезема [3].

При достижении температур $T_w \geq 1850^\circ\text{C}$ наблюдается сильная деградация поверхности исследуемых покрытий, сопровождающаяся появлением сначала вздутий, куполообразных наплывов и газонаполненных пузырей, размеры которых составляют $40 \div 60$ мкм в поперечнике и около $8 \div 12$ мкм по высоте. Интенсивность их образования увеличивается с ростом температуры. Нарушение сплошности покрытий, а, следовательно, потеря ими защитных свойств, обусловлены прорывом указанных образований. Анализ фазовых равновесий в системах $\text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$, $\text{SiO}_2 - \text{TiO}_2 - \text{CaO}$ позволяет предположить, что причина зарождения пузырей лежит в генерации летучих монооксидов кремния и углерода по следующим химическим реакциям:



Давление паров SiO уже при 1727°C составляет приблизительно 0,25 атм. [2], поэтому при более низких давлениях окружающей среды будут зарождаться и расти пузыри, заполненные SiO. Поскольку образование SiO обусловлено дефицитом кислорода в системе, а основным источником свободного кремния (первая реакция) является эвтектическая структурная составляющая материала покрытия, SiO-пузыри должны зарождаться преимущественно под сформировавшейся оксидной пленкой и процесс их образования будет тем интенсивнее, чем ниже парциальное давление кислорода во внешней газовой среде. Высокотемпературное взаимодействие имеющегося в структуре основного слоя покрытий карбида кремния SiC (вторая реакция) с формирующейся на поверхности покрытий оксидной пленкой также приводит к локализованному образованию газообразных продуктов – SiO и CO. Последние в свою очередь «пробивают» вязкий слой на основе SiO_2 , так как под ним создается давление, превосходящее давление окружающей атмосферы.

Из приведенного выше следует, что основными причинами, приводящими к потере исследуемыми покрытиями защитных противокислительных функций при температурах на поверхности конструкционной стенки $T_w \geq 1850^\circ\text{C}$ в условиях сильного разрежения ($P_w \sim 0,05 \div 0,1$ атм.), являются эрозионный унос, зарождение, рост и разрыв газонаполненных пузырей.

Работа выполнена в рамках государственной поддержки молодых российских ученых (грант Президента РФ МК-5275.2014.8) и при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 14-01-00890).

Литература

1. Астапов А.Н. Разработка высокотемпературных защитных покрытий на углеродсодержащие композиционные материалы применительно к особотеплонагруженным элементам конструкций авиакосмической и ракетной

техники: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.09: защищена 14.12.2011; утв. 25.07.2012 // *Астапов Алексей Николаевич*. – М., 2011. – 207 с. – Библиогр.: С. 174 – 193.

2. *Верябшицкая Т.М., Лейпунский И.О., Малкин А.И.* Изучение процессов деградации защитных покрытий для углерод-углеродных композиционных материалов // *Известия Академии наук. Энергетика*. – М.: Наука, 1996. – № 6. – С. 50 – 62.

3. *Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М., Бродов М.Е. и др.* Физические величины. Справочник / Под ред. Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ УСТОЙЧИВОСТИ ГУСТО ПЕРФОРИРОВАННОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ

Баженов В.Г., Баранова М.С., Жестков М.Н., Кузьмичева Т.В.

(Нижний Новгород)

В докладе представлена методика расчета критического давления и формы потери устойчивости цилиндрической оболочки с густой регулярной перфорацией круглыми отверстиями, опертой по торцам на ребра под действием внешнего давления. Методика позволяет исключить из рассмотрения конструктивные особенности в виде отверстий. Предлагается заменить трехмерную задачу для перфорированной оболочки на двухмерную задачу для ортотропной оболочки. Эффективные характеристики ортотропии определялись решением трехмерных задач для ячеек периодичности с отверстиями, соответствующим параметрам перфорации с использованием ППП “Динамика-3” [1]. Данный подход позволил существенно сократить объем вычислительных ресурсов. Если для решения задачи в трехмерной постановке необходимо было использовать порядка $17 \cdot 10^7$ конечных элементов, то с применением оболочечных элементов размерность задачи сократилась до $17 \cdot 10^3$ элементов. Это позволило решить задачу на обычном персональном компьютере.

Приведен алгоритм, позволяющий определить необходимые параметры ортотропии материала, учитывающие снижение жесткости конструкции за счет наличия перфорации. Точность замены трехмерной задачи двумерной обоснована на примере решения задач изгиба как отдельно взятого, так и целого ряда структурных элементов оболочки с перфорацией. Для рассчитанной оболочки с перфорацией около 500 000 отверстий погрешность двумерной модели по значению критического давления не превышает 2-3 %.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ для ведущих научных школ (НШ-2843.2012.8), РФФИ(14-08-01129-а).

Литература

1. Программный продукт «Пакет прикладных программ для решения трехмерных задач нестационарного деформирования конструкций, включающих массивные тела и оболочки Динамика-3» (ППП «Динамика-3»). Сертификат соответствия Госстандарта России № РОСС RU. ME20. H00338.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ ПРИ КОМБИНИРОВАННЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

*Баженов В.Г., Кибец А.И., Артемьева А. А., Нагорных Е.В., Жестков М.Н.,
Кузьмичева Т.В.*

(Нижний Новгород)

Проводилось численное моделирование осесимметричных (с кручением) упругопластических процессов деформирования и предельных состояний оболочек вращения в широком диапазоне скоростей нагружения (от квазистатических до динамических) на основе теории оболочек типа Тимошенко и теории пластичности с нелинейным изотропным и кинематическим упрочнением. За базовый взят вариационно-разностный метод решения осесимметричных задач о больших деформациях оболочек вращения путем пошаговой перестройки геометрии оболочки [1]. Вращение элементов как жесткого целого при кручении учитывается введением коротационной производной Яуманна при умеренных сдвиговых деформациях [2]. При исследовании неосесимметричных форм потери устойчивости с введением начальных несовершенств формы оболочки использовался ППП «Динамика-3», разработанный в НИИ механики ННГУ [3].

Проводилось численное моделирование монотонных и немонотонных процессов кинематического нагружения цилиндрических оболочек при различных соотношениях кручения и растяжения, кручения и внутреннего давления. Показано, что при монотонном комбинированном нагружении могут быть достигнуты предельные состояния в рамках осесимметричной постановки задачи без учета неосесимметричных форм потери устойчивости. При последовательном нагружении сжатием-кручением, растяжением-кручением, внутренним давлением – кручением происходит потеря устойчивости осесимметричного процесса деформирования по неосесимметричной формам при деформациях сдвига от кручения менее 3%. Результаты расчетов согласуются с экспериментальными данными.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ для ведущих научных школ (НШ-2843.2012.8), РФФИ(14-08-01129-а, 14-08-00656-а).

Литература

1. Баженов В.Г., Ломунов В.К. Устойчивость и закритическое состояние оболочек вращения при осевом ударе // Прикладная механика. – 1986. – Т. 22, № 9. – С. 28-33.
2. Баженов В.Г., Павленкова Е.В., Артемьева А.А. Численное решение обобщенных осесимметричных задач динамики упругопластических оболочек вращения при больших деформациях // ВМСС. – 2012. – Т.5, № 4.
3. Программный продукт «Пакет прикладных программ для решения трехмерных задач нестационарного деформирования конструкций, включающих массивные тела и оболочки Динамика-3» (ППП «Динамика-3»). Сертификат соответствия Госстандарта России № РОСС RU. ME20. H00338.

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ И МЕТОДОВ РАСЧЕТА ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ МИНИМАЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ В ГРУНТОВЫХ СРЕДАХ

Баженов В.Г., Котов В.Л., Линник Е.Ю., Тарасова А.А.

(Нижний Новгород)

Проводится анализ моделей и методов решения задач поиска оптимальной формы тел вращения при их проникании в плотные среды [1, 2] на основе моделей локального взаимодействия (МЛВ) [3] и модели грунтовой среды Григоряна в осесимметричной постановке. Получена новая МЛВ, уточненная за счет учета нелинейной сжимаемости и сопротивления сдвигу грунтовой среды при аналитическом решении задачи о расширении сферической полости [4]. В полученном аналитическом решении плотность несжимаемой среды предложено определять для каждой скорости расширения полости в соответствии с ударной адиабатой грунтовой среды из условия Гюгонио на ударной волне (УВ). Это существенно расширяет применимость аналитического решения и МЛВ на его основе для около- и сверхзвуковых скоростей проникания. Приводятся результаты, полученные в рамках МЛВ на основе решения задачи о расширении полости при учете нелинейных свойств грунта, которые незначительно отличаются от экспериментальных максимальных значений силы сопротивления внедрению в песчаный грунт сферических и конических ударников с углом раствора менее 80°.

Известно [1–4], что параметры установившегося движения тела конечной массы в грунте преимущественно определяются величиной силы сопротивления

на квазистационарной стадии внедрения, достаточно быстро формирующейся после достижения силой максимального значения. Для затупленных тел, в частности, полусферических ударников, экспериментально наблюдающийся максимум силы может отличаться от ее квазистационарного значения в 1.5–2 раза, для ударников с плоским торцом – в 2.5–3 раза [3]. Для таких тел МЛВ будет иметь погрешность, пропорциональную отношению максимума силы к ее квазистационарному значению [4]. Отмеченные особенности, как показано далее, оказывают влияние на силовые характеристики и форму оптимального тела при движении в грунтовых средах и воспроизводятся только в двумерных численных расчетах.

При обтекании затупленных ударников потоком плотной среды форма ударника в окрестности лобовой точки оказывает влияние на распределение напряжений вдоль образующей тела, что противоречит исходным предпосылкам МЛВ. Подобный эффект объясняется волновым воздействием затупленной части ударника на область грунта вблизи контактной поверхности и не связан с разгружающим действием свободной поверхности или локальным отрывом среды на некотором участке поверхности тела [3]. В этом случае в процессе проникания ударник взаимодействует с грунтом, возмущенным отошедшей от тела УВ, что приводит к уменьшению действующих на данном участке поверхности напряжений и интегральной силы сопротивления. Предельный случай подобного воздействия – отрыв потока среды от тела.

Заметим, что рассматриваемое оптимальное тело с торцом и полученное в численных расчетах «оптимальное» затупленное тело обтекались безотрывно по всей образующей вплоть до донного среза. Для тел с большим притуплением в расчетах наблюдался отрыв потока от поверхности ударника до достижения миделя, но их итоговое сопротивление оказалось больше. Отрыв среды приводит к увеличению размера каверны, дополнительным потерям энергии на ее расширение и вследствие этого – увеличению силы сопротивления прониканию.

Таким образом, в работе теоретически и экспериментально обоснованы основные допущения при решении задачи оптимизации формы осесимметричных тел в рамках МЛВ: квадратичная по скорости модель применима, трение пропорционально давлению, обтекание безотрывно. Однако решение задачи при учете нелинейных эффектов обтекания в двумерной постановке позволяет существенно уточнить как форму, так и силовые и кинематические характеристики оптимальных затупленных тел заданной длины при проникании в грунтовые среды.

Работа выполнена при финансировании в рамках программы Президента Российской Федерации для государственной поддержки коллективов ведущих научных школ России (НШ-2843.2012.8) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 14-08-01129, 13-08-00531, 13-08-00658).

Литература

1. Горшков А.Г., Тарлаковский Д.В. Удар о грунт. Механика контактных взаимодействий. М.: Физматлит, 2001. С. 409-416.
2. Баженов В.Г., Котов В.Л. Математическое моделирование нестационарных процессов удара и проникания осесимметричных тел и идентификация свойств грунтовых сред. М.: Физматлит, 2011. 208 с.
3. Баженов В.Г., Баландин В.В., Григорян С.С., Котов В.Л. Анализ моделей расчета движения тел вращения минимального сопротивления в грунтовых средах // Прикладная математика и механика. 2014. Т. 78, вып. 1. С. 11-21.
4. Баженов В.Г., Котов В.Л., Линник Е.Ю., Тарасова А.А. Исследование моделей и методов расчета форм тел вращения минимального сопротивления при движении в грунтовых средах // Материалы XVIII Международного симпозиума “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” им. А.Г. Горшкова. Т. 1. М.: ООО «ТР-принт». 2013. С. 26-27.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ МОНОТОННЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

Баженов В.Г., Осетров С.Л., Осетров Д.Л.

(Нижний Новгород)

Рассматривается применение и развитие экспериментально-расчетного метода для изучения деформационных и прочностных характеристик упругопластических элементов конструкций [1-5]. Проведено численное исследование процесса деформирования и разрушения упругопластических стержней с различным поперечным сечением (круг, квадрат, прямоугольник) и оболочек (тонкой и толстой) при квазистатическом растяжении. Численное моделирование квазистатического растяжения и разрушения проводилось с использованием пакетов программ «Динамика-2», «Динамика-3», LS-DYNA на основе вариационно-разностного метода и явной схемы «крест» в динамической постановке. Для описания процесса разрушения использовалась связанная модель накопления повреждений на основе критерия прочности типа Писаренко-Лебедева.

Исследовано влияние геометрических параметров образцов, начальных несовершенств и краевых эффектов на процесс растяжения, определены параметры и критерии локализации деформаций. Детально описан механизм образования и развития краевых эффектов для стержней и оболочек в зависимости от формы поперечного сечения образца и свойств материала.

Предложено приближенное описание краевых эффектов. Проведен анализ процесса образования шейки в зависимости от формы поперечного сечения образца и свойств материала. Сделан вывод о применимости критерия Консидера для определения момента и места локализации деформаций при растяжении различных образцов. На основе сравнительного анализа процессов деформирования стержней и оболочек сделаны выводы о влиянии вида напряженно-деформированного состояния на процесс разрушения и проведен анализ применимости связанной модели накопления повреждений на основе критерия прочности типа Писаренко-Лебедева. Предложено развитие экспериментально-расчетного подхода для определения параметров связанных моделей деформирования и разрушения и оценки места и вида разрушения.

Показано, что экспериментально-расчетный метод является эффективным способом изучения деформирования и разрушения упругопластических элементов конструкций при достаточно сложной геометрии образцов, больших деформациях и неоднородном напряженно-деформированном состоянии.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ для ведущих научных школ (НШ-2843.2012.8), РФФИ(14-08-01129-а, 12-08-33106-мол_а_вед).

Литература

1. *Баженов В.Г., Зефиров С.В., Осетров С.Л.* Экспериментально-расчетный метод построения истинных диаграмм деформирования при больших деформациях на основе испытаний на твердость. //Доклады академии наук. 2006. т.407, №2. С.183-185.

2. *Баженов В.Г., Зефиров С.В., Осетров С.Л.* Экспериментально-расчетный метод идентификации деформационных и прочностных свойств материалов. //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2006. т.72, №9. С.39-45.

3. *Баженов В.Г., Зефиров С.В., Осетров С.Л.* Метод идентификации деформационных и прочностных свойств металлов и сплавов. //Деформация и разрушение материалов. 2007. № 3. С.43-48.

4. *Баженов В.Г., Зефиров С.В., Крамарев Л.Н., Осетров С.Л., Павленкова Е.В.* Способ определения деформационных и прочностных свойств материалов при больших деформациях и неоднородном напряженно-деформированном состоянии //Патент на изобретение № 2324162. Заявка №2006115805. Опубликовано 10.05.2008, бюлл.№13.

5. *Баженов В.Г., В.К. Ломунов, С.Л. Осетров, Е.В. Павленкова* Экспериментально-расчетный метод исследования больших упругопластических деформаций цилиндрических оболочек при растяжении до разрыва и построение диаграмм деформирования при неоднородном

напряженно-деформированном состоянии //Прикладная механика и техническая физика. Т. 54, № 1, 2013, с.116-124.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ИХ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ГРУНТОМ

Балафендиева И.С., Бережной Д.В., Карамов А.В., Секаева Л.Р.

(Казань)

При моделировании поэтапного строительства элементов конструкций промышленных и транспортных сооружений для выявления формирующихся полей напряженно-деформированного состояния вводится понятия трансформирующихся конструкций или механических систем, которые на отдельных этапах процесса строительства переходят от одного структурного класса к другому. Трансформация расчетной схемы происходит дискретно при переходе с одного этапа строительства на другой. На каждом шаге трансформирования необходимые расчеты приходится проводить с учетом результатов, полученных в механической системе на предыдущих шагах. Такие расчеты требуют постановки соответствующих задач механики с учетом геометрической нелинейности.

Для решения геометрически нелинейных задач в работе используется алгоритм, реализованный на основе «модифицированной инкрементальной теории Лагранжа», когда процесс деформирования представляется в виде последовательности равновесных состояний при соответствующих уровнях нагружения. При моделировании взаимодействия элементов конструкций с грунтами в ряде случаев для адекватной оценки характера деформирования используются различные методики контактного взаимодействия элементов конструкций между собой и с грунтом. Не учет контакта может привести к принципиально иному результату, в какой-то степени даже противоречащему здравому смыслу.

Известно, что в области пластического деформирования не существует однозначных зависимостей напряжений от деформаций. Последние зависят не только от напряжений в конечном состоянии, но и от предыстории нагружения. Поэтому зависимости между напряжениями и деформациями, которые используются в теории упругости, в теории пластического течения заменяются соотношениями между приращениями деформаций и напряжений. При этом предполагают, что существует условие текучести, определяющее напряженное состояние, при выполнении которого бесконечно близкая окрестность материальной точки деформируется пластически.

Для многих грунтов предельное состояние хорошо описывается условием прочности Мизеса-Боткина [1-2]. Вместо соотношений типа Прандля-Рейсса, связывающих приращения компонент тензора напряжений и тензора деформаций, по аналогии принимаются соотношения между приращениями компонент тензора истинных напряжений и тензора истинных деформаций [3-4].

Для примера приводится расчет напряженно-деформированного состояния подпорных стенок котлована станции метрополитена при поэтапном проведении работ. Так как котлован имеет форму параллелепипеда, его длина велика по сравнению с его шириной, то для выявления основных закономерностей деформирования расчет можно проводить в двумерной постановке, в условиях плоской деформации. Механические характеристики дискретно расположенных объектов при проведении расчетов пересчитывались к средним величинам. Дискретизация проводится квадратными конечными элементами сплошной среды, за базовый размер стороны элемента выбирается толщина бетонной стенки. При расчетах на первом этапе прикладывался собственный вес расчетной области. Далее, поэтапно и равными порциями проводится выемка грунта. Вычислительный эксперимент показал, что в данной задаче достаточно провести выемку всего грунта за десять этапов. Были проведены две серии расчетов. В первом случае контактная задача не решалась, во втором случае между грунтом и бетонными стенками вводился контактный элемент и допускался отрыв и проскальзывание между стенками котлована и грунтом.

Анализ результатов показывает, что эти варианты расчета принципиально отличаются. В первом случае стенки расходятся в стороны и максимальные изгибные (растягивающие) напряжения возникают на внутренней поверхности подпорных стенок. Это объясняется тем, что после выемки грунта между стенками, который (при отсутствии контакта) как бы стягивал стенки, грунт, расположенный за подпорными стенками, начинает раздвигать их. Этого не происходит в случае учета контакта между стенками и грунтом, и в этом случае после выемки грунта под действием силы тяжести грунта за стенками они начинают изгибаться вовнутрь котлована. Кроме этого, уровень напряженного состояния в этом случае гораздо ниже.

Предложенный метод решения задач механики с конкретными приложениями относится к современной технологии научного сопровождения, проектирования и строительства сложных объектов. Его использование позволяет проследить за изменением напряженно-деформированного состояния и поля перемещений структурно изменяющейся расчетной области от начала и до конца строительства. Это позволяет более точно и технически грамотно принимать проектные решения для различных этапов строительных работ, что зачастую нельзя сделать, опираясь только на существующие СНиПы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 12-01-00955, № 12-01-97026, № 12-01-31212, № 13-97057, № 13-01-97058.

Литература

1. *Зарецкий Ю.К.* Лекции по современной механике грунтов. – Ростов, РГУ, 1989. – 607 с.
2. *Султанов Л.У., Бережной Д.В.* Математическое моделирование несущей способности грунтовых насыпей // Вестник Казанского государственного технического университета, 2013, №1, С.117-124.
3. *Новожилов В.В.* Основы нелинейной теории упругости. – М.-Л.: Гостехиздат, 1948. – 211 с.
4. *Бережной Д.В., Карамов А.В., Сагдатуллин М.К.* Моделирование деформирования поэтапной выемки грунта при строительстве подземных сооружений // Вестник Казанского государственного технологического университета. – 2012. – №17. – С.137-145.

ВЛИЯНИЕ МИКРОНЕОДНОРОДНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ НА КОНТАКТНУЮ ПРОЧНОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Белашова И.С., Гориков А.А., Ломовской В.А.

(Москва)

Проводится теоретический анализ процесса распространения зоны отрыва и разрушения адгезионного контакта макроскопических слоев в покрытиях металл-металл. Анализ проводится по моделям, описывающим кинетический процесс нарушения контактной прочности при различных величинах действующих напряжений и различных периодах внешнего разрушающего воздействия. Рассматривается абсолютно жесткое основание, на которое нанесено полубесконечное упругое покрытие толщиной, значительно превышающей молекулярный уровень, т.е. $h \gg \lambda$, где h – толщина нанесенного покрытия, λ – постоянная кристаллической решетки. Предполагается, что усилие отрыва создает только нормальные напряжения, линейно зависящие от перемещения нанесенного слоя. В условиях статического режима внешнего воздействия на контактный слой предполагается, что в момент времени $t = t_0$ конец покрытия с координатой $z = 0$ получает мгновенное перемещение, которое остается постоянным в течение длительного периода. Рассматривается решение дифференциального уравнения прогиба нанесенного покрытия при условии ограниченности на бесконечности и условиях на свободном конце $z = 0; y = y_0; y'' = 0$, где y – координата прогиба. Экспоненциальное решение

определения прогиба предполагает принцип суммируемости разрушаемых зон контактов между жестким основанием и упругим покрытием при условии, что при постоянном внешнем разрушающем усилии время до начала разрушения обратно пропорционально напряжению, возникающему в зоне контакта. Это позволяет в рамках выбранного модельного представления теоретически описать зависимость длины зоны разрушения от времени и вычислить время разрушения в любой произвольной точке покрытия. В модель вводится в качестве параметра степень микронеоднородности возможной зернистости поверхности контактирующих металлических покрытий и жестких оснований. Характеристикой однородности принимается дисперсия значений плотности как результат усреднения по элементарной площадке. Проведен анализ зависимости дисперсии от величины площадки усреднения, что приводит к постановке одномерной задачи определения степени однородности поверхности шлифа по методу случайной секущей. Анализ решения проводится для двух уровней неоднородности поверхностей металлического контакта «основание-покрытие»: микро и макро уровней с использованием математического аппарата непрерывного и дискретного анализа.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 13–01–00728-а).

О РЕАЛИЗАЦИИ ТЕСТА ТЕЙЛОРА ПРИ ПРЯМОМ И ОБРАЩЕННОМ УДАРЕ

*Белов Г.В., Гусаров А.П., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И.,
Селиванов В.В., Сотский М.Ю.*

(Москва)

Применение теста Тейлора [1, 2] для исследования высокоскоростного деформирования материалов обычно связано с высокоскоростной съемкой процесса взаимодействия цилиндрического образца с жесткой стенкой при прямом ударе. Следует отметить, что тест Тейлора, разработанный для упругопластических металлов [1, 2], стал использоваться для ортотропных [3] и полимерных [4] материалов, а также для пористых [5, 6] и высокопористых [7] металлов и сплавов.

Представлены результаты исследований особенностей реализации теста Тейлора при прямом и обратном ударе, так как обратный удар широко применяется в экспериментальных технологиях пьезоэлектрической акселерометрии [8]. Исследования проводились на основе численного моделирования с использованием пакета прикладных программ LS-DYNA и полученных экспериментальных данных для высокопористых алюминиевых сплавов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-00383-а).

Литература

1. *Taylor G.I.* The use of flat-ended projectiles for determining yield stress. I. Theoretical considerations//Proc. R. Soc. Lond. 1948. Vol. A194. №1038. P. 289-299.
2. *Wiffin A.C.* The use of flat-ended projectiles for determining yield stress. II. Tests on various metallic materials//Proc. R. Soc. Lond. 1948. Vol. A194. №1038. P. 300-322.
3. *Mandlin P.J., Bingert J.F., House J.W., Chen S.R.* On the modeling of the Taylor cylinder impact for orthotropic textured materials: experiments and simulations//Int. J. Plasticity. 1999. Vol. 15. №2. P. 139-166.
4. *Sarva S., Mulliken A.D., Bayce C.M.* Mechanics of Taylor impact testing of polycarbonate//Int. J. of Solid and Struct. 2007. Vol. 44. №7-8. P. 2381-2400.
5. *Lu G., Wang B., Zhang T.* Taylor Impact test for ductile porous materials - Part 1: theory//Int. J. Imp. Engng. 2001. Vol. 25. №10. P. 981-991.
6. *Wang B., Zhang T., Lu G.* Taylor Impact test for ductile porous materials - Part 2: experiments//Int. J. Imp. Engng. 2003. Vol. 28. №5. P. 499-511.
7. Применение теста Тейлора для исследования динамических механических свойств высокопористого алюминиевого сплава / *Г.В.Белов, А.П.Гусаров, В.А.Марков, А.Ф.Овчинников, В.И.Пусев, В.В.Селиванов, М.Ю.Сотский* // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электронный журнал. 2012. №9. С. 13-28. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/44058/html> (дата обращения 20.12.2013).
8. Методическое обеспечение исследования динамических механических свойств высокопористых алюминиевых сплавов при обратном ударе / *Г.В.Белов, А.П.Гусаров, В.А.Марков, А.Ф.Овчинников, В.И.Пусев, В.В.Селиванов, М.Ю.Сотский* //Материалы XVII Международного симпозиума "Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред" им. А.Г.Горшкова. Ярополец, 14-18 февраля 2011 г. Т.2. М.: ООО "ТР-принт", 2011. С. 77-82.

О ДИНАМИЧЕСКИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ СОТОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА НА ОСНОВЕ ТЕСТА ТЕЙЛОРА

Белов Г.В., Гусаров А.П., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В., Сотский М.Ю.

(Москва)

Удар цилиндрического образца о жесткую стенку, применяемый в тесте Тейлора [1,2], используется в данной работе для исследования динамических свойств высокопористых [3] сотовых конструкций из алюминиевых сплавов. Представлены результаты экспериментальных исследований с применением теста Тейлора при прямом ударе о жесткую стенку со скоростью до 150 м/с с использованием высокоскоростной оптической съемки, а также при обратном ударе с использованием пьезоэлектрической акселерометрии [4], которые используются для тестирования задач численного моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-08-00383-а).

Литература

1. *Taylor G.I.* The use of flat-ended projectiles for determining yield stress. I. Theoretical considerations//Proc. R. Soc. Lond. 1948. Vol. A194. №1038. P. 289-299.

2. *Wiffin A.C.* The use of flat-ended projectiles for determining yield stress. II. Tests on various metallic materials//Proc. R. Soc. Lond. 1948. Vol. A194. №1038. P. 300-322.

3. Применение теста Тейлора для исследования динамических механических свойств высокопористого алюминиевого сплава / *Г.В.Белов, А.П.Гусаров, В.А.Марков, А.Ф.Овчинников, В.И.Пусев, В.В.Селиванов, М.Ю.Сотский* //Наука и образование. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электронный журнал. 2012. №9. С. 13-28. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/44058/html> (дата обращения 20.12.2013).

4. Методическое обеспечение исследования динамических механических свойств высокопористых алюминиевых сплавов при обратном ударе/*Г.В.Белов, А.П.Гусаров, В.А.Марков, А.Ф.Овчинников, В.И.Пусев, В.В.Селиванов, М.Ю.Сотский*//Материалы XVII Международного симпозиума "Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред" им. А.Г.Горшкова. Ярополец, 14-18 февраля 2011 г. Т.2. М.: ООО "ТР-принт", 2011. С. 77-82.

О МЕХАНИЧЕСКИХ И АМОТИЗИРУЮЩИХ СВОЙСТВАХ БЛОКОВ ВНУТРЕННЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НОСОВЫХ ОТСЕКОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Белов Г.В., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В.

(Москва)

В работах [1,2] показано, что конструкции внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов могут содержать рамы, узлы крепления и блоки радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), а на долю последних приходится 70...80% массы внутреннего оборудования и они занимают до 90...95% площади поперечного сечения отсека. На основе полученных в [1] диаграмм деформирования блоков РЭА проведен расчет удельной энергии поглощения удара и эффективной энергии поглощения удара [3] для испытанных на сжатие блоков РЭА и приводится их сопоставление с аналогичными характеристиками механических эквивалентов конструкций внутреннего оборудования носовых отсеков уменьшенных моделей летательных аппаратов.

Литература

1. *Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И.* Модельная среда для внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов//Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. Спец. выпуск. С. 196-206.
2. *Белов Г.В., Марков В.А., Пусев В.И., Селиванов В.В.* О разработке механических эквивалентов конструкций внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов//Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Машиностроение. 2013. Спец. выпуск №2. С. 180-188.
3. *Марков В.А., Пусев В.И., Селиванов В.В.* О вопросах демпфирующих и амортизирующих свойств материалов и конструкций//Наука и образование. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электронный журнал. 2012. №6. С. 1-14. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/44023/html> (дата обращения 20.12.2013).

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МИКРОСЕЙСМ В СЛОЖНОЙ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ

Бережной Д.В., Мокшин Е.В., Фирстов Д.В.

(Казань)

В работе излагается методика конечно-элементного расчета вынужденных колебаний кусочно-неоднородной сплошной среды [1,2]. Решается задача обнаружения местоположения локального геологического события (гидроразрыв пласта, возникновение разлома и т.д.) методом обращения сигналов по времени. Данный метод обладает большими требованиями к

вычислительным ресурсам, так как требует численного моделирования процессов распространения упругих волн в геологической среде на протяжении всего времени наблюдения. Снизить эти требования можно путем уменьшения размеров области моделирования. Однако в этом случае возникает проблема отраженных волн от границ расчетной области. В рамках данной работы доклада был предложен способ избавления от ложных отражения путем реализации “поглощающих граничных условий”.

В работе исследован вариант построения “поглощающих граничных условий” на основе вязкоупругой модели Фойгта для неоднородных горизонтально слоистых сред. На основе метода реверсирования сигналов по времени исследованы вопросы восстановления местоположения разновременных источников в вязкоупругой среде. Рассмотрено применение технологии на распознавание кратковременной серии событий. В предлагаемом подходе к построению “поглощающих граничных условий” вводится так называемая область расширения расчетной области. В области расширения параметры, определяющие механические свойства грунта, плавно изменяются от границы области моделирования к границе области расширения. Плавное изменение данного параметра позволяет минимизировать отражения от слоев грунта с различными параметрами затухания. Был проведен ряд вычислительных экспериментов, в ходе которых был установлен основной принцип построения “поглощающих граничных условий” для неоднородных горизонтально слоистых сред, который заключается в необходимости соответствия сейсмо-механических параметров на границе расчетной области с областью расширения. Предложенный подход не требует введения специальных процедур и функций в используемую численную схему. Установленные принципы использования “поглощающих граничных условий” при численном моделировании неоднородных горизонтально слоистых сред повышают эффективность данного подхода для соответствующих типов конфигураций геологических объектов. Результаты были сопоставлены с результатами моделирования расчетной области, увеличенной до величины, исключающей воздействие отраженных от границ волн. Было выявлено, что восстановленный сигнал, снятый с места приложения силы, практически не отличается. По результатам выявлено, что предложенная технология обратного реверсирования по времени способна восстановить местоположение нескольких разновременных событий.

Было произведено численное моделирование процесса обнаружения точечного источника. При решении прямой задачи в качестве источника возбуждения внутри модели локально прикладывалась сила в течение одного шага моделирования. В точках расположения сейсмоприемников на верхней границе расчетной области снимались значения скоростей вертикальных и

горизонтальных перемещений. В обратной задаче полученные сигналы инвертировались по времени и использовались в качестве источников возбуждения в местах расположения соответствующих приемников.

Для уменьшения требований к размеру оперативной памяти вычислительного комплекса в данной работе применяется сжатие матрицы системы линейных уравнений, полученной в результате дискретизации задачи. Для иллюстрации подобного подхода представим, что решается задача на однородной сетке с полностью однородными свойствами пористой среды. В этом случае, без учета граничных условий, все строки сформированной матрицы будут содержать одинаковый набор ненулевых элементов. Если расчетная область состоит из нескольких однородных подобластей, то матрица задачи будет содержать лишь небольшое число уникальных строк. При этом для каждой неизвестной достаточно хранить лишь номер соответствующей уникальной строки матрицы. Описанный подход обобщается на расчетную область с неоднородными свойствами среды. Набор уникальных строк матрицы строится автоматически с некоторой заданной погрешностью. На практике данный метод позволяет уменьшить требования к оперативной памяти в 40-50 раз, позволяя проводить расчеты для соответственно больших моделей. При этом точность решения остается удовлетворительной. Для реализации расчетов на графических ускорителях используется библиотека с открытым исходным кодом VexCL [3]. Данная библиотека упрощает разработку приложений с применением технологии OpenCL и позволяет использовать интуитивную нотацию для записи базовых операций линейной алгебры. Расчеты проводились на гетерогенном вычислительном кластере. На каждом из семи узлов кластера установлено по три GPU AMD Radeon HD 7970.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 12-01-00955, № 12-01-97026, № 12-01-31212, № 13-97057, № 13-01-97058.

Литература

1. *Камилов М.Р., Рыжов В.А., Биряльцев Е.В., Бережной Д.В.* Моделирование процесса естественного образования вертикально-направленных объемных волн в геосреде // *Экспозиция Нефть Газ.* – 2011. – № 6. – С. 5-7.
2. *Мокшин Е.В., Биряльцев Е.В., Бережной Д.В.* Сопоставление метода «time reverse modeling» и метода дифракционного суммирования в задаче пространственно-временной локализации микросейсмического события // *Экспозиция Нефть Газ.* – 2011. – № 6. – С. 26-28.
3. *Denis Demidov, Karsten Ahnert, Karl Rupp, Peter Gottschling.* Programming CUDA and OpenCL: A Case Study Using Modern C++ Libraries // *SIAM Journal of Scientific Computing*, 2013, accepted for publication, <http://arxiv.org/abs/1212.6326>.

ИНЖЕНЕРНЫЕ РЕШЕНИЯ И РАСЧЁТ ПРОЦЕССА ГРАНУЛИРОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ КАПЕЛЬ РАСПЛАВА В ВОСХОДЯЩЕМ ПОТОКЕ С ЗАМКНУТЫМ ПО ОХЛАЖДАЮЩЕМУ ВОЗДУХУ ЦИКЛОМ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОДУТЬЯ

Беспалова В.О., Захаров М.К., Таран А.В., Таран А.Л., Таран Ю.А.

(Москва)

Недостатками крупнотоннажного процесса гранулирования кристаллизацией капель расплавов, диспергируемых в восходящий поток воздуха в грануляционных башнях (приллирования) являются: ограниченные размеры гранул ($d \leq 3$ мм), их статическая прочность $\leq 10 \div 15$ Н/гранулу, наличие на поверхности канала, соединяющего усадочную полость с атмосферой. Достоинства: безретенная схема процесса, близкий к монодисперсному состав продукта при резонансном виброраспаде струй расплава на капли, сферичность гранул и хороший товарный вид продукта [1].

В действующих производствах азотосодержащих минеральных удобрений, серы, щелочей и др. используют гранбашни с разомкнутым по охлаждающему воздуху циклом, что требует очистки воздушных выбросов (~ 1 мл·км³/ч с одного агрегата) от пыли и аэрозолей и не позволяет утилизировать теплоту гранулирования, которая у агрегатов, производящих ~ 60 т/ч достигает $5,5 \cdot 10^3$ квт [2,3].

В работе представлены результаты инженерной проработки реализации этого процесса в замкнутом по охлаждающему воздуху цикле с узлом полезного использования теплоты гранулообразования, для широкого круга промышленных продуктов [3]. Для этого в периферийных, отделённых стенкой от рабочего объёма башни полостях, имеющих окна для засасывания охлаждающего воздуха из рабочего объёма башни и нагнетания его в рабочей объём башни, форсунками диспергируют водный раствор гранулируемого вещества прямококом гранулируемых в рабочем объёме башни капель расплава. Этот поток раствора охлаждает засасываемый из грануляционной башни поток воздуха, очищает его от пылевидных, туманообразных частиц и компримирует (за счёт спутного течения – гидродутьё [3]) охлаждённый и очищенный воздух, нагнетая его через окна в нижнюю часть рабочего объёма грануляционной башни. Теплота гранулообразования «снимается» контактным теплообменом с охлаждающего воздуха компримирующим потоком водного раствора продукта и «поднимается» на более высокий температурный уровень с помощью теплового насоса [3].

Дано математическое описание сопряжённой задачи гидродинамики и переноса теплоты при охлаждении и кристаллизации капель гранулируемого расплава, гидродинамики и контактного теплообмена охлаждаемого воздуха и

компримирующего его за счёт спутного течения диспергированного потока раствора. Определены рабочие области концентраций и температур охлаждающего «гидродутьевого» водного раствора продукта, его удельные расходы, обеспечивающие работоспособность агрегата при приллировании расплавов аммиачной селитры, нитрата калия, щелочей. Исследовано влияние технологических параметров на ход процесса кристаллизации (динамику температурных полей, фазовых границ и границ полиморфных превращений) в каплях расплава. Оценены энергетические и технико-экономические затраты на проведение процесса, в том числе в сравнении с действующими агрегатами с «разомкнутым» по охлаждающему воздуху циклом[1,4-7].

Литература

1. Производство аммиачной селитры в агрегатах большой единичной мощности // Под ред. В.М. Олевского. – М.: Химия, 1990. 285 с.
2. Таран А.Л., Теория и практика процессов гранулирования расплавов и порошков: дис. ... докт. техн. наук. – М. - 2001. - 524 с.
3. Таран Ю.А. Разработка и анализ процессов гранулирования расплавов с использованием экологически безопасных энергосберегающих схем: дис.... канд. техн. наук: – М. – 2011. - 254 с.
4. Горловский Д.М., Альтшулер Л.Н., Кучерявый В.И. Технология карбамида. – Л.: Химия, 1981. 320 с.
5. Чернышов А.К., Левин Б.В., Туголуков А.В. и др. Аммиачная селитра: свойства, производство, применение. – М.: 2009. 544 с.
6. Классен П.В., Гришаев И.Г. Шомин И.П. Гранулирование. – М.: Химия, 1991. 240 с.
7. Менковский М.А., Яворский В.Т. Технология серы. – М.: Химия, 1985. 328 с.

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АМОРТИЗИРУЮЩИХ ПОСАДОЧНЫХ СИСТЕМ ПАРАШЮТНО-ДЕСАНТНОЙ ТЕХНИКИ

Болдырев В.Б., Бухтояров И.И., Морозов А.А., Пономарев А.Т.

(Москва, Дубна)

В настоящее время для десантирования боевой и специальной техники (БСТ) Воздушно-десантных войск, спасательного оборудования и грузов Министерства по чрезвычайным ситуациям применяются парашютные платформенные и бесплатформенные парашютные средства десантирования (ППСД и БПСД соответственно), а также парашютно-реактивные системы (ПРС) [1]. В конструкции ППСД и БПСД до 65–75% кинетической энергии

приземляемых грузов ($W_{\text{кин.гр}}$) гасится с помощью многокупольных парашютных систем (МКС) типа МКС-350-12, разработанных на базе блока основного парашюта (ОП) с площадью купола 350 м^2 , а для гашения остальной части указанной энергии применяются тканевые амортизирующие посадочные системы (АПС), наполняемые либо набегающим («подпорным») потоком воздуха, образующимся на этапе парашютного спуска десантируемого объекта (ДО), либо сжатым воздухом от специального блока наддува. Что касается ПРС, то в их конструкции в качестве основного гасителя $W_{\text{кин.гр}}$ (до 80 %) выступает тормозная двигательная установка (ТДУ), представляющая собой блок ракетных двигателей твердого топлива (РДТТ). При этом применяемой в составе ПРС парашютной системе отводится главным образом роль обеспечения ускоренного вывода компоновки «ДО + ПРС» на вертикальный участок траектории перед включением ТДУ в работу. В этом случае доля $W_{\text{кин.гр}}$, погашаемой с помощью парашютной системы, не превышает 16–18 %.

В ранее принятой концепции развития ПРС применялись АПС лыжного («подкладного») типа с довольно «жесткими» амортизирующими элементами (бакелитовая фанера, плотный мелкозернистый пенопласт с металлическим или деревянным каркасом). Основным предназначением АПС такого типа являлось обеспечение сопряжения ДО с рольганговым оборудованием самолета, а также снижение вероятности повреждения («пробоя») днища образца БСТ при его приземлении на каменистые площадки десантирования. Однако в ходе войсковой эксплуатации серийных ПРС типа ПРСМ-915 обнаружилась несостоятельность существующего подхода к использованию АПС в составе ПРС. Оказалось, что в связи с ограниченным временным циклом работы РДТТ вклад, вносимый ТДУ в процесс гашения $W_{\text{кин.гр}}$, в сильной степени зависит от эффективности решения сложной, многопараметрической задачи определения оптимальной высоты включения ТДУ ($h_{\text{вкл.тду.опт}}$). Раннее включение ТДУ, при котором фактическая высота включения этой установки ($h_{\text{вкл.тду.ф}}$) существенно превышает параметр $h_{\text{вкл.тду.опт}}$, приводит к «разгону» ДО после выключения ТДУ и до момента его приземления, что становится причиной недопустимого роста перегрузок, действующих на ДО при приземлении ($n_{x,y,z \text{ до}}$). При позднем включении ТДУ, когда имеет место условие $h_{\text{вкл.тду.ф}} < h_{\text{вкл.тду.опт}}$, перегрузки $n_{x,y,z \text{ до}}$ также возрастают, но теперь уже из-за не полной реализации потенциальных возможностей ТДУ по гашению $W_{\text{кин.гр}}$. Более того, при таком включении ТДУ зачастую происходит «подскок» ДО при приземлении с последующим его опрокидыванием.

В начале 80-х годов прошлого столетия неоднократно предпринимались попытки устранить вышеназванный недостаток ПРС путем повышения точности определения параметра $h_{\text{вкл.тду.опт}}$. С этой целью электромеханические контактные датчики высоты включения ТДУ (ДВВТДУ), применяемые в

конструкции серийных ПРС ПРСМ-915 и ПРМ-925, предполагалось заменить на более точные датчики радиолокационного, лазерного и ультразвукового типов. Однако решение этой задачи натолкнулось на препятствие, связанное с «ложным» срабатывание вновь вводимых ДВВТДУ в условиях сильной задымленности площадки приземления, а также при воздействии снежных (пылевых) зарядов на компоновку «ДО + ПРС» при ее переходе с парашютного на реактивный участок траектории спуска.

Один из возможных путей уменьшения отрицательного влияния существующей погрешности электромеханических ДВВТДУ на эффективность функционирования ПРС может быть связан с повышением «долевого» вклада АПС в процесс гашения $W_{\text{кин.гр}}$. Первый шаг в этом направлении был сделан при разработке опытной ПРС П235. Здесь энергоемкость АПС была значительно повышена за счет применения амортизирующих металлопенлоплатовых лыж, обладающих увеличенным рабочим ходом при их обжати в процессе приземления. Однако при этом габаритная высота лыж возросла до значения, потребовавшего принятия дополнительных мер по повышению прочностных характеристик узлов крепления ДО к десантно-транспортному оборудованию самолета. Такой подход к конструированию АПС хотя и снизил отрицательное влияние погрешности ДВВТДУ на процесс функционирования ПРС П235, но привел к значительному ухудшению массовой отдачи ее конструкции. Отсюда следует, что применяемая в конструкции существующих образцов ПРС амортизирующая система «подкладного» типа практически полностью исчерпала свои возможности, требуется ее замена на компактную в сложенном состоянии и более энергоемкую тканевую принудительно наполняемую АПС.

Результаты проведенных в последние годы стендовых и летных испытаний образцов БПСД типа ПБС-950 показывают, что дальнейшее снижение относительной массы средств десантирования такого класса может быть достигнуто не за счет увеличения суммарной площади куполов ОП МКС, а на основе кардинального повышения энергоемкости АПС. Такой подход получил практическое подтверждение при проведении глубокой модернизации серийной БПСД ПБС-950. Настоящий доклад посвящен дальнейшему расширению этого направления повышения эффективности функционирования серийных и вновь разрабатываемых образцов БПСД и ПРС.

По результатам анализа многолетних теоретических исследований и летных испытаний БПСД и ПРС [1, 2] в докладе предлагаются пути решения поставленной выше задачи на основе:

– разработки низковысотной ПРС для десантирования образцов БСТ массой свыше 25 т, включающей в свой состав тканевую АПС, ускоренно наполняемую от газогенератора с инжектором, и МКС, разработанную на базе высокопрочного ОП с куполом малой или умеренной площади (150 – 200 м²);

– применения в конструкции БПСД пневмокаркасирующей тканевой АПС с ускоренным наполнением пневмокаркаса от специальных баллонов (емкостей) сжатого воздуха, а основных амортизационных оболочек – набегающим потоком воздуха как на начальном (пологом), так и на вертикальном участках траектории спуска компоновки «ДО + ПБСД»;

– повышения остойчивости образцов БСТ, десантируемых на водную поверхность на БПСД типа ПБС-950, за счет замены существующих пленочных выпускных клапанов тканевых оболочек АПС на тарельчатые клапаны постоянного перепада давлений, а также применения тканевых газонаполняемых баллонетов, устанавливаемых по бортам десантируемого образца БСТ, над верхней частью его корпуса.

Доклад иллюстрируется принципиальными схемами предлагаемых вариантов конструкции АПС перспективных образцов парашютно-десантной техники. Проводится сравнительная оценка этих схем.

В докладе особо подчеркивается необходимость внедрения в практику проектирования и испытаний АПС новых информационно-расчетных технологий, базой которых являются современные численные методы механики сплошной среды [2].

Литература

1. Бухтояров И.И., Морозов В.И., Пономарев А.Т. Анализ особенностей функционирования грузовых парашютных систем по результатам летно-экспериментальных исследований. Материалы XIX международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова, Ярополец, 18 – 22 февраля 2013 г., том 2, с. 66 – 82.

2. Лялин В.В., Морозов В.И., Пономарев А.Т. Парашютные системы. Проблемы и методы их решения. – М.: Физматлит, 2009. – 576 с. – ISBN 978-5-9221-1057-0.

О ВЫБОРЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО СИЛОВОГО МИНИПРИВОДА, ПРОЕКТИРУЕМОГО ПОД СЛОЖНУЮ ФОРМУ РУЛЕВОГО ОТСЕКА БПЛА

*Борисов М.В., Красковский Н.В., Крылов Н.В., Лалабеков В.И., Огольцов И.И.,
Рожнин Н.Б., Самсонович С.Л., Степанов В.С.*

(Москва)

Сложная форма отсека рулевых приводов БПЛА обусловила специальные требования к кинематической схеме приводов для минимизации

массогабаритных показателей элементов исполнительных механизмов входящих в состав электромеханических силовых миниприводов.

В качестве электродвигателей предложено использовать бескорпусные бесколлекторные двигатели на редкоземельных материалах. Такие электродвигатели обладают наименьшими габаритами и удельной мощностью порядка $0,2 \dots 0,5$ кВт/кг.

Для выбора мощности двигателей были проанализированы циклограммы работы и определены максимальная и средняя механические мощности. Учитывая большую разницу между значениями кратковременной максимальной и средней механическими мощностями, принято решение использовать электродвигатель с форсированием. При этом, учитывая, что в циклограмме имеются длительные участки, в которых приводы должны удерживать рулевые поверхности в заданном положении, предложено в кинематическую схему привода ввести механизм с самоторможением.

Для выбора диапазона передаточных чисел, определения величины форсированного напряжения и оптимизации потребляемой энергии составлена математическая модель привода и проведено моделирование в среде Simulink. Анализ результатов моделирования показал, что при увеличении передаточного числа механической передачи уменьшается величина электрического тока, тепловые потери и потребляемая энергия от источника питания. Наименьшее значение потребляемой энергии имеет место при передаточном числе $q=300$.

Для реализации требуемого передаточного числа рассматривались кинематические схемы передач, построенных по двухступенчатой схеме. В качестве выходных ступеней рассматривались передачи с поступательным и вращательным движениями выходного звена [1]. Из передач с поступательным движением выходного звена рассматривались: шариковинтовая с рециркуляцией шариков, роликовинтовая, шариковинтовая с сепаратором и волновая. Из передач с вращательным движением выходного звена рассматривались: зубчатая цилиндрическая передача с оптимальным передаточным числом в одной паре, планетарная и волновая с телами качения [1,2]. Сравнительный анализ показал, что наименьшим наружным диаметром, КПД и наилучшей компоновкой в заданном объёме обладают из поступательных передач – шариковинтовая с сепаратором, а из вращательных – волновая с телами качения. В качестве промежуточной первой ступени между электродвигателем и выходной ступенью кинематической схемы рассматривалось введение самотормозящей передачи с параллельными осями – цилиндрическая, и со скрещивающимися осями – червячная и спироидная.

В результате прочностных, энергетических и кинематических расчётов выбрана кинематическая схема с вращательным движением выходного звена и самотормозящая цилиндрическая пара, которая позволила согласовать

положение осей электродвигателя и выходного звена волновой передачи с телами качения, и вписаться в заданную форму рулевого отсека БПЛА.

Литература

1. А.Н. Геращенко, В.А. Постников, С.Л. Самсонович, Пневматические, гидравлические и электромеханические приводы ЛА на основе волновых исполнительных механизмов. Учебник, изд-во «МАИ-Принт», Москва, 2010 г.

2. А.В. Левин, С.Л. Самсонович, В.С. Степанов, М.В. Борисов, Н.В. Крылов, Перспективы и проблемы создания электромеханических силовых миниприводов для нового поколения ЛА. Журнал «Авиационная промышленность» №3, 2013 г.

СТРУКТУРНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСНОГО МЕХАНИЗМА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В ОКСИД-ОКСИДНЫХ КЕРАМИКАХ

Бугаев Н.М., Горшков А.А., Ломовской В.А.

(Москва)

Исследование диссипативных потерь в широком температурно-частотном диапазоне внешних деформирующих воздействий сегнетоэлектрических керамик (например, ЦТС – цирконата титаната свинца) показали, что в области температур от -100°C до $+100^{\circ}\text{C}$ фон внутреннего трения остается практически постоянным при изменении и температуры и частоты. Это позволяет предположить, что механизмом диссипативных потерь является гистерезисный механизм, связанный с подвижностью границ доменов при выводе исследуемой системы из состояния механического и термодинамического равновесия. Кроме того, к гистерезисному механизму внутреннего трения может привести взаимодействие доменных стенок с дефектами кристаллической решетки с образованием клинообразных доменов при прохождении границы домена через примесный дефект. В данном интервале температур наблюдается сильная зависимость интенсивности диссипативных потерь от амплитуды внешнего воздействия. Для объяснения этих экспериментальных результатов предложена и теоретически проанализирована описывающая амплитудную зависимость внутреннего трения феноменологическая модель, основанная на гипотезе двух или нескольких стадиях смещения доменных границ в переменных полях механических напряжений. Предполагается, что граница домена зафиксирована в своем равновесном положении различными дефектами структуры керамики. Рассматривается возможность локального и глобального процессов смещения границ доменов в зависимости от амплитуды периодических воздействий на всю структурную систему керамического образца. При математическом описании

данной модели были введены следующие допущения: сила взаимодействия во всех точках границ доменов структурной системы ЦТС считалась постоянной и не учитывалось влияние форм площадок отрыва этих границ. Это позволило качественно достаточно удовлетворительно теоретически описать амплитудную зависимость гистерезисного механизма внутреннего трения в оксид-оксидных керамиках. Следует отметить, что не выяснена роль и влияние на амплитудную зависимость внутреннего трения разновидности дефектов, закрепляющих подвижность границ доменов. При этом подвижность самих дефектов приводит к дополнительным диссипативным потерям, но не гистерезисного, а релаксационного механизма внутреннего трения. Рассмотрены случаи двух разновидностей дефектов структуры ЦТС, которые могут переходить из одной формы в другую при их взаимодействии друг с другом в результате выхода из равновесного состояния.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 14–08–00806-а).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АВИАЦИОННОГО ИЗДЕЛИЯ ПРИ СЛУЧАЙНОЙ ВИБРАЦИИ

Будник Г. Д., Вышедkevич И. У., Макаревский Д. И., Сидоренко А. С.

(Москва)

Представлена методика и результаты полунатурного моделирования динамического состояния конструкции авиационного изделия, транспортируемого на маневренном носителе. Случайное пространственное кинематическое возбуждение передается от носителя на изделие через два узла подвески. Конструкция изделия выполнена в виде несущей составной подкрепленной цилиндрической оболочки, содержащей внутренние массивные агрегаты.

Моделирование проведено в лабораторных условиях на виброиспытательном комплексе. Изделие соединено с вибровозбудителем с помощью специального крепежного приспособления. Кинематическое возбуждение представляется в форме стационарного широкополосного случайного процесса ускорения в узлах подвески изделия. Режим возбуждения устанавливается путем формирования спектральной плотности ускорения с заданным распределением дисперсии по частотному диапазону и поддерживается по сигналам датчиков ускорения, установленных на приспособлении вблизи узлов крепления изделия.

Для регистрации параметров динамического состояния на конструкции установлены датчики ускорения, которые регистрируют составляющие процесса

ускорения в направлении осей X, Y и Z системы координат, связанной с изделием. Две группы датчиков, по три в каждой, установлены вблизи узлов подвески. В средней части изделия (между узлами подвески) установлены датчики, ориентированные в направлении осей Y и Z. Остальные датчики, ориентированные в направлении оси Z распределены по образующей цилиндра в плоскости X0Z.

На первом этапе определяются частотные характеристики изделия с целью определения резонансов в зонах установки датчиков в диапазоне частот возбуждения вибрации. Для определения частотных характеристик используется режим гармонической вибрации с плавным изменением частоты при постоянном уровне ускорения на крепежном приспособлении. [1]. Далее воспроизводится режим стационарной случайной вибрации, суммарная продолжительность которого составляет 10 часов. При этом проводится периодическая регистрация процессов ускорений по показаниям датчиков. Кинематическое возбуждение с заданной спектральной плотностью и номинальным значением суммарной дисперсии $362 \text{ м}^2/\text{с}^4$ реализуется последовательно в направлении осей X и Y [2].

В результате обработки реализаций процессов ускорений с использованием фильтрации в 1/3-октавных полосах частот построены спектральные характеристики процессов и вычислены уровни составляющих вибрационного ускорения a_x , a_y , a_z в направлениях осей X, Y и Z, а также результирующего ускорения $a_{рез}$ в различных точках конструкции изделия [3]. Определены зоны наибольших уровней ускорения. Уровень результирующего ускорения определяется как среднее геометрическое уровней составляющих ускорения при поступательном движении по трем осям. Количественно уровень ускорения определяется среднеквадратическим значением (СКЗ) ускорения, определяемым по реализации процесса определенной продолжительности.

Получено, что при возбуждении колебаний в направлении оси Y возникают существенные составляющие колебаний в направлении осей X и Z. При этом наибольший уровень ускорения наблюдается вблизи переднего по полету узла подвески. Соответствующие СКЗ составляющей ускорения $a_y = 37\text{-}50 \text{ м}/\text{с}^2$ и результирующего ускорения $a_{рез} = 37,7\text{-}50,8 \text{ м}/\text{с}^2$. При возбуждении колебаний в направлении оси X изделия возникают существенные составляющие колебаний в направлении осей Y и Z. При этом наибольший уровень ускорения наблюдается в средней зоне конструкции между узлами подвески. Соответствующее СКЗ составляющих ускорения $a_x \approx 17 \text{ м}/\text{с}^2$, $a_y \approx 24 \text{ м}/\text{с}^2$ и результирующего ускорения $a_{рез} \approx 30,6 \text{ м}/\text{с}^2$.

Сопоставление результатов измерений уровней ускорений на различных этапах нагружения показал их заметное изменение, что вызвано изменением

динамических характеристик конструкции при достаточно продолжительном действии вибрации.

Проведенные исследования показывают работоспособность представленной методики полунатурного моделирования транспортирования авиационного изделия на носителе. Физическая корректность экспериментальных данных подтверждается использованием аттестованных испытательного оборудования, а также средств измерения и анализа.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-08-01243).

Литература

1. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Определение динамических характеристик конструкции. ГОСТ 30630.1.1-99. - М.: Изд-во стандартов, 2000. – 19 с.

2. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие вибрации. ГОСТ 30630.1.2-99. - М.: Изд-во стандартов, 2000. - 23 с.

3. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. - М.: Мир, 1974. 464 с.

О ПРОБЛЕМЕ ВОЗДУШНОГО ДЕСАНТИРОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ МОНОГРУЗОВ МАССОЙ ДО 50 ТОНН

Бухтояров И.И., Зорин В.А., Морозов А.А., Пономарев А.Т.

(Москва, Дубна)

Воздушному десантированию грузов с использованием современных военно-транспортных самолетов (ВТС) типа Ил-76 отводится ведущая роль как при проведении воздушно-десантных операций Вооруженных Сил, так и мероприятий по ликвидации последствий стихийных бедствий и катастроф в отдаленных, труднодоступных районах, а также на акваториях мирового океана. С расширением масштабов этих задач растут масса и габаритные размеры десантируемых объектов (ДО). Сегодня эти параметры достигли значений, сопоставимых с максимальной десантной нагрузкой ВТС и габаритными размерами их грузовых кабин.

Продолжает осуществляться разработка более тяжелых образцов боевой и специальной техники (БСТ) с использованием конструкционных баз легких, средних танков боевой массой до 50 т и другой техники сухопутных войск, не оснащенной механизмом изменения клиренса. Кроме того, в последние десятилетия развития парашютно-десантной техники (ПДТ) стало неотъемлемым

требование по обеспечению возможности десантирования экипажей и боевых расчетов, размещаемых внутри образцов БСТ, что еще в большей степени повышает требования по надежности функционирования авиационно-десантных комплексов [1]. Все это говорит о необходимости внесения кардинальных изменений в концепцию развития не только новых образцов ПДТ, но и систем обеспечения заданного уровня характеристик устойчивости и управляемости ВТС при воздушном десантировании, а также десантно-транспортного оборудования самолетов. Изысканию возможных подходов к решению данной проблемы и посвящен доклад.

В настоящее время для воздушного десантирования БСТ и других грузов наиболее широкое распространение получили бесплатформенные парашютные средства десантирования (БПСД) и парашютно-реактивные системы (ПРС). При этом в составе БПСД применяются многокупольные парашютные системы (МКС), разработанные на базе унифицированного блока основного парашюта (ОП) с площадью купола 350 м². Что касается ПРС, то их серийные образцы ПРСМ-915 и ПРСМ-925 используют однокупольную парашютной систему (ПС) ОКС-540 серии 4 с площадью купола 540 м² и тормозную двигательную установку (ТДУ), представляющую собой блок ракетных двигателей твердого топлива. По результатам анализа многолетнего опыта войсковой эксплуатации ПРСМ-915 и ПРСМ-925 констатируется, что аэродинамические характеристики, наполняемость ПС ОКС-540 серии 4, энергетические характеристики и массовая отдача конструкции ТДУ вышеназванных ПРС перестали отвечать современным требованиям уже со второй половины 80-х годов прошлого столетия.

На основе анализа результатов летных исследований и испытаний БПСД и ПРС [2, 3] в докладе делаются следующие выводы:

1) Для десантирования образцов БСТ массой до 15 т целесообразно использовать БПСД типа ПБС-950 с количеством ОП, не превышающим 11 – 12 парашютов;

2) Для десантирования образцов БСТ массой от 15 до 25 т следует рассматривать ПРС с ТДУ, разработанной на базе ракетных двигателей, работающих на высокоэнергетическом пастообразном ракетном топливе (ПРТ), и МКС типа МКС-350-12 (МКС-760Ф), оснащенные специальными устройствами для повышения равномерности нагружения и улучшения характеристик наполняемости ОП;

3) Для десантирования образцов БСТ и специальных тяжелых крупногабаритных моногрузов (СТКМ) массой от 25 до 50 т целесообразно разработать низковысотную ПРС (геометрическая высота применения 150 – 200 м), включающую в свой состав:

– МКС-175-12, состоящую из 12 – 15 ОП с площадью купола 175 м² и оснащенную системой ускоренного равномерного наполнения ОП;
– многоступенчатую ТДУ с ракетными двигателями, работающими на высокоэнергетическом ПРТ;
– высокоэнергоемкую тканевую амортизирующую систему с ускоренным темпом наполнения от газогенератора;

4) Исходя из потенциальных возможностей ВТС типа Ил-76 по прочности, устойчивости и управляемости, воздушное десантирование СТКМ массой от 25 до 35 т из этого ЛА следует производить на режиме пологого набора высоты с продольной перегрузкой 0,2 – 0,3 ед., а моногрузов массой от 35 до 50 т – при полете самолета на высоте не менее 7000 – 8000 м по параболе «квазиневесомости» (на режиме «пониженной» невесомости).

В докладе приводятся принципиальные схемы повышения надежности крепления СТКМ в грузовой кабине ВТС и иллюстрируются различные варианты выхода из аварийных ситуаций, возникающих при извлечении ДО из самолета.

Литература

1. *Шибанов Г.П.* Эксплуатация и безопасность парашютных систем. – М.: Машиностроение, 2005. – 288 с.

2. *Бухтояров И.И., Зорин В.А., Морозов А.А., Пономарев А.Т.* Результаты исследования возможностей повышения безопасности воздушного десантирования тяжелых крупногабаритных моногрузов // Тезисы докладов 12-й Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2013», Москва, МАИ, 12 – 15 ноября 2013. – С. 30 – 31.

3. *Бухтояров И.И., Морозов В.И., Пономарев А.Т.* Анализ особенностей функционирования грузовых парашютных систем по результатам летно-экспериментальных исследований. Материалы XIX международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» имени А.Г. Горшкова, Ярополец, 18 – 22 февраля 2013 г., том 2, с. 66 – 82.

СТЕНД ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОУПРУГОГО ПОВЕДЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Быков А.В., Кондрашев Г.В., Парафесь С.Г., Туркин И.К.

(Москва)

На кафедре 602 «Авиационно-ракетные системы» Московского авиационного института (национального исследовательского университета) в настоящее время создан

стенд электромеханического моделирования аэродинамических сил для исследования аэроупругого поведения беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Стенд включает:

- средства возбуждения и измерения колебаний – вибровозбудители электродинамического типа в комплекте с усилителями мощности фирмы TMS, США (8 шт.), акселерометры (24 шт.) и импедансные головки (8 шт.) фирмы PCB Piezotronics;

- управляющий программно-аппаратный комплекс в составе персонального компьютера, измерительно-управляющей системы реального времени CompactRIO (National Instruments, США) и стандартного программного обеспечения National Instruments;

- специально изготовленные порталы для упругой подвески БЛА и силовые плиты для закрепления его отсеков при проведении испытаний.

Рабочим коллективом кафедры разработано программное обеспечение для системы CompactRIO (в среде LabVIEW) для управления испытаниями, реализующее режимы гармонического возбуждения испытываемой конструкции в заданном диапазоне частот, измерение и обработку сигналов датчиков, вычисление в реальном времени аэродинамических воздействий.

Это позволило проводить комплексные экспериментальные исследования аэроупругой устойчивости БЛА, включая:

- определение частотных характеристик упругой конструкции БЛА;
- исследование флаттера БЛА;
- определение характеристик системы «руль–привод» (амплитудных и частотных характеристик, запасов устойчивости, динамической жесткости);
- определение частотных характеристик системы «упругий БЛА – САУ»;
- исследование характера возможных автоколебаний (частоты, предельные циклы, уровень вибрационных перегрузок) и др.,

а также расчетно-экспериментальное определение запасов устойчивости контура «упругий БЛА – САУ».

Основными отличительными особенностями метода электромеханического моделирования является возможность:

- проведения испытаний по исследованию аэроупругой устойчивости натуральных систем с присущими им нелинейностями;
- реализации на стенде режимов по плотности воздуха и числу Маха в широких пределах, использования различных аэродинамических теорий для моделирования аэродинамических воздействий;
- проведения неразрушающих и полностью наблюдаемых в частотной и временной области испытаний;
- обеспечения повторяемости эксперимента – «полетные условия» можно воспроизводить многократно.

Общие характеристики стенда:

масса испытываемого БЛА	– 50 ... 300 кг;
длина испытываемого БЛА	– 1 ... 4 м;
амплитуда сил возбуждения	– 0 ... 330 Н;
амплитуда измеряемых ускорений	– 0 ... 50 g;
амплитуда измеряемых сигналов САУ	– 0 ... 10 В.

Резонансные испытания:

частотный диапазон	– 5 ... 500 Гц;
число точек возбуждения	– до 6;
число точек измерения	– до 24.

Испытания с электромеханическим моделированием аэродинамических сил:

частотный диапазон	– 20 ... 300 Гц;
число точек возбуждения	– до 4;
число точек измерения	– до 16;
диапазон чисел Маха	– 0 ... 5;
диапазон высот	– 0 ... 30 км;
диапазон скоростных напоров	– 0 ... 10 ⁶ Па.

В настоящее время кафедра 602 с использованием стенда электромеханического моделирования аэродинамических сил выполняет научно-исследовательские работы (НИР) по исследованию устойчивости системы «руль-привод» в составе реальных образцов рулевых отсеков БЛА класса «поверхность–воздух» в условиях, максимально приближенных к полетным. Задачами НИР являются:

- экспериментальное определение характеристик собственных колебаний рулей;
- экспериментальное определение характеристик системы «руль–привод» (амплитудных и частотных характеристик, запасов устойчивости, динамической жесткости);
- теоретическое и экспериментальное (с применением стенда электромеханического моделирования) исследование устойчивости системы «руль-привод».

ТОЧНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЯХ БЕСКОНЕЧНОЙ УПРУГОЙ КЛИНОВИДНОЙ ПЛИТЫ

Вайсфельд Н.Д., Кебли Белкасем, Реут В.В.

(Одесса, Алжир)

Предполагается, что упругая бесконечная клиновидная плита (модуль сдвига G , коэффициент Пуассона μ)

$$0 \leq r \leq \infty, \quad 0 \leq \varphi \leq \omega, \quad 0 \leq z \leq h, \quad (1)$$

одной гранью опирается на абсолютно жесткое гладкое основание

$$u_z(r, \varphi, 0, t) = 0, \quad \tau_{zr}(r, \varphi, 0, t) = 0, \quad \tau_{z\varphi}(r, \varphi, 0, t) = 0. \quad (2)$$

По другой грани плита подвергается воздействию динамической колебательной нагрузки

$$\sigma_z(r, \varphi, h, t) = -p(r, \varphi) \cos \tilde{\omega} t, \quad \tau_{zr}(r, \varphi, h, t) = 0, \quad \tau_{z\varphi}(r, \varphi, h, t) = 0. \quad (3)$$

На боковых гранях $a \leq r < \infty$, $-\pi \leq \varphi < \pi$, $0 \leq z \leq h$ считаются выполненными условия скользящей заделки

$$u_\varphi(r, \varphi, z, t) \Big|_{\varphi=0, \omega} = 0, \quad \tau_{\varphi r}(r, \varphi, z, t) \Big|_{\varphi=0, \omega} = 0, \quad \tau_{\varphi z}(r, \varphi, z, t) \Big|_{\varphi=0, \omega} = 0. \quad (4)$$

Требуется найти волновое поле клиновидной плиты, удовлетворяющее условиям (1-3).

С помощью подходящих интегральных преобразований по переменным φ и r сформулированная краевая задача сведена к векторной одномерной краевой задаче, для которой строится точное решение. Для его построения привлекается аппарат матричных дифференциальных уравнений второго порядка.

С целью установить возможность отрыва нижнего основания, проведено сравнение полученных значений напряжений на нижней грани плиты с напряжениями, возникающими при аналогичной постановке статической задачи для клиновидной плиты с учетом собственного веса.

Работа выполнена при финансовой поддержке МОН Украины (проект 0112U001748).

Литература

1. Попов Г.Я., Кебли Б. Точное решение смешанной краевой задачи теории упругости для бесконечной клиновидной плиты // Мат. методы та фіз.-мех. поля. - 2011. - Т. 54. - № 4 - С. 28-31.
2. Попов Г.Я. Я., Абдымананов С.А., Ефимов В.В. Функции и матрицы Грина одномерных краевых задач. – Алматы.: Изд-во Руан, 1999. – 113 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕТОНА И ПОДОБНЫХ ЕМУ МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ ЗАМЕДЛЕНИЯ НЕДЕФОРМИРУЕМОГО УДАРНИКА ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ В БЕТОННОЙ МИШЕНИ

Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Сотский М.Ю., Сотский Ю.М.

(Москва)

Представлены экспериментальные данные о замедлении недеформируемого и малодеформируемого ударника в бетонной среде, регистрируемые в опытах при отличающихся начальных условиях

высокоскоростного удара по среде-мишени. Для исследуемой среды получены исходные данные о замедлении измерительного ударника при его движении в среде после удара в заданном скоростном диапазоне. Истории замедления ударников в бетонной среде отражают сложный характер динамического деформирования и разрушения среды, зависимость ее прочностных свойств от вида напряженного состояния и скорости деформирования [1].

Рассмотрены варианты и алгоритмы использования данных об истории замедления ударников в средах для определения динамических механических свойств исследуемых сред из результатов опытов, полученных при высокоскоростном ударе недеформируемых и малодеформируемых измерительных ударников по среде-мишени.

Приведены примеры анализа экспериментальных данных и показателей динамических свойств бетонных сред. Показаны особенности регистрируемых историй замедления ударников в бетонной среде, представляющей собой образец материалов и пород со значительно отличающимся сопротивлением нагрузкам сжатия и растяжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 13-08-00274-а).

Литература

1. *Пирогов С.А.* Модель динамического деформирования и разрушения разнородных материалов при интенсивных динамических нагрузках // Проблемы прочности и пластичности. 2012. Вып. 74. С. 40-48.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД И БЕТОННЫХ СРЕД НА ОСНОВЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ ДВИЖЕНИЯ УДАРНИКА

Велданов В.А., Сотский М.Ю., Максимов М.А., Даурских А.Ю., Дудик Д.Е.

(Москва)

Для определения динамических характеристик горных пород и бетона могут использоваться экспериментальные методы фиксации характеристик движения ударников в преграде (положения, скорости и ускорения торможения – замедления) с последующей обработкой результатов проникания. Среди экспериментальных методов, помимо использующих информацию об истории замедления в преграде с помощью электрических акселерометров, нашли применение и оптические методы, позволяющие фиксировать характеристики движения ударников в преграде в виде функций от времени, начиная с момента касания и до этапа его движения после пробития преграды. При этом могут использоваться результаты высокоскоростной оптической регистрации, как в

виде классической теневой съемки, так и полученные с помощью установки физического моделирования, основанный на применении прозрачного экрана из бронестекла, вдоль которого движется ударник. Как уже отмечалось [1], такая установка позволяет проводить кинорегистрацию процесса движения ударника внутри преграды в виде функции от времени, а также фиксировать характер деформирования бетонной преграды, образование лицевого и тыльного отколов и их влияние на характер движения ударника в преграде.

Экспериментальные данные о характеристиках движения обрабатываются с помощью экспериментально-теоретической методики [2] описания движения твердых тел в сопротивляющейся среде. Входной информацией при обработке экспериментальных данных является информация о плотности материала среды и коэффициенте поверхностного трения среды об ударник. В результате обработки получают прочностные характеристики материала среды при высокоскоростном деформировании в процессе проникания. Скорость деформации среды определяется по результатам экспериментов в виде функции от текущей скорости проникания, которая находится путем дифференцирования зависимости глубины проникания от времени, получаемой путем аппроксимации методом наименьших квадратов экспериментальных данных оптической регистрации.

При получении прочностных характеристик используются эмпирические зависимости, учитывающие уменьшение прочностного сопротивления среды в лицевых и тыльных слоях из-за наличия в них откольных явлений.

Найденные значения динамических характеристик используются при расчетах процессов проникания в численных методиках.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 13-08-00274-а).

Литература

1. Велданов В.А., Исаев А.Л., Маринчев Д.В. и др. Программа расчета на ПЭВМ параметров процесса взаимодействия ударника с преградой. Численные методы решения задач теории и пластичности // Материалы XXII Всесоюзной конф. ИТПМ СО АН СССР. Новосибирск, 1992. С. 65-72
2. Бабич В.П., Велданов В.А. Даурских А.Ю. и др. Высокоскоростное проникание ударников в бетон // Материалы XIX Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.1. – М.: ООО «ГР-принт», 2013. С. 21-23.

ДИНАМИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СЭНДВИЧ-ОБОЛОЧКИ ПРИ УЧЕТЕ ДЕМПИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ СЛОЕВ

Воробьев С.А.

(Гомель)

Представлена постановка задачи о динамическом нагружении круговой цилиндрической оболочки, выполненной из изотропных материалов в виде трехслойного пакета. Пакет несимметричен по высоте относительно срединной поверхности жесткого несжимаемого в поперечном направлении заполнителя. На первом этапе постановки задачи материалы слоев считаются линейно упругими. Применяв вариационный принцип Гамильтона-Остроградского, используя кинематические гипотезы С. П. Тимошенко для каждого слоя и условия непрерывности перемещений на границах контакта слоев, получены уравнения движения оболочки в перемещениях для малых деформаций.

Демпирующие свойства материалов слоев трехслойной оболочки учитываются на основе концепции комплексного модуля упругости $E_k^* = E_k(a_k + i \cdot b_k)$, $G_k^* = G_k(a_k + i \cdot b_k)$, где E_k , G_k – модули упругости материала, $a_k = (4 - \gamma_k^2) / (4 + \gamma_k^2)$, $b_k = 4\gamma_k^2 / (4 + \gamma_k^2)$, γ_k – коэффициент внутреннего трения материала k -го слоя ($k=1,2,3$), i – мнимая единица. Уравнения движения оболочки в этом случае получаются заменой в уравнениях идеально упругой конструкции модулей упругости E_k , G_k на соответствующие операторы E_k^* , G_k^* :

$$[M]\{\ddot{U}\} + [\tilde{L}]\{U\} = \{F\},$$

где $[M]$ – матрица масс; $\{U\}^T = \{u, v, w, \psi_1^{(k)}, \psi_2^{(k)}\}$ – искомая вектор-функция перемещений; $u(x_1, x_2, t)$, $v(x_1, x_2, t)$ – тангенциальные перемещения точек срединной поверхности заполнителя в направлении координатных осей (линий главных кривизн оболочки) x_1 и x_2 соответственно; $w(x_1, x_2, t)$ – прогиб; $\psi_1^{(k)}(x_1, x_2, t)$ и $\psi_2^{(k)}(x_1, x_2, t)$ – полные углы поворота прямолинейного элемента k -го слоя в координатных плоскостях x_1Oz и x_2Oz ; $[\tilde{L}] = [\tilde{L}_{ij}]$ ($i, j = 1, \dots, 9$) – матрица, элементами которой являются линейные дифференциальные операторы по переменным x_1 и x_2 с постоянными комплексными коэффициентами; $\{F\}$ – вектор нагрузок.

Рассмотрены следующие модельные задачи: воздействие ударного импульса $q_n(x_1, x_2, t) = \delta(t)\delta(x_1 - x_{1p})\delta(x_2 - x_{2p})$; воздействие сосредоточенной

силы $F_0 \exp(-i\phi t^2 / 2) \delta(x_1 - x_{1p}) \delta(x_2 - x_{2p})$ на верхний несущий слой прямоугольной в плане сэндвич-панели; стационарные вынужденные колебания оболочки от вибрационной нагрузки $q_n(x_1, x_2, t) = \delta(x_1 - x_{1p}) \delta(x_2 - x_{2p}) e^{i\phi t}$. Здесь F_0 – амплитуда возмущающей силы, ϕ – скорость изменения частоты, $\delta(x)$ – дельта-функция, x_{1p} и x_{2p} – координаты точки воздействия нагрузки. Решение сформулированных начально-краевых задач построено на основе методов Фурье и преобразования Лапласа по времени. Стационарные вынужденные колебания исследовались на основе метода комплексных амплитуд. Специальный выбор координатных функций у компонентов вектора перемещений $\{U\}$ обеспечивает автоматическое удовлетворение граничных условий свободного опирания кромок на жесткие неподвижные опоры.

В качестве материала несущих слоев принимался алюминиевый сплав, а для заполнителя – полимер. Сделана оценка влияния демпфирующих свойств материалов слоев на кинематические параметры колебаний панели.

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ФИЗИЧЕСКИ ОРТОТРОПНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ДЕЙСТВИИ ПРОДОЛЬНЫХ НАГРУЗОК С РАЗЛИЧНОЙ ИЗМЕНЯЕМОСТЬЮ.

Ву Ба Зуи

(Москва)

При действии произвольно распределенной по поверхности продольной нагрузки получены дифференциальные уравнения восьмого порядка в частных производных общей теории для физически ортотропных оболочек, наиболее часто встречающихся среди анизотропных тонкостенных конструкций [1,2]. Из достаточно большого разнообразия исходных соотношений теории оболочек избран вариант В.З.Власова [3], как наиболее последовательный с точки зрения соблюдения принципов энергостатики. Таким образом, обобщена на случай физически ортотропных оболочек общая теория изотропных оболочек В.З.Власова - а именно, выведены новые дифференциальные уравнения.

Поскольку интегрирование уравнений общей теории физически ортотропных оболочек в частных производных восьмого порядка, представляет известные трудности, проведено их упрощение на основе сравнения изменяемости напряженного состояния в продольном и окружном направлениях (критерий В.В.Новожилова). В результате, получены новые дифференциальные уравнения: «типа пологих оболочек», переходящие в частном случае изотропного материала в соответствующие уравнения Власова-Доннелла; «типа полубезмоментной теории», переходящие в частном случае изотропного

материала в широко известные уравнения Власова, а также уравнения для тангенциального напряженно-деформированного состояния с очень высокой изменяемостью – аналог плоской задачи анизотропной теории упругости.

На основе полученных уравнений рассматриваются краевые задачи о действии на замкнутые оболочки продольных локальных нагрузок. В случае уравнений полубезмоментной теории и тангенциального напряженного состояния, в результате взятия несобственных интегралов, получены простые аналитические решения или формулы для важных искомым факторов.

Литература

1. *Образцов И.Ф., Нерубайло Б.В., Андрианов И.В.* Асимптотические методы в строительной механике тонкостенных конструкций. - М.: Машиностроение, 1991.- 416 с

2. *Нерубайло Б.В., Ву Ба Зуи.* Дифференциальные уравнения физически ортотропных и изотропных цилиндрических оболочек при действии продольных нагрузок. Вестник МАИ, №3. 2013

3. *Власов В.З.* Общая теория оболочек и ее приложения в технике. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 528 с.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ РАСЧЕТ ИЗОТРОПНЫХ, ОРТОТРОПНЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК

Габитова А.Р., Шамим М.Р.

(Казань)

При построении физических моделей многослойных ортотропных оболочек, вводятся всевозможные подходы, основанные как на различных гипотезах для каждого слоя оболочки [1-3], так и на единых гипотезах для всех слоев тонкостенной конструкции [2,4-6]. В первом случае порядок разрешающей системы зависит от количества слоев. Во втором случае порядок системы не зависит от числа слоев, что открывает, в частности возможности, для эффективного применения МКЭ в расчетах ортотропных многослойных оболочек. Часто ортотропные многослойные конечные элементы (КЭ) получают на основе трехмерного изотропного восьмиузлового КЭ оболочки [7], полученного при дискретизации трехмерных уравнений теории упругости в криволинейной системе координат и использовании некоторых оболочечных гипотез. Применение подобных подходов к расчету оболочек средней толщины посвящены работы [8-9], введение ортотропности и многослойности в расчетную схему оболочек описано в публикациях [9-10]. Обычно в подобных элементах узлы располагаются на срединной поверхности и в качестве степеней свободы кроме проекций вектора перемещений используют и углы поворота

нормального волокна. Обычно эти элементы демонстрируют хорошую точность и достаточно эффективны в расчетах оболочек малой и средней толщины. Поэтому получили распространение специальные элементы оболочек, которые имеют в качестве узловых степеней свободы перемещения узлов, расположенных на лицевых поверхностях.

В предлагаемом конечном элементе вводятся изопараметрические аппроксимации геометрии и неизвестные компоненты перемещений. Узловые точки располагаются в вершинах элемента, в локальных координатах представляющего собой куб. По толщине используется линейная аппроксимация, что эквивалентно введению кинематической гипотезы о линейном распределении перемещений по толщине с учетом обжатия оболочки. Вариация потенциальной энергии деформации (работа внутренних напряжений на возможных деформациях) вычисляется численно по квадратурной формуле Гаусса-Лежандра (два узла по каждому координатному направлению). В каждом квадратурном узле вводится статическая гипотеза, обычно используемая для оболочек средней толщины, об отсутствии влияния поперечного напряжения на мембранные, изгибные и деформации поперечного сдвига. Фактически задача поперечного обжатия отделяется от классической задачи теории оболочек с учетом поперечного сдвига. Главный источник ошибок, возникающих при использовании подобных КЭ (особенно для лагранжевой аппроксимации перемещений и геометрии в плане КЭ), которые делают их практически непригодными, - появление «ложных» деформаций поперечного сдвига. Для устранения этого недостатка предполагается использование метода двойной аппроксимации по точкам суперсходимости.

В настоящей работе вводятся аппроксимации радиус-вектора, ковариантных и контравариантных базисных векторов, метрических тензоров, перемещений, тензоров деформаций и напряжений. Технология использования метода двойной аппроксимации по точкам суперсходимости и методика «понижения порядка аппроксимаций» деформаций поперечного сдвига в трехмерной постановке подробно описаны в [7]. Гипотеза малости напряжений обжатия описана в приближенном виде, «упрощенный закон Гука», связывающий напряжение обжатия с деформацией обжатия, не используется. Определяется матрица упругих констант для ортотропного материала. Упругие характеристики и угол намотки могут быть в общем случае различны для каждого слоя конечного элемента. Описаны соотношения сборки матрицы жесткости для многослойного ортотропного КЭ. Решено несколько тестовых задач, на которых апробируется работоспособность предложенного КЭ и проходит верификация с решениями других авторов. Результаты показывают приемлемость применения данной методики для определения НДС тонкостенных конструкций. Для иллюстрации приведены результаты статического расчета стабилизатора легкомоторного самолета, состоящего из многослойных оболочек.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 12-01-00955, № 12-01-97026, № 12-01-31212, № 13-97057, № 13-01-97058.

Литература

1. *Болотин В.В., Новичков Ю.Н.* Механика многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 1980. – 375с.
2. *Григолюк Э.И., Куликов Г.М.* Многослойные армированные оболочки. Расчет пневматических шин. – М.: Машиностроение, 1988. – 288с.
3. *Соловьев С.С.* Конечно-элементная модель многослойной оболочки с анизотропными слоями переменной толщины. // Известия Вузов. Авиационная техника. – 1989, №4, С. 71-75.
4. *Алфутов Н.А., Зиновьев П.А., Попов Б.Г.* Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 264с.
5. *Васильев В.В.* Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 270с.
6. *Григоренко Я.М., Василенко А.Т., Голуб Г.П.* Статика анизотропных оболочек с конечной сдвиговой жесткостью. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 216с.
7. *Голованов А.И., Сагдатуллин М.К.* Трехмерный конечный элемент для расчета тонкостенных конструкций // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия физ.-мат. наук. – Казань, 2009. – Т.151, кн.3, С.121-129.
8. *Бережной Д.В., Сагдатуллин М.К., Голованов А.И.* Многослойный ортотропный конечный элемент оболочек средней толщины. // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. –№3 (57). Выпуск 1. – С. 9-19.
9. *Голованов А.И., Бережной Д.В.* Метод конечных элементов в механике деформируемых твердых тел. – Казань: Издательство «ДАС», 2001. –301с.
10. *Попов Б.Г.* Расчет многослойных конструкций вариационно-матричными методами: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ, 1993. – 294с.

ПРОСТЕЙШАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СТЕРЖНЯ, ВЫПОЛЕННОГО ИЗ СПЛАВА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Гаврюшин С.С., Ганьши С.М.

(Москва)

Расчеты большинства применяемых в современных конструкциях упругих элементов из сплавов с эффектом памяти формы, так или иначе, могут быть

сведены к расчету стержневых моделей. Соответственно остро встает вопрос о математических моделях стержней из сплава с эффектом памяти формы.

Для построения модели стержня из сплава с эффектом памяти формы необходимо выбрать модель материала, выбрать модель стержня, а также разработать методику интегрирования уравнений, описывающих модель материала в модель, описывающую поведение пространственного стержня. Математическая модель сплава с эффектом памяти формы строится на основе уравнений Ауриччио, представленных в работе [1]. Система уравнений в операторной форме имеет вид:

$$\{\dot{\xi}_S, \dot{\xi}_M\}^T = F(\xi_S, \xi_M, \sigma, \dot{\sigma}, \tau, \dot{\tau}, T, \dot{T}, H_i, D_{const}), \quad (1)$$

где σ – нормальные напряжения, τ – касательные напряжения, T – температура, ξ_S – объемная доля ориентированного мартенсита, ξ_M – объемная доля неориентированного мартенсита, H_i – функции-переключатели, отвечающие за активацию процессов фазовых переходов, D_{const} – постоянные параметры диаграммы фазовых переходов сплава с эффектом памяти формы.

С помощью соотношений (1) определяется величина ξ_S . В предположении об аддитивном разложении деформации на упругую и не упругую, физические соотношения принимают вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{полн} &= \varepsilon_{упр} + \varepsilon_L \cdot \xi_S, \\ \gamma_{полн} &= \gamma_{упр} + \gamma_L \cdot \xi_S, \end{aligned} \quad (2)$$

где ε_L, γ_L – соответственно максимальные линейная и угловая деформации, возникающие в результате ориентации мартенсита в соответствующем направлении.

В качестве уравнений, описывающих поведение пространственного стержня, взята система дифференциальных уравнений, представленная в работе [2]. В операторной форме система имеет вид:

$$\{\{X\}, \{\vartheta\}, \{M\}, \{Q\}\}^T = F(\{X\}, \{\vartheta\}, \{M\}, \{Q\}, \kappa, \kappa_i^0, \varepsilon_0). \quad (3)$$

Дифференциальные уравнения дополняются алгебраическими уравнениями для кривизн и деформации осевой линии стержня.

$$\begin{aligned} \varepsilon_0 &= \alpha \cdot \Delta t + B_0^{-1} \cdot (N + N^{sma}), \\ \kappa_1 &= B_1^{-1} \cdot (M_z + M_{сп}^{sma}) + (1 - \varepsilon) \cdot \kappa_1^0, \\ \kappa_2 &= B_2^{-1} \cdot (M_x + M_{ис2}^{sma} \cdot \sin(\omega)) + (1 - \varepsilon) \cdot \kappa_2^0, \\ \kappa_3 &= B_3^{-1} \cdot (M_y + M_{ис3}^{sma} \cdot \cos(\omega)) + (1 - \varepsilon) \cdot \kappa_3^0. \end{aligned} \quad (4)$$

В выражении (4) присутствуют дополнительные внутренние силовые

факторы, которые являются результатами действия эффекта памяти формы по сечению. Для случая круглого поперечного сечения стержня были получены следующие выражения дополнительных внутренних силовых факторов.

$$M_{кр}^{sma} = 2\pi \cdot G + \gamma_L \cdot \int_0^R \xi_s(r) \cdot r^2 dr,$$

$$M_{изг}^{sma} = E \cdot \varepsilon_L \cdot \int_A \xi_s(y) \cdot y dA,$$

$$N^{sma} = E \cdot \varepsilon_L \cdot \int_A \xi_s(y) dA.$$
(5)

Литература

1. *F. Auricchio*. Shape Memory Alloys: applications, micromechanics, macro modelling and numerical simulations. Berkeley, California, 1995, 163 с.
2. *Гаврюшин С.С.* Анализ и синтез тонкостенных элементов робототехнических устройств с предписанным законом деформирования / Гаврюшин С. С. // Известия ВУЗов. Сер. "Машиностроение". - 2011. - № 12. - С. 12-19.

РАСЧЕТ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ЖРД НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПОДКОНСТРУКЦИЙ

Гаврюшин С.С., Короткая О.В.,

(Москва)

Для успешной конкуренции на рынке космических услуг актуальной задачей является задача модернизации и создания новых разгонных блоков. Важными элементами, определяющими работоспособность всей конструкции блока в целом, является камера сгорания и сопловая часть ЖРД, анализ прочностных характеристик которых необходимо проводить с целью модернизации ЖРД.

Особенностью рассматриваемого ЖРД является камера сгорания, полностью охлаждаемая жидким кислородом. Использование такой схемы охлаждения является уникальным в мировой практике. В конце 70-х – 80-х годов в NASA занимались ракетными двигателями с системой кислородного охлаждения. Были проведены стендовые испытания и исследования возможности применения такой системы. Но американские конструкторы так и не смогли тогда найти оптимальное техническое решение, выдерживающее возникающие в камере сгорания высокие напряжения. Из-за этого, несмотря на, в целом, положительные результаты испытаний, было принято решение отказаться от данной системы охлаждения. По сообщениям в открытых научно-технических изданиях сегодня некоторые зарубежные инженеринговые

компании пытаются осуществить подобную идею в ЖРД. Но конструктивное решение кислородного охлаждения камеры сгорания ракетного двигателя, обеспечивающее надежную работу и заданные параметры, – одно из главных препятствий на пути к завершению подобных проектов – пока не найдено.

До сих пор, как правило, оценку прочности ЖРД проводят посредством стендовых испытаний, хотя программные комплексы, реализующие метод конечных элементов, существуют довольно давно. Использование конечноэлементного комплекса позволит провести оптимизацию конструкции ЖРД без многочисленных испытаний и лишних затрат средств. Однако реализация метода конечных элементов напрямую приводит к созданию громоздких конечноэлементных моделей, в связи с чем возникает необходимость в разработке методики анализа задач с высокой размерностью. Для этой цели был использован метод подконструкций и циклическая симметрия.

Задача решалась в два этапа. На первом этапе анализировалась конструкция в целом по упрощенной схеме осесимметричной оболочки. На втором - по трехмерной схеме рассчитывалась две подконструкции, выбранные таким образом, чтобы они содержали критические области конструкции. В качестве граничных условий использовались узловые перемещения, найденные по осесимметричной модели.

Особенность конструкции - наличие спиральных каналов в стенке изделия, по которым протекает охладитель, что не позволяет рассматривать конструкцию как осесимметричную. Поэтому использовалась замена реальной конструкции на конструктивно-анизотропную сплошную модель. Коэффициенты анизотропии рассчитывались из условия эквивалентной жесткости оболочки на растяжение – сжатие и изгиб.

В предположении о несвязности стационарной задача теплопроводности и теплопрочностной задачи, решение проводилось последовательно. В результате решения задачи теплопроводности получено распределение температур по всей конструкции, которое далее использовалось при решении прочностной задачи. Результат расчета напряженно-деформированного состояния по осесимметричной модели - перемещения в конструкции, которые использованы при решении трехмерных задач анализа двух подконструкций.

На этапе расчета подконструкций использовалось условие циклической симметрии, что позволило создать трехмерные модели (секторы), отражающие реальную геометрию изделия. Для подконструкций также решались две задачи: стационарная задача теплопроводности и расчет напряженно-деформированного состояния. В итоге получено распределение перемещений, пластических деформаций и напряжений.

Предложенная методика использования метода подконструкций при расчете ЖРД методом конечных элементов позволяет существенно снизить затраты на проектирование новых ЖРД.

Литература

1. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975.-541с.
2. *Еременко С.Ю.* Методы конечных элементов в механике деформируемых тел.– Х.: Основа, 1991.- 272с.
3. *Шабров Н.Н.* Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. – Л.: Машиностроение, 1983.- 212с.
4. *Феодосьев В.И.* Прочность камеры жидкостного ракетного двигателя. – М.: Оборонгиз, 1957. – 212 с.
5. *Феодосьев В.И.* Основы техники ракетного полета. – М.: Наука, 1979. – 496 с.
6. *Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф.* Численные методы в динамике и прочности машин. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. –492 с.
7. *George P. Sutton, Oscar Biblarz* Rocket Propulsion Elements. - New York: John Wiley & Sons, 2001. – 751с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРИВАРКИ ПАТРУБКА НА ДЕЙСТВУЮЩЕМ МАГИСТРАЛЬНОМ ТРУБОПРОВОДЕ

Гаврюшин С.С., Нуждин А.С.

(Москва)

В настоящее время широкое применение получила технология работ по врезке под давлением отводов, перемычек, соединительных деталей трубопроводов без прекращения транспорта газа и перекрытия полости трубы с применением специальной технологии сварки и врезки под давлением. Врезка под давлением обеспечивает выполнение работ на газопроводах из стальных электросварных прямошовных и спиральношовных труб из малоуглеродистых и низколегированных трубных сталей, находящихся в эксплуатации и транспортирующих природный газ, с целью минимизации послесварочных дефектов материала в околошовной зоне сварного соединения.

Численно моделируется процесс сварки кольцевых нахлесточных швов разрезных тройников обратноступенчатым способом. Процесс приварки патрубка включает в себя два основных этапа: предварительный подогрев и непосредственно процесс сварки, который характеризуется перемещением электродов вдоль сварного шва. Электрод моделируется точечным источником тепла с известной величиной теплового потока. Скорость перемещения

электродов вдоль сварного шва и их число регламентируется техническими условиями.

Геометрическая расчетная схема представляет собой твердотельную модель сектора трубы и разрезного тройника углом 180° , причем геометрия сварного шва создается одновременно с геометрией основной модели.

Для описания модели используется нелинейное уравнение нестационарной теплопроводности с соответствующими начальными и краевыми условиями, записанное в матричной форме [1]. Решение задачи моделирования процесса приварки патрубка проводилось методом конечных элементов в среде КЭ ПК ANSYS с использованием трехмерного восьмиузлового конечного элемента SOLID70.

Результатом моделирования является методика, позволяющая получать зависимости температуры от времени (кривые охлаждения) материала в любой точке околошовной зоны. Используя различные вариации параметров модели, можно получать кривые охлаждения материала, наиболее близко соответствующие технологическим требованиям.

Литература

1. Куркин А.С., Ховова В. М. Компьютерное проектирование и подготовка производства сварных конструкций. Издательство « МГТУ им. Н.Э. Баумана», 2002г.

2. Коновалов А.В., Куркин А.С., Макаров Э.Л., Неровный В.М., Якушин Б.Ф.;

Под редакцией Неровного В.М. Теория сварочных процессов. Издательство « МГТУ им. Н.Э. Баумана», 2007.-752с.:ил.

РАСЧЕТ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ДАТЧИКА МЕМБРАННОГО ТИПА

Гаврюшин С.С., Сапко А.И.

(Москва)

Задача производительного и точного взвешивания тяжелых грузов остается актуальной и вызывает необходимость улучшения весоизмерительного оборудования. Взвешивание производится на промышленных весах, где чувствительным элементом являются силоизмерительные датчики, среди широкого спектра которых наибольшее распространение получили тензорезисторные датчики силы (ТДС).

В работе рассматривается датчик мембранного типа, представляющий собой тело вращения с вертикальной осью, выполненный в форме чаши, который помещается между опорной и силовводящей плитами. На внутреннюю поверхность упругого элемента наклеены тензорезисторы, преобразующие

деформацию элемента в электрический сигнал. Рациональным считается расположение одного тензодатчика в зоне растяжения, другого - в зоне сжатия.

Основной задачей при проектировании ТДС является достижение требуемой точности измерений. Основное внимание в работе уделено вопросам снижения нелинейности упругой характеристики и уменьшения гистерезиса, существенной причиной возникновения которого является эффект сухого трения, проявляющийся в месте контакта упругого элемента с опорной плитой.

Задача решалась в плоскосимметричной постановке методами математического моделирования комплекса ANSYS с использованием четырехузловых элементов PLANE42. Элемент нагружался вертикальной осевой сосредоточенной силой, приложенной к силоводящей плите. Зона контакта плит и элемента моделировалась с помощью контактных элементов.

Решалась задача оптимизации со следующими условиями: варьируемые параметры - геометрические размеры элемента; функциональные ограничения - ограничения на максимальное эквивалентное напряжение; целевая функция - величина проскальзывания в зоне контакта элемента с опорной плитой.

Использование данной методики позволило определить рациональные размеры элемента и оптимальные места наклейки тензорезисторов. Повышение точности измерений достигнуто путем снижения гистерезиса, возникающего из-за сухого трения. Рекомендации внедрены в практику расчета и проектирования на предприятии ЗАО «Весоизмерительная компания «Тензо-М».

Литература

1. *Dan Mihai Stefanescu* "Handbook of Force Transducers: Principles and Components", 642 pages
2. *Андреева Л.Е.* Упругие элементы приборов. М.: Машиностроение, 1981. - 455с.

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ И АЛГОРИТМОВ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Гнездилов В.А., Григорьев В.Г., Курников И.С., Меньшиков А.А.

(Москва)

Предложена методика оценки запаса по устойчивости крупногабаритных пространственных конструкций в условиях действия совокупности воздействующих силовых и кинематических факторов. При этом ставится задача оценки несущей способности конструкции в отношении каждого из

указанных факторов в отдельности при условии действия остальных компонент. Стандартные методы анализа устойчивости, основанные на эйлеровой теории смежных равновесных состояний, в данном случае неприменимы, поскольку основаны на сведении задачи к решению проблемы собственных значений для множителя, масштабирующего сразу всю совокупность приложенных к конструкции нагрузок.

В этих условиях оказывается удобным подойти к проблеме с точки зрения теории динамической устойчивости, рассматривая задачу о собственных колебаниях предварительно нагруженной конструкции. В задачах, где применим эйлеров подход, критическая величина статической нагрузки соответствует в точности той ситуации, когда низшая собственная частота нагруженной конструкции приближается к нулевому значению, а затем с увеличением приложенной силы частота распадается на две мнимые комплексно-сопряженные величины. С точки зрения теории линейных дифференциальных уравнений это означает появление среди фундаментальных решений однородной системы экспоненциальных зависимостей, одна из которых соответствует неограниченно возрастающей во времени компоненте решения, что и соответствует неустойчивости системы.

В случае многокомпонентного нагружения конструкции варьирование масштабирующего множителя одной из компонент при фиксированных остальных позволяет путем расчета собственных частот выявить точку обращения низшей собственной частоты в ноль. Тем самым реализуется возможность оценить запас устойчивости конструкции относительно любой составляющей нагружения.

Возможность решения задачи расчета собственных частот предварительно нагруженных конструкций реализована, в частности, в программных комплексах NASTRAN, разрабатываемых такими фирмами, как MSC и Siemens. В настоящей работе представлены результаты исследований, выполненных с использованием программы NX NASTRAN фирмы Siemens в сочетании с препроцессором FEMAP. Важной особенностью алгоритмов решения указанной задачи в этих программных комплексах является расчет статического напряженно-деформированного состояния конструкции в нелинейной постановке, что дополнительно приближает полученное решение к реальным параметрам, наблюдаемым в эксперименте.

Выполнены исследования различных ситуаций многокомпонентного нагружения простых конструкций типа консольного стержня и сложных крупногабаритных пространственных ферменных сооружений. Выявленные эффекты потери устойчивости в сложных конструкциях подтверждают эффективность предложенной методики.

ОЦЕНКА КРИТЕРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ФЛАТТЕРА РАБОЧЕГО КОЛЕСА КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Говоров А.А., Мартиросов М.И.

(Москва)

Одним из узлов газогенератора является компрессор, аэродинамическое и конструктивное совершенство которого определяет тягу, экономичность, массу, габаритные размеры, надежность и ресурс двигателя. Устраняя противоречивые требования, с которыми приходится сталкиваться при разработке данного узла, возникают проблемы со стороны конструкции, газодинамики, прочности, аэроупругости. В работе исследуется флаттер лопаток компрессора на дозвуковых режимах работы газотурбинного авиационного двигателя.

Работа состоит из нескольких этапов. На первом – получены качественные зависимости частот колебаний от сдвига фаз колебаний. Математическая модель представляет собой систему конечно-разностных дифференциальных уравнений для жесткого тела с двумя степенями свободы. Упругие свойства лопаток и диска моделируются как упругие связи с заданной жесткостью. Взаимодействие тела с потоком газа – нестационарное. Учет влияния аэродинамических сил позволяет провести оценку вклада составляющих форм колебаний в развитие флаттера. Данные исследования позволяют сделать вывод о крутильно-изгибной связанности лопаток. На втором этапе используется энергетический подход, который дает возможность оценить вклад в возникновение колебаний данной связи через поток. Метод показал зависимость между формами колебаний и сдвига фаз между лопатками. В энергетическом подходе принималась гипотеза о возникновении флаттера по собственным формам, поэтому для получения значений собственных частот использовался численный метод (ввиду затруднений при моделировании сложной закрученной формы исследуемой лопатки). Расчеты проведены в трехмерной постановке с помощью коммерческого программного комплекса. Дано сравнение полученных результатов с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными. Сформулированы практические выводы и рекомендации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ (код проекта НШ-2047.2012.8) и РФФИ (код проекта 11-01-00540_a).

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА СПЕКТРОВ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ПЛАСТИН И ОБОЛОЧЕК В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Голубева Т.Н., Хроматов В.Е.

(Москва)

Задачам колебаний тонкостенных элементов конструкций в магнитных полях посвящено достаточно большое количество публикаций, однако остается не полностью исследованным вопрос о влиянии магнитных полей на весь спектр частот. Существующие программные комплексы типа Ansys, созданные на основе конечно-элементных моделей не содержат решения задач магнитоупругости. Теоретические модели колебаний тонкостенных элементов конструкций в магнитных полях представлены в монографиях [1,2]. Применение асимптотического метода В.В. Болотина (АМБ) [3] позволяет рассмотреть задачи колебаний пластин с различными краевыми условиями и распределение собственных частот колебаний пологих оболочек в магнитных полях.

В работе дано описание программного комплекса для расчета спектров колебаний тонкостенных элементов конструкций в магнитном поле. На основе гипотез и уравнений колебаний пластин и оболочек в магнитном поле [1,2] были выведены соотношения для нахождения собственных частот колебаний прямоугольных пластин и оболочек, изготовленных из диамагнитных, парамагнитных [1,4-6] и ферромагнитных материалов [2,7-10], в продольном и поперечном магнитных полях,

Разработанные математические модели магнитоупругих колебаний тонкостенных пластин с различными типами закрепления краев и оболочек позволили создать универсальный программный комплекс для расчета спектров частот колебаний в магнитных полях с использованием среды Borland Delphi 7.0 [11,12]. С учетом различных комбинаций входных данных программный комплекс сочетает в себе двадцать задач об определении частот колебаний прямоугольных пластин с различными краевыми условиями в поперечном и продольном магнитном поле, выполненных из немагнитных (диамагнитных и парамагнитных) и ферромагнитных материалов, и четыре задачи о колебаниях цилиндрических и сферических оболочек в магнитных полях. При этом комплекс не требует установки дополнительного математического обеспечения, все математические операции написаны непосредственно в среде *Borland Delphi 7.0* [12].

Условно программный комплекс можно разделить на блок ввода исходных данных и блок результатов расчета. Ввод исходных данных следует начать с выбора объекта для расчета. Это может быть пластина или оболочка. В

зависимости от того, какой объект для расчета был выбран - пластина или оболочка, появляются разные списки параметров для ввода.

После выбора объекта расчета необходимо задать материал (диа-, пара- или ферромагнитный), из которого изготовлен объект расчета и его свойства. Для диамагнитного и парамагнитного материала необходимо задать параметры, характеризующие свойства материала объекта: плотность материала ρ , модуль упругости E , коэффициент Пуассона ν , магнитную проницаемость μ . Для ферромагнитного материала вместо магнитной проницаемости μ необходимо задать относительную магнитную проницаемость материала μ_r .

После выбора объекта для расчета и задания для него всех необходимых параметров можно перейти к выбору параметров магнитного поля, в котором находится объект. Рассматриваются два варианта магнитного поля: продольное и поперечное. При выборе в раскрывающемся списке продольного магнитного поля далее требуется задать индукцию B_1 . При выборе поперечного магнитного поля – индукцию B_3 . Для цилиндрической оболочки, изготовленной из ферромагнитного материала, можно задать только продольное азимутальное магнитное поле (направленное по окружности оболочки). После ввода исходных данных можем приступить к расчету. Для этого необходимо нажать на кнопку «Произвести расчет». После нажатия этой кнопки на экран выводятся результаты расчета.

Внешнее магнитное поле оказывает эффект сжимающих усилий в срединной поверхности оболочек, приводит к снижению собственных частот колебаний оболочек и смещению точек сгущения частот в область более низких частот [4,5]. Переменное во времени внешнее магнитное поле приводит к потере динамической устойчивости ферромагнитных пластин [9], к увеличению области динамической неустойчивости. Исследование влияния азимутального магнитного поля на колебания и устойчивость цилиндрических оболочек из ферромагнитных материалов проведено в [10].

Полученные в работе результаты имеют теоретическое и практическое значение. Они позволяют уточнить существующее представление о характере поведения тонкостенных элементов конструкций в продольном и поперечном магнитном поле.

Литература

1. Амбарцумян С.А., Багдасарян Г.Е., Белубекян М.В. Магнитоупругость тонких оболочек и пластин. М.: Наука. 1977. 272 с.
2. Багдасарян Г. Е. Колебания и устойчивость магнитоупругих систем. Ереван. Тигран Мец. 1999. 436 с
3. *Вибрации в технике*. Справочник в 6-ти т. Т.1. Колебания линейных систем / Под ред. В.В. Болотина. М.: Машиностроение. 2-е изд. 1999. 506 с.

4. *Хроматов В. Е., Корешкова Н. С.* Спектры собственных частот колебаний круговых цилиндрических оболочек в продольном магнитном поле. Вестник МЭИ, 2008, №1. С. 71-75.

5. *Корешкова Н.С., Хроматов В.Е.* О влиянии поперечного магнитного поля на спектры частот колебаний пологих оболочек // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2009. № 4. С. 165-171.

6. *Голубева Т.Н., Хроматов В.Е.* Влияние магнитного поля на колебания элементов конструкций энергетического оборудования // Новое в Российской электроэнергетике. Ежемесячный электронный журнал. 2012. № 3.

7. *Хроматов В. Е., Голубева Т. Н.* О влиянии магнитных полей на колебания и устойчивость пластин из ферромагнитного материала // Вестник машиностроения. 2012. № 9. С. 12-16.

8. *Голубева Т. Н., Коробков Ю.С., Хроматов В.Е.* Влияние продольного магнитного поля на спектры частот колебаний ферромагнитных пластин // Электротехника. 2013. №3. С. 44-49.

9. *Голубева Т. Н.* Динамическая устойчивость ферромагнитных пластин в поперечном магнитном поле. Справочник. Инженерный журнал. 2013. №5. С. 20-24.

10. *Голубева Т. Н., Хроматов В. Е.* О колебаниях ферромагнитных круговых цилиндрических оболочек в магнитном поле // Материалы XIX международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А. Г. Горшкова. 18 – 22 февраля 2013 г., с. Ярополец. М.: Изд-во МАИ. 2013. С. 67-68.

11. *Demin A. A., Golubeva T. N., Demina A. S.* The program complex for research of fluctuations' ranges of plates and shells in magnetic field // 11th Students' Science Conference "Future Information technology solutions", 3-6 October 2013. Paper of the Students of the Wrocław University of Technology, 2013, № 18. P 61-66.

12. *Хомоненко А., Гофман В, Мещеряков Е., Никифоров В.* Delphi 7. Наиболее полное руководство СПб: ВHV-Петербург. 2008. 1216 с.

ПРИМЕНЕНИЕ НАТУРАЛЬНЫХ МАСШТАБОВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СПЛОШНЫХ СРЕД

Гончарук К.О.

(Москва)

Под моделированием понимается или построение корректной физико-математической модели или перенос количественной информации с модели-объекта на сам объект. Физико-математическая модель представляет из себя систему нелинейных интегро-дифференциальных уравнений с нелинейными условиями единственности. Это обстоятельство чрезвычайно затрудняет

получение количественной информации аналитически, численно и экспериментально. Теория подобия, точнее ее часть метод натуральных масштабов, позволяет получить достаточную количественную информация для разработки и создания промышленных объектов.[2]

По определению[1], два объекта (даже самой разной физической природы) называются подобными, если безразмерные искомые функции от безразмерных аргументов тождественны. Следствие: чтобы два объекта были подобными, необходимо и достаточно тождественность физико-математических моделей с точностью до обозначений и равенство критериев подобия. Детальность и подробность физико-математической модели приводит к большому числу критериев подобия, соизмеримому с числом первичных параметров всей задачи. Это значительно затрудняет моделирование, те перенос количественной информации с лабораторной модели на промышленную.

В химической технологии в настоящее время используется следующий алгоритм разработки:

Моделирование в лаборатории для нахождения коэффициентов известной упрощенной модели \Leftrightarrow Опытное производство \Leftrightarrow Сильно отличающиеся от прогнозных показатели \Leftrightarrow Корректировка модели в соответствии с реальной ситуацией \Leftrightarrow Реальное производство \Leftrightarrow Сильно отличающиеся от прогнозных показатели \Leftrightarrow Тиражирование \Leftrightarrow Незначительно отличающиеся показатели.

На основании анализа результатов работ [2,3] предлагается алгоритм решения задач в химической технологии. Новая модель разработки химико-технологической системы:

Разработка подробной физико-математической модели, с максимально близкими к реальности граничными условиями и обработка ее методом натуральных масштабов (методом порядковой математики) \Leftrightarrow Лабораторные исследования для нахождения первичных параметров (вязкости, константы реакции, теплопроводности и проч.) необходимых для поиска масштабов модели и получение величин натуральных масштабов \Leftrightarrow проверка адекватности физико-математической модели \Leftrightarrow Разработка эскизного проекта промышленного аппарата на основе физического смысла и величины каждого натурального масштаба[4].

Сокращая затраты, предложенный механизм создания технологии дает более точные прогнозы относительно производства и значительно упрощает, к примеру, пуски химико-технологических систем.

Литература

1. Гухман А.А., Зайцев А.А. Обобщенный анализ. – М: Изд-во «Факториал», 1998 -304 С. – ISBN 5-88688-036-4

2. Прохоренко Н.Н. Метод натуральных масштабов: прил. к науч.-исслед. и инженер. задачам. – Калуга : Изд-во науч. лит. Н. Ф. Бочкаревой, 2006 (Калуга) - 186 с. - 300 экз. - ISBN 5-89552-154-1

3. Прохоренко Н.Н. Опыт моделирования процесса переноса в многофазных и многокомпонентных средах. // Энергия: экономика, техника, экология. - 2012. - № 11. - С. 9-13. - ISSN 0233-3619

4. Прохоренко Н.Н. Опыт моделирования процесса переноса в многофазных и многокомпонентных средах. 2 // Энергия: экономика, техника, экология. - 2013. - № 6. - С. 2-9. - ISSN 0233-3619

МОДЕЛИРОВАНИЕ МКЭ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ СООТНОШЕНИЙ МЕХАНИКИ ПОВРЕЖДЕННОЙ СРЕДЫ

Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А.

(Нижний Новгород)

В докладе обсуждаются математические модели, алгоритмы и численная методика исследования в рамках соотношений механики поврежденной среды процессов растрескивания под напряжением (КРН) элементов конструкций, работающих в условиях агрессивного воздействия коррозионных сред.

Согласно современным представлениям о механизмах КРН развитие этого процесса связано с разрушением, в результате действия растягивающих напряжений в пленке, защищающей поверхность металла от агрессивного влияния коррозионной среды и последующего анодного растворения металла.

В докладе предложена математическая модель, описывающая в рамках соотношений механики поврежденной среды процессы КРН нержавеющей сталей в условиях агрессивного воздействия коррозионных сред при квазистатических термосиловых нагрузениях. В основу модели положен известный механизм КРН, согласно которому возникновение и развитие процесса растрескивания под напряжением представляется как результат взаимодействия разрушения защитных пленок на поверхности металла, анодного растворения металла и образования новой защитной пленки [1, 2]. При построении такой модели КРН рассматривается как некоторый нестационарный процесс изменения состояния конгломерата из окисной пленки, защищающей основной материал от агрессивного воздействия коррозионной среды и состоянием самого материала, определяемого уровнем действующих напряжений, температуры, временем воздействия и концентрацией коррозионной среды, а также параметрами, характеризующими историю необратимого деформирования и текущую поврежденность материала.

Предложенная модель включена в состав общей модели поврежденного материала, реализованной в вычислительном комплексе УПАКС [3] моделирования на основе МКЭ процессов нелинейного деформирования и разрушения конструкций при квазистатических термосиловых нагружениях.

Ввиду существенной нелинейности соотношений предложенной модели КРН, краевые задачи, к которым сводится моделирование процессов деформирования и разрушения конструкций в условиях агрессивного воздействия коррозионных сред, оказываются также нелинейными. Решение таких задач осуществляется в рамках используемой в ВК УПАКС общей методологии исследования процессов деформирования и разрушения конструкций при квазистатических термосиловых нагружениях путем пошагового интегрирования инкрементальных уравнений с использованием комбинированной шаговой схемы.

Решение нелинейных задач на каждом шаге изменения внешних воздействий осуществляется в форме метода начальных напряжений. Численное решение линеаризованных задач строится на основе МКЭ с использованием универсальных моделей изопараметрических квадратичных КЭ с сирендиновой аппроксимацией поля перемещений. В качестве физических узлов таких элементов используются узлы основной сетки. В этих узлах хранятся и вычисляются все величины, определяющие физическое состояние в точке материала (температура, деформации, параметры состояния). При этом общая схема вычислений в задачах моделирования КРН остается такой же, как в исходном варианте ВК УПАКС, однако вносится ряд изменений, касающихся входной информации и информации, порождаемой в процессе вычислений, а также вводятся дополнительные операции, обеспечивающие вычисление параметров, характеризующих коррозионные процессы.

Для иллюстрации применения и оценки работоспособности предложенных моделей и алгоритмов в составе средств ВК УПАКС создан опытный вариант программы, позволяющий исследовать процессы КРН конкретных элементов конструкций в условиях воздействий коррозионных сред.

С помощью созданных средств, проведено численное моделирование процесса разрушения тонкостенного трубчатого образца из стали X18H10T, частично погруженного в жидкую хлорсодержащую среду, в условиях осевого растяжения.

На основе проведенных исследований было установлено, что результаты численного моделирования процесса КРН образца качественно и количественно согласуются с экспериментальными данными, приведенными в [4]. Предсказываемая зона разрушения образца по длине совпадает с фактической.

Также установлено, что полученная в результате численного моделирования зависимость времени коррозионного разрушения

экспериментального образца от уровня растягивающих напряжений хорошо подтверждается приведенными в [4] экспериментальными данными. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-08-31084).

Литература

1. Методы обоснования ресурса ядерных энергетических установок /Ф.М. Митенков, В.Б. Кайдалов, Ю.Г. Коротких, В.А. Панов, С.Н. Пичков; Под общ. ред. Ф.М. Митенкова. – М.: Машиностроение. – 2007. – 448 с.

2. *Погодин В.П., Богдавленский В.Л., Сенторов В.П.* Межкристаллитная коррозия и коррозионное растрескивание нержавеющей сталей в водных средах. М.: Атомиздат. – 1976. – 326 с.

3. Вычислительный комплекс УПАКС. Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный паспорт аттестации ПС № 147 от 31.10.2002.

4. *Сандлер Н.Г., Козин В.А.* Коррозионное растрескивание сталей типа X18N10T в пароводяных хлоросодержащих средах. Защита металлов. т. XX, №3. – 1984. – С. 393–396.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

Горячева И.Г.

(Москва)

Свойством неравномерного изнашивания в условиях фрикционного взаимодействия обладают композитные и неоднородные материалы, а также материалы, поверхности которых подвергнуты локальному упрочнению (лазерная обработка, ионная имплантация и т.д.). При изнашивании таких материалов наиболее интенсивному разрушению подвергается менее прочная (чаще всего более мягкая) структура, в результате чего первоначально ровная поверхность становится волнистой. При этом материал, подвергнувшийся наиболее быстрому износу, попадает в зону трения и сам может оказывать влияние на протекание процессов трения и изнашивания.

При математическом моделировании формоизменения и эволюции контактных напряжений при изнашивании неоднородных материалов используются методы решения износоконтактных задач. При этом принимается во внимание различие коэффициентов износостойкости структурных составляющих изнашиваемого материала и их механических характеристик [1,2,3].

В данном исследовании рассматриваются износоконтактные задачи в плоской и пространственной постановках для полупространства, коэффициент

износостойкости которого описывается кусочно-постоянной функцией точек поверхности, и излагаются методы их решения. На основе построенных решений рассчитываются форма изношенной поверхности, распределение контактных давлений, скорость сближения тел за счет их износа и другие контактные характеристики в установившемся режиме изнашивания при различных конфигурациях и расположениях зон, отличающихся своими механическими и трибологическими характеристиками.

Построенные решения использованы для исследования следующих прикладных задач:

- изнашивание поверхностей, локально упрочненных внутри областей различной конфигурации,
- изнашивание композитных материалов на основе углепластиков, рабочие поверхности которых модифицированы фторопластовыми вставками [4,5].

Полученные на основе математического моделирования результаты позволяют ставить и решать задачу выбора оптимальных размеров и расположения упрочненных зон и включений для достижения максимальной износостойкости неоднородных и композитных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-01-00372).

Литература

1. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.Наука, 2001
2. Горячева И.Г., Торская Е.В. Контактные задачи при наличии износа для тел с переменным по поверхности коэффициентом износостойкости. Трение и износ, 1992, т.13, №1, С.185-194
3. Chekina O.G., Keer L.M. Wear-contact problems and modeling of chemical mechanical polishing. J.Electrochem.Soc., 1998, Vol.145, No 6, P.2100-2106
4. Бахарева В.Е., Анисимов А.В., Лобынцева И.В., Савелов А.С. Макромодификация антифрикционных углепластиков фторопластом – эффективный путь снижения коэффициента трения // Вопросы материаловедения – 2012 – № 4 с. 81–88.
5. Бахарева В.Е., Анисимов А.В., Савелов А.С., Пеклер К.В., Ильин С.Я., Моркин О.В. Создание макромодифицированных фторопластом углепластиков для подшипников скольжения рабочих колес поворотно-лопастных гидротурбин // Вопросы материаловедения – 2009 – № 1. с. 17–25

СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ КОМПОЗИТНЫХ УДЛИНЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПАНЕЛЕЙ ПРИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

Горячко Т.В., Марчук М.В., Пакош В.С.

(Львов)

Тонкие удлиненные цилиндрические панели, подвергающиеся воздействию интенсивных динамических, в частности циклических, нагрузок, вызывающих соизмеримые с толщиной нормальные перемещения, т.е. геометрически нелинейные динамическое напряженно-деформированное состояние, широко применяются в конструкциях и технических средствах различного целевого назначения [1]. Чтобы избежать резонансных явлений в эксплуатационных условиях, необходимо на стадии проектирования определить спектр собственных частот указанных конструктивных элементов. Из-за дефицита и высокой цены традиционных материалов возникает потребность замены их новыми конструкционными, в частности композитными, эксплуатационные свойства и прочностные характеристики которых можно прогнозировать в широком диапазоне на стадии проектирования и регулировать в процессе изготовления. Наряду с анизотропией упругих свойств наиболее характерной особенностью деформирования тонкостенных оболочек из композитов является податливость к трансверсальным сдвигу и сжатию. Свободные колебания композитных тонкостенных элементов конструкций исследованы или при помощи численных методов [2, 5–7], или с учетом только податливости к трансверсальному сдвигу [1].

В предлагаемом докладе изучены поперечные свободные колебания с одновременным учетом указанных факторов благодаря пространственной постановке задачи. С этой целью исследована возможность применения метода возмущений для нахождения конечного количества первых значений собственных частот и форм геометрически нелинейных свободных колебаний срединных сечений удлиненных цилиндрических панелей. Уравнения движения вместе с соотношениями упругости, деформационными соотношениями и граничными условиями описывают геометрически нелинейные поперечные колебания срединного сечения панели [4], если задать соответствующие начальные условия. При использовании квадратичной аппроксимации перемещений по нормальной координате и конечноэлементной аппроксимации на одномерных линейных изопараметрических элементах вдоль кольцевой координаты [3] получена соответствующая дискретизированная эквивалентная вариационная задача [8]. Для ее решения использован адаптированный метод возмущений. Построен итерационный алгоритм численного отыскания конечного числа первых собственных частот и амплитуд геометрически

нелинейных колебаний панели. Апробация предложенного алгоритма произведена на примере задачи, для которой известны аналитическое и численное решения [7]. В качестве примера рассмотрена изотропная пластина-полоса, удлинённые края которой закреплены неподвижными шарнирами на нижней лицевой плоскости. Численные результаты сравнены с ранее полученными другими авторами. Приведены скелетные кривые, построенные с помощью предложенного метода и результатами работы [2]. Максимальная относительная погрешность не превышает 9%, что свидетельствует о достаточно хорошем аппроксимационном свойстве предложенного алгоритма. Найдены четыре первые собственные формы (моды) при геометрически нелинейных колебаниях рассматриваемой пластины-полосы. В дальнейшем аналогичные исследования целесообразно выполнить для более широкого класса тонкостенных элементов конструкций и анизотропии механических характеристик.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке УФФИ (проект № Ф53.1/028).

Литература

1. *Вольмир А.С.* Нелинейная динамика пластинок и оболочек. – М.: Наука, 1972. – 432 с.
2. *Курпа Л. В., Будников Н. А.* Исследование вынужденных нелинейных колебаний многослойных пологих оболочек при помощи многомодовой аппроксимации // *Вісник Донецького національного університету. Серія А. Природничі науки.* – 2013. – № 1. – С. 55–60.
3. *Марчук М. В., Муха І. С., Горячко Т. В.* Порівняльний аналіз характеристик геометрично нелінійного напружено-деформованого стану композитних пластин і циліндричних панелей на основі уточненої моделі та теорії пружності // *Modelling and Stability: Abstracts of Conference Reports.* – К.: Taras Shevchenko National Univ. of Kyiv, 2011. – Р. 301.
4. *Морозов Н. Ф.* Избранные двумерные задачи теории упругости. – Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1978. – 182 с.
5. *Amabili M.* Nonlinear vibrations and stability of shells and plates. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2008. – 374 p.
6. *Amabili M.* Nonlinear vibrations of rectangular plates with different boundary conditions: theory and experiments // *Comput. Struct.* – 2004. – 82(31-32). – P. 2587–2605.
7. *Lewandowski R.* Free vibration of structures with cubic non-linearity-remarks on amplitude equation and Rayleigh quotient // *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* – 2003. – 192(13). – P. 1681–1709.
8. *Reddy J. N.* An introduction to nonlinear finite element analysis. – Oxford University Press, 2004. – 488 p.

К ПРОЕКТИРОВАНИЮ АМОРТИЗАТОРА УДАРА С ЭЛАСТОМЕРНЫМИ УПРУГО-ДИССИПАТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Грибков В.А., Талагаев А.В.

(Москва)

Использование современных высокоэластичных полимерных материалов, имеющих большие значения допустимых деформаций, может заметно повысить эффективность амортизаторов удара технических объектов, в частности, уменьшить размеры и массу амортизаторов. Проблема заключается, в первую очередь, в адекватном описании процессов нелинейного деформирования систем упруго-диссипативных элементов в составе амортизатора. Необходимо совершенствование конструкции амортизатора, основанное на результатах численного анализа взаимодействия элементов амортизатора, с максимальной реализацией возможностей конструкции.

Отмеченная проблема решена в предлагаемой расчетно-экспериментальной методике проектирования полимерных амортизаторов удара, базирующейся на конечно-элементных моделях деформирования упруго-диссипативных элементов амортизатора, а также экспериментальной составляющей, необходимой идентификации квазистатических и динамических свойств полимерных материалов.

В качестве основного инструмента исследования процесса деформирования использован параметризованный конечно-элементный программный комплекс с возможностью применения нелинейной дискретной оптимизации параметров конструкции.

Методика содержит следующие взаимосвязанные структурные элементы:

- рекомендации по адекватному описанию нелинейных процессов деформирования систем упруго-диссипативных элементов в составе амортизатора для реализации требований, предъявляемых в задании на проектирование;
- рекомендации по составлению технического задания на проектирование амортизатора удара с определением списка ключевых параметров изделия;
- выбор варианта конструктивной схемы амортизатора из перечня возможных (предложенных в данной работе);
- выявление и нивелирование потенциальных проблем, возникающих на этапах сборки и эксплуатации;
- формирование критериев подбора материалов амортизатора;
- рекомендации по составу и постановке экспериментов.

В частности, из анализа влияния на характеристики амортизатора состояния рабочих поверхностей упруго-диссипативных элементов (например, чистоты поверхности) формулируются рекомендации по сборке амортизатора.

Методика позволяет повысить технические характеристики амортизаторов удара, сократить длительность процесса проектирования и снизить объем экспериментальной отработки.

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОГО ДЕФОРМИРУЕМОГО ПРОФИЛЯ КРЫЛА ПРИ ДОЗВУКОВОМ И СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ

Гришанина Т.В., Шклярчук Ф.Н.

(Москва)

Перепад аэродинамического давления на тонком профиле крыла (разность давлений на нижней и верхней поверхностях) при установившемся обтекании записываются в зависимости от местного угла атаки $\alpha(x)$, [1, 2]:

$$\Delta p = \frac{\rho U^2}{2} P[\alpha(x)]; \quad (1)$$

$$P[\alpha] = -\frac{4}{\pi\beta} \sqrt{\frac{a-x}{a+x}} \int_{-a}^a \sqrt{\frac{a+\xi}{a-\xi}} \frac{\alpha(\xi)}{x-\xi} d\xi, \quad \text{при } 0 < M < 1,$$

$$P[\alpha] = -\frac{4}{\beta} \alpha(x), \quad \text{при } M > 1,$$

Здесь ρ , U , M – плотность, скорость и число Маха набегающего потока; $\beta = \sqrt{|1-M^2|}$; $a = b/2$ – половина хорды; x – координата, отсчитываемая от середины профиля в направлении потока.

Поперечные перемещения деформируемого профиля $v(x, t)$ при достаточно медленном поступательно-вращательном движении с учетом статического изгиба записывается по методу Ритца в виде ряда по заданным функциям $\psi_i(x)$. Малый угол атаки определяется из условия безотрывного обтекания профиля [2]:

$$v = \sum_{i=0}^n q_i \psi_i(x); \quad \alpha = -\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{U} \frac{\partial v}{\partial t} \right) = -\sum_{i=0}^n \alpha_i \chi_i(x). \quad (2)$$

Для перемещения в центре профиля $v_0(t)$ и его угла поворота $\phi_0(t)$ как твердого тела ($i = 0, 1$): $v_0(t)$, $\psi_0 = 1$, $\alpha_0 = \phi_0 - \dot{v}_0/U$, $\chi_0 = -1$; $q_1 = \phi_0(t)$, $\psi_1 = -x$, $\alpha_1 = \dot{\phi}_0 b/U = \dot{\omega}$, $\chi_1 = -x/b$. Для изгиба профиля ($i = 2, 3, \dots, n$):

$$\alpha_i = q_i, \quad \chi_i = \psi_i'.$$

Для определения обобщенных координат q_i используется принцип возможных перемещений $\delta\Pi = \delta A_p$, где потенциальная энергия изгиба и вариация работы аэродинамической нагрузки вычисляются как

$$\delta\Pi = \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n \sum_{j=2}^n k_{ij} q_i q_j, \quad \delta A_p = \int_{-a}^a \Delta p \delta v dx = \sum_{i=0}^n Q_i \delta q_i; \quad (3)$$

$$Q_i = \int_{-a}^a \psi_i \Delta p dx = \sum_{j=0}^n b_{ij} \alpha_j, \quad b_{ij} = \frac{\rho U^2}{2} \int_{-a}^a \psi_i P[\chi_j] dx.$$

Выражения для аэродинамической силы и аэродинамического момента и уравнения для обобщенных координат имеют вид:

$$\Delta Y = Q_0 = (b_{00} \alpha_0 + b_{01} \bar{\omega} + \sum_{j=2}^n b_{0j} q_j), \quad (4)$$

$$\Delta M_0 = Q_1 = (b_{10} \alpha_0 + b_{11} \bar{\omega} + \sum_{j=2}^n b_{1j} q_j);$$

$$\sum_{j=2}^n (k_{ij} - b_{ij}) q_j = (b_{i0} \alpha_0 + b_{i1} \bar{\omega}), \quad i = 2, 3, \dots, n. \quad (5)$$

После исключения q_j выражения (4) записываются в обычной форме как для абсолютно жесткого профиля (т.е. как (4) при $q_j = 0$) и приводятся к виду [2, 3]:

$$\Delta Y = \frac{\rho U^2}{2} b (c_{y,0}^\alpha \alpha_0 + c_{y,0}^{\bar{\omega}} \bar{\omega}), \quad (6)$$

$$\Delta M_0 = \frac{\rho U^2}{2} b^2 (m_{z,0}^\alpha \alpha_0 + m_{z,0}^{\bar{\omega}} \bar{\omega}).$$

Безразмерные аэродинамические коэффициенты $c_{y,0}^\alpha$, $c_{y,0}^{\bar{\omega}}$, $m_{z,0}^\alpha$, $m_{z,0}^{\bar{\omega}}$ в рассматриваемом случае зависят от упругих характеристик профиля.

В качестве примера рассмотрен профиль крыла в виде мембраны, натянутой на рамку с передней и задней кромками; такое крыло может быть использовано для малоразмерных воздушных аппаратов. Кроме того в качестве другого примера рассмотрен профиль лопасти – D-образный лонжерон с присоединенным хвостиком в виде трехслойной сужающейся пластины с легким наполнителем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 12-08-00590).

Литература

1. Бисплингхофф Р.Л., Эшли Х., Халфмен Р.Л. Аэроупругость. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1958. – 800 с.
2. Шклярчук Ф.Н. Аэроупругость самолета. – М.: Изд-во МАИ, 1985. – 77 с.
3. Белоцерковский С.М., Скрипач Б.К. Аэродинамические производные летательного аппарата и крыла при дозвуковых скоростях. – М.: Изд-во «Наука», 1975. – 424 с.

ГРАНИЧНАЯ ЗАДАЧА ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ ГИБКИХ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК ПРИ УЧЕТЕ ПОПЕРЕЧНЫХ СДВИГОВ

Гурьянов С.А., Филатов В.Н.

(Саратов)

Рассматривается тонкая пологая оболочка прямоугольного плана с размерами $a \times b$. Некоторую внутреннюю поверхность тела оболочки принимаем за координатную поверхность. Оси OX и OY направляем по линиям главных кривизн координатной поверхности оболочки, OZ – по нормали к координатной поверхности в сторону вогнутости (вниз). Оболочка находится в температурном поле $T = T(x, y, z)$ под действием заданной внешней нагрузки перпендикулярной плану оболочки – $q(x, y)$. E – модуль упругости материала, μ – коэффициент Пуассона. Толщина оболочки переменна и задается ограничивающими ее в вертикальном направлении поверхностями $z_0(x, y)$ и $z_n(x, y)$.

В работе вариационным путем выводятся уравнения термоупругости пологих оболочек конечного прогиба, учитывающие поперечный сдвиг, когда толщина оболочки переменна, а модуль упругости и коэффициент теплового расширения материал зависят от температуры. Искомыми переменными в построенных уравнениях являются составляющие перемещения точек оболочки U, V, W и ψ_1, ψ_2 – углы поворота отрезка нормали у срединной поверхности соответственно в направлении координатных осей OX и OY .

Функцию, характеризующую закон распределения напряжений σ_{xz} и σ_{yz} по толщине оболочки, принимаем в виде $f(z) = -6(z - z_0)(z - z_n) / (z_n - z_0)^2$.

$$\text{Тогда } \frac{1}{z_n - z_0} \int_{z_0}^{z_n} f(z) dz = 1, \quad \frac{1}{K^2} = \int_{z_0}^{z_n} E f^2(z) dz, \quad \frac{1}{k^2} = \frac{1}{z_n - z_0} \int_{z_0}^{z_n} f^2(z) dz = \frac{6}{5}.$$

Из построенных уравнений без затруднений получаются уравнения для оболочек ступенчато-переменной толщины. Эти уравнения легко упрощаются на случай безтемпературной задачи, на случай оболочек постоянной толщины, на случай линейной задачи. В случае безтемпературной задачи ($T=0$) для оболочек постоянной толщины ($z_e = -0,5 \cdot h$, $z_n = 0,5 \cdot h$) построенные уравнения полностью совпадают со статическим вариантом уравнений работы [1].

Интегрирование выведенных дифференциальных уравнений должно производиться с учетом граничных условий на кромках контура оболочечной конструкции, которые представлены контурными интегралами в построенном нами полном вариационном уравнении. Для краев $x=0$ и $x=a$ контурный

интеграл имеет вид:
$$\int_0^a \{N_1 \delta U + N_{12} \delta V + Q_1 \delta W + M_1 \delta \psi_1 + M_{12} \delta \psi_2\} dy.$$

Контурные интегралы вариационного уравнения позволяют сформулировать по пять граничных условий для каждого края оболочки. Согласно приведенному

контурному интегралу на краях $x=0$ и $x=a$ заданными должны быть:

- перемещения точек контура срединной поверхности в направлении оси OX $U = U^0$ или величина внешнего продольного усилия $N_1 = N_1^0$;

- перемещения точек контура срединной поверхности вдоль оси OY $V = V^0$ или внешнее касательное усилие $N_{12} = N_{12}^0$;

- нормальное плану оболочки перемещение точек контура $W = W^0$ или величина внешнего поперечного усилия

$$Q_1 = (\partial W / \partial x) N_1 + (\partial W / \partial y) N_{12} + 0,3(1 - \mu) k^4 (\psi_1 + (\partial W / \partial x)) / K^2 = Q_1^0;$$

- угол поворота элемента нормали вокруг оси OX $\psi_1 = \psi_1^0$ или изгибающий момент $M_1 = M_1^0$;

- угол поворота элемента нормали вокруг оси OY $\psi_2 = \psi_2^0$ или крутящий момент $M_{12} = M_{12}^0$.

Так в случае шарнирно-неподвижного закрепления краев $x=0$ и $x=a$ на этих краях должны выполняться условия $U=V=W=M_1=\psi_2=0$.

Решая задачу об отыскании напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочки с использованием метода Бубнова-Галеркина, аппроксимируем составляющие перемещения, как и при расчетах с использованием кинематической модели Кирхгофа-Лява, удовлетворяющие граничным

условиям шарнирно-неподвижного закрепления по всему прямоугольному контуру, двойными рядами по синусам, а функции ψ_1 и ψ_2 выражениями вида

$$\psi_1 = \sum_{m,n} D_{mn} \text{Cos}(m\pi x/a) \text{Sin}(n\pi y/b);$$

$$\psi_2 = \sum_{m,n} E_{mn} \text{Sin}(m\pi x/a) \text{Cos}(n\pi y/b).$$

Для апробирования предложенного вида аппроксимирующих функций нами были решены задачи в линейной постановке по определению НДС оболочек постоянной толщины от действия равномерной нагрузки перпендикулярной плану оболочки, как с использованием кинематической модели типа Тимошенко, учитывающей поперечные сдвиги, так и с использованием кинематической модели Кирхгофа-Лява. Проведенные расчеты показали, что предложенные аппроксимирующие функции нормально работают и что учет поперечных сдвигов ведет к некоторому увеличению как прогибов, так и напряжений. Нет сомнения, что при решении задач термоупругости в нелинейной постановке и особенно при решении задач устойчивости оболочек такие расхождения будут существенными.

Литература

Вольмир А.С. Нелинейная динамика пластинок и оболочек./М.: Наука, 1967.

РЕШЕНИЕ ОДНОМЕРНОЙ ЗАДАЧИ УПРУГОЙ ДИФФУЗИИ ДЛЯ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА

Давыдов С.А., Земсков А.В., Лебедев А.И., Тарлаковский Д.В.

(Москва)

Рассматривается задача упругой диффузии для двухкомпонентного полупространства. Предполагается, что физико-механические процессы в среде являются одномерными и описываются геометрически линейной моделью упругой диффузии без учёта температурных эффектов [1, 2].

Для решения задачи применяется редукция к нулевым граничным условиям. Далее последовательно используется интегральное преобразование Фурье по пространственной координате Лапласа по времени. В результате исходная задача сводится к системе трёх уравнений относительно изображений Фурье-Лапласа искомым функций. Из этих уравнений получаем решение редуцированной задачи в изображениях. Для перехода к оригиналам изображения раскладываются на элементарные дроби, для обращения которых используются таблицы операционного исчисления и численный алгоритм обращения преобразования Фурье, основанный на применении квадратурных формул Симпсона и Филона.

Рассмотрены примеры для случаев, когда диффузионный поток на границе постоянен или затухает по экспоненциальному закону.

Численные расчёты проведены в среде Maple 17.

Полученные результаты представляют собой теоретическую основу для анализа напряжённо-деформированного состояния в авиационных и космических конструкциях, работающих в условиях многофакторных внешних воздействий.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ для молодых российских ученых и ведущих научных школ (код проекта НШ-2029.2014.8) и финансовой поддержке РФФИ (проект 14-08-01161 А).

Литература

1. Гачкевич А.Р., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Линейная модель связанной термоупругости с учётом диффузии для неоднородных анизотропных сред. Материалы XVII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г.Горшкова. Т.2. - М.: ООО «ТР-принт», 2011, с. 96-106

2. Еремеев В.С. Диффузия и напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 182 С.

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ КУПОЛЬНОГО И КАРКАСНОГО ТИПА ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Дмитриев В.Г., Болтунова М.А., Роффе А.И., Судьин А.А.

(Москва)

При исследовании особенностей переходных процессов в несущих элементах строительных конструкций весьма актуальной с точки зрения практических приложений является проблема корректного определения ускорений в заданных точках конструкций (местах установки различного оборудования, жилых помещений и т.д.). Это вызывает необходимость разработки как адекватных математических моделей, описывающих процессы нелинейного деформирования железобетонных строительных конструкций при статических и динамических воздействиях, так и экономичных численных методов решения соответствующих дискретных задач. Рассматриваются купольные и каркасные железобетонные строительные конструкции, установленные в общем случае на амортизированном фундаменте. Конструкции в процессе эксплуатации могут испытывать воздействие комплекса статических и динамических нагрузок различного характера: собственный вес, вес

оборудования, снеговая и ветровая нагрузка, сейсмические волны и т.д. Для описания напряженно-деформированного состояния используются соотношения пластин и оболочек Тимошенко, позволяющие учесть пониженную сдвиговую жесткость железобетонного пакета. Кроме того, уравнения движения в рамках модели Тимошенко, относящиеся к гиперболическому типу, описывают распространение как волн деформации координатной поверхности, так и изгибно-сдвиговых волн. Для учета геометрической нелинейности используются соотношения теории среднего изгиба, а для описания упруго-пластической работы армирующих элементов используются соотношения деформационной теории пластичности.

Дискретизация по пространственным и временной координате осуществляется методом конечных разностей. Дифференциальные операторы заменяются разностными второго порядка аппроксимации. Использование вариационно-разностного метода позволяет построить консервативные разностные схемы при сохранении дивергентной формы исходных уравнений. Для решения статических задач используется квазидинамическая форма метода установления, что позволяет построить единую разностную схему для решения статических и динамических начально-краевых задач. При этом результаты решения статической задачи используются в качестве начальных условий при решении нестационарных задач.

При вычислении ускорений с помощью формул численного дифференцирования возникают проблемы, обусловленные особенностями машинной арифметики. Поскольку численное решение как для перемещений, так и для скоростей строится на основе явной двухслойной разностной схемы второго порядка точности $O(\Delta t^2)$, то значения ускорений могут быть определены с помощью центральных конечных разностей на шаге Δt . В связи с тем, что устойчивость разностных схем для рассматриваемого типа жестких уравнений обеспечивается при значениях шага по времени порядка $\Delta t = (10^{-7} \div 10^{-8})$ с, ошибки округления приводят к потере точности при вычислении ускорений. Одним из путей решения данной проблемы является использование процедуры сплайн-интерполяции для аппроксимации численных результатов. Сеточные функции скоростей, полученные в процессе решения нестационарной задачи, аппроксимируются на заданных временных интервалах с помощью кубической сплайн-интерполяции, что позволяет далее вычислять значения ускорений по аналитическим выражениям без использования процедуры численного дифференцирования. Результаты проведенных тестовых расчетов показали достаточно высокую эффективность разработанной процедуры вычисления ускорений в несущих элементах строительных конструкций при различных видах динамических воздействий, включая сейсмические.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 13-01-00434а) и при содействии Департамента строительства Краснодарского края.

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАССИВНЫХ СЛАБОСЖИМАЕМЫХ ТЕЛ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ И ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Дмитриев В.Г., Жаворонок С.И., Москвитин Г.В.

(Москва)

Поставлена задача восстановления интегральной жесткостной характеристики «Усилие-перемещение» резинометаллических амортизаторов, искаженной вследствие старения резиновых элементов в течение полного цикла эксплуатации, путем механической обработки изделия (снятия слоя материала путем механической обработки). Исходными данными являются геометрические размеры изделия и интегральные жесткостные характеристики в начальном состоянии и по прошествии полного цикла эксплуатации. Результатом решения поставленной задачи являются геометрические размеры доработанных резиновых деталей изделия.

Изложены теоретические основы решения задачи на базе различных моделей несжимаемой, слабосжимаемой и сильносжимаемой (пористой) резиноподобной среды.

Проведено решение нелинейной задачи теории упругости слабосжимаемого материала для резинового массива изделия. Построена конечно-элементная модель изделия. На основе сравнения конечно-элементного решения задачи для изделия в исходном состоянии с экспериментальными данными получены физические константы материала. Получены интегральные кривые «Усилие-деформация» для различных геометрических размеров изделия после механической обработки и предложены новые геометрические размеры, при соблюдении которой жесткостные характеристики соответствуют исходному состоянию. Путем сравнения построенных кривых с диаграммой деформирования изделия в исходном состоянии сделан выбор геометрических параметров доработки изделия, позволяющих соответствовать исходным жесткостным параметрам на $2/3$ и удовлетворительно соответствовать на $3/4$ длины дуги деформирования.

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗГИБАЕМЫХ КОНСТРУКЦИЙ, УСИЛЕННЫХ КОМПОЗИТНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Дмитриев В.Г., Салатов Е.К.

(Москва)

Приоритетным направлением современных научных исследований является применение в строительстве и машиностроении, в том числе, при реконструкции (усилении) новейших конструкционных композитных материалов. В качестве усиливающих элементов конструкций наряду с традиционным (изотропным) материалом, таким как сталь, начали применяться композиционные материалы с заранее прогнозируемыми свойствами, наилучшим образом соответствующие требуемым условиям эксплуатации. Применение композитных материалов в металлических конструкциях для повышения их несущей способности и надежности, сниженных в процессе эксплуатации, или при необходимости увеличения эксплуатационных нагрузок, может быть рекомендовано в следующих случаях:

- отсутствует возможность разгрузить конструкцию перед усилением;
- имеются тонкостенные усиливаемые элементы (не допускается утяжеление, появление дополнительных сварочных остаточных напряжений и деформаций, имеется опасность прожога элементов);
- имеется опасность появления трещин при сварке;
- не допускается снижение усталостной прочности из-за появления дополнительных сварочных концентраторов напряжений;
- имеет место стесненность и относительная недоступность зон усиления;
- усиливаемая конструкция эксплуатируется во взрыво- и пожароопасных условиях.

В строительстве, в частности в мостостроении, особый интерес представляет возможность оперативного усиления изгибаемых (балочных) конструкций композитными элементами в условиях эксплуатации в труднодоступных отдаленных районах, в том числе при значительных низких температурах.

В качестве основных преимуществ такого усиления являются:

- отсутствие существенного увеличения собственного веса конструкции и ее деформативности;
- возможность применять в наиболее напряженных зонах усиливаемых сечений композитные материалы с контролируемой деформативностью;
- возможность применения композитных элементов усиления с одновременным предварительным напряжением конструкции;

- возможность релаксации местных напряжений и поперечного выпучивания элементов;
- повышение сейсмостойкости усиливаемой конструкции;
- значительная коррозионная устойчивость композитных элементов;
- отсутствие размерных ограничений элементов усиления;
- высокая скорость и низкая трудоемкость работ по усилению;
- практически полное сохранение внешнего вида элемента сооружения, имеющего архитектурную или историческую ценность.

Технологически усиление конструкций производится композиционными лентами, панелями (ламелями) или холстами. Технические характеристики композиционных материалов и их компонентов достаточно различаются у разных производителей. Кроме того, характеристики деформативности у композитных элементов – полос (ламелей) и холстов значительно отличаются в зависимости от структуры, направления волокон, толщин.

Для усиления металлических конструкций в основном применяются композитные элементы на основе арамидных и углеродных волокон с модулем упругости, равным или минимально отличающимся от модуля упругости материала усиливаемого стального элемента и максимально высокой прочности. Для изгибаемых конструкций усиление производится путем установки композитных элементов в пролетной части элемента со стороны наиболее растянутого волокна или для усиления сжатой зоны. Установка композитных элементов производится после соответствующей обработки поверхности металла и нанесения адгезионного слоя - монтажного эпоксидного клея.

Среди известных видов усиления металлических балок, в большей степени это касается мостовых конструкций, самым распространенным является вид усиления стальной изгибаемой конструкции, при котором ламели из композитного материала клеятся на нижнюю или/и верхнюю поверхность нижнего пояса двутавровой балки. При этом принимается, что остаточные напряжения, возникшие при предыдущей эксплуатации конструкций, полностью релаксируются и при усилении не учитываются.

Таким образом, эффективность использования композиционных материалов в сравнении с традиционными стальными элементами обусловлена более высокими прочностными характеристиками и надежностью металлических изгибаемых конструкций, усиленных композитами, в сочетании упрощением технологических процессов.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 13-01-00434а).

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ РЕЛЬСОВЫХ СТЫКОВ НА НАКОПЛЕНИЕ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КОЛЕСАХ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Евтух Е.С., Неклюдова Г.А. Сакало В.И.

(Брянск)

При перекатывании колесной пары через стыковое соединение рельсов происходит скачкообразное перемещение мгновенного центра вращения колес с отдающего конца рельса на принимающий. Это приводит к мгновенному изменению направления вектора скорости центра масс колесной пары за счет мгновенного возникновения вертикального вектора скорости, результатом чего является ударное взаимодействие колеса и рельса.

Для определения силы удара связь между силой удара и сближением соударяющихся тел воспользуемся теорией Герца с уточнением решения для сближения колеса и рельса в процессе удара на основе использования схемы контактирования конуса и цилиндра вместо контактирования тел со сферическими поверхностями. Решение уравнения вертикального движения с учётом сближения и значения импульса, дает зависимость для ударной силы.

Обработка и анализ статистических данных о величине зазоров в рельсовых стыках на железнодорожных магистралях, прилегающих к городу Брянску, показали, что распределение плотностей вероятностей величины зазоров описывается законом Вейбулла.

Для оценки долговечности колеса при движении вагона по бесстыковому рельсовому пути использованы результаты моделирования движения полувагона массой 80 тонн со скоростью 72 км/ч. Получено распределение нормальных сил, плотность вероятностей которых описывается нормальным законом распределения Гаусса.

Для определения интенсивности накопления контактно-усталостных повреждений использована кривая контактной усталости колесной стали. Рассчитана накопленная поврежденность за 1000 км пробега вагона с учетом вероятности значения возникающей при этом силы в контакте. Для скорости 72 км/ч она составила 0,033.

Из статистических данных о количестве зазоров следует, что на длине пути 722 км насчитывается 4026 стыков, тогда на длине пути 1000 км количество стыков равно 5576. Анализ решения контактных задач для колеса и рельса методом конечных элементов позволил установить размеры области, в пределах которой напряжения могут считаться повреждающими.

В связи с тем, что ударная сила зависит от зазора в рельсовом стыке, расчет накопления повреждений в колесе должен вестись с учетом вероятности значения зазора. Поврежденность, накопленная в колесе, обусловленная наездом

на рельсовые стыки на длине 1000 км, составляет $16,5 \cdot 10^{-5}$. Наличие стыков в рельсовом пути приводит к повышению интенсивности накопления повреждений на 0,5%. Накапливаемая поврежденность возрастает с увеличением зазора в рельсовом стыке и скорости движения.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ В ПРОСТРАНСТВЕННОМ ПОТОКЕ

Ермаков А.В.

(Москва)

Исследуется модельная сопряженная задача гидроупругости, в которой цилиндрическая оболочка конечного удлинения, заделанная на торцах, взаимодействует с пространственным потоком несжимаемой среды.

Разработан алгоритм и программное обеспечение для моделирования динамики цилиндрической оболочки в пространственном потоке, учитывающий процесс отрыва потока и вихреобразования в среде. Параметры среды и гидродинамические нагрузки рассчитываются с использованием бессеточного лагранжевого метода вихревых элементов [1]. Динамика оболочки моделируется методом разложения по собственным формам колебаний. Формы колебаний определяются с использованием пакета MSC Nastran.

Произведена оценка адекватности разработанного программного обеспечения на тестовых расчетах, показавшая хорошее совпадение расчетных данных и данных эксперимента [2]. Проанализированы явления, возникающие при колебаниях цилиндрической оболочки в пространственном потоке. По результатам исследования можно сделать вывод о том, что колебания цилиндрической оболочки оказывают существенное влияние на спектр нормальной силы.

Литература

1. *Щеглов Г.А.* Модификация метода вихревых элементов для расчета гидродинамических характеристик гладких тел // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2009. – №2 – С.26-35
2. *Гафуров М.Б., Ильгамов М.А.* Изгиб цилиндрической оболочки конечной длины при ее поперечном обтекании жидкостью // Прикладная механика. – 1978. – т.14, №3. С.60-67

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ ИЗ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ СВЯЗУЮЩЕГО

Ершова А.Ю., Мартиросов М.И.

(Москва)

В настоящее время широкое распространение в различных областях современной техники получили полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые часто обладают характеристиками, выгодно отличающимися от традиционных конструкционных материалов. Такие материалы открывают новые возможности, как для совершенствования уже существующих конструкций, так и для разработки новых.

Благодаря своим свойствам и механическим характеристикам одним из перспективных видов ПКМ являются мелкозернистые композиты на основе ненасыщенных полиэфиров, например, литевой искусственный камень (ЛИК). Литевая технология дает возможность изготавливать детали из данного материала практически любой сложности, в которых будут сохранены природные качества и внешний вид натурального камня. В зависимости от применяемой смолы, наполнителя, красящих пигментов можно имитировать цвет и фактуру природного камня.

Для производства использовалась тиксотропная ненасыщенная полиэфирная смола с коротким временем гелеобразования, высокой вязкостью (по Брукфильду), предускоренная, малой усадкой, низким экзотермическим пиком, средней реакционной способностью, малой эмиссией стирола, допускающей большое содержание наполнителя, имеющей ортофталевую основу. В качестве наполнителя применялись кварцевый песок, карбонат кальция и магнезия $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, гидроксид алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$, а также готовый наполнитель различных расцветок Granatex. В качестве катализатора использовался метилэтилкетон пероксид $\text{C}_8\text{H}_{16}\text{O}_4$ в сочетании с кобальтовым ускорителем.

В работе проводится экспериментальное исследование влияния процентного содержания полиэфирной смолы на механические характеристики образцов из ЛИК. Анализировались образцы с содержанием смолы 16, 18, 20 и 22%.

Эксперименты проводились на электромеханической испытательной машине INSTRON (Великобритания), модель 5960. Управление испытательной машиной осуществлялось посредством программного обеспечения INSTRON Bluehill, с помощью которого проводилось задание параметров испытания, управление системой, сбор и анализ данных, полученных в ходе работ.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ для молодых российских ученых и ведущих научных школ (код проекта НШ-2047.2012.8) и РФФИ (код проекта 12-01-00566_а).

РАСЧЕТ МИКРОПОЛЯРНЫХ УПРУГИХ БАЛОК НА КОЛЕБАНИЯ ПО МЕТОДУ КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Жамакочян К.А., Саркисян С.О.

(Гюмри, Армения)

Микрополярная теория упругих тонких балок, пластин и оболочек имеет важное значение в структурной механике.

В работах [1-3] построены общие прикладные теории динамики микрополярных упругих тонких балок, пластин и оболочек с независимыми полями перемещений и вращений. В этих работах для некоторых простейших динамических задач удалось построить в замкнутом виде аналитические решения и на их основе изучать влияние микрополярности материала на динамические характеристики колебаний балок, пластин и оболочек.

Метод конечных элементов (МКЭ) является в настоящее время наиболее универсальным и практически используемым методом решения различных трудных прикладных граничных задач, в частности, для динамических задач упругих тонких балок, пластин и оболочек в классической постановке. Можно сказать актуально, развивать применение МКЭ для решения различных динамических задач микрополярных упругих тонких балок, пластин и оболочек.

В данной работе рассматривается задачу о свободных изгибных колебаниях микрополярной упругой тонкой балки, когда на концах ее задаются различные граничные условия. Наша цель вывести матриц жесткости и масс для конечного элемента микрополярной упругой балки по общей микрополярной динамической теории изгиба с независимыми полями перемещений и вращений[3].

В качестве функции прогиба (w), полного угла поворота нормального элемента (ψ) и свободного его поворота (Ω_3) задаются нижеследующие полиномы третьей степени:

$$w(x) \cdot f(t) = (a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3) \cdot \sin \omega_n t,$$

$$\psi(x) \cdot f(t) = (b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3) \cdot \sin \omega_n t,$$

$$\Omega_3(x) \cdot f(t) = (c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3) \cdot \sin \omega_n t.$$

где $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3, c_0, c_1, c_2, c_3$ - постоянные, x - продольная координата, t - время, ω_n - круговая частота колебаний балки.

Функционал потенциальной энергии деформации для элемента микрополярной балки $[0, l]$ в статическом случае имеет вид:

$$U = \int_0^l (W - Xh\psi - Yw - m\Omega_3) dx$$

где

$$W = E \frac{h^3}{3} K_{11}^2 + h(\mu + \alpha)(\Gamma_{12}^2 + \Gamma_{21}^2) + 2h(\mu - \alpha)\Gamma_{12}\Gamma_{21} + Bhk_{13}^2.$$

Здесь W -линейная плотность потенциальной энергии деформации микрополярной балки при изгибе; K_{11}, k_{13} -кривизны оси балки; Γ_{12}, Γ_{21} -сдвиговые деформации; E, μ, α, B -упругие постоянные микрополярной балки; X, Y -внешние поверхностные нагрузки; m -внешний приложенный момент; $2h \times 1$ -размеры поперечного прямоугольного сечения балки.

В динамическом случае, на основе принципа Даламбера, вместо распределенных усилий и моментов X, Y, m будем подставить распределенные

силы инерции и моменты инерции: $-2\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}, -\frac{2h^3}{3} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}, -2Jh \frac{\partial^2 \Omega_3}{\partial t^2}$ (где ρ -линейная плотность; J -мера инерции при вращении).

Далее разработана процедура построения матрицы жесткости рассматриваемой системы; построена матрица массы конечного элемента; составлено вековое уравнение и на этой основе получены первые несколько собственных частот балки при различных краевых условиях на конечных сечениях; определены также собственные формы колебаний. В некоторых простейших случаях (а именно, когда концы балки шарнирно-опереты) сравниваются между собой численные результаты с точным решением. Полученные численные результаты анализируются с точки зрения выявления влияния микрополярных свойств материала на частоты собственных колебаний балки.

Литература

1. Саркисян С.О. Общая динамическая теория микрополярных упругих тонких оболочек // Доклады Российской академии наук. - 2011. - Т. 436. - № 2 - С. 195-198.
2. Саркисян С.О., Саркисян А. А., Общая динамическая теория микрополярных упругих тонких пластин со свободным вращением и особенности их свободных колебаний // Акустический журнал. - 2011. - Т. 57. - № 4 - С. 461-469.

3. Саркисян С.О. Математическая модель динамического изгиба микрополярных упругих тонких стержней // Доклады НАН Армении. - 2011. - Т. 11. - № 4 - С. 342-351.

О ВЫБОРЕ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ УСТОЙЧИВОСТИ НЕКОНСЕРВАТИВНЫХ СИСТЕМ

Зайкина Ж.В., Радин В.П., Щугорев А.В.

(Москва)

Поведение упругих систем при действии неконсервативных нагрузок обладает рядом специфических особенностей [1]. Основным является то обстоятельство, что при достижении критических значений у механической системы, исследуемая на устойчивость форма равновесия не имеет смежных форм. Потеря устойчивости, называемая флаттером, здесь связана с переходом к движению колебательного характера в окрестности положения равновесия. Главную роль при этом играет парное взаимодействие степеней свободы. Указанное обстоятельство обуславливает необходимость применения динамического метода исследования устойчивости. Из других особенностей неконсервативных задач можно указать следующие. При действии нагрузок различного характера область устойчивости в пространстве параметров для неконсервативных систем может быть невыпуклой, а в некоторых случаях и неоднозначной. Для неконсервативных систем также характерно необычное влияние демпфирования, обуславливающее так называемый дестабилизирующий эффект. В нелинейной системе после динамической потери устойчивости могут устанавливаться предельные циклы, а в системах, имеющим фазовое пространство размерностью выше двух, могут происходить более сложные движения, такие как квазипериодические и детерминированный хаос.

В настоящей работе рассматривается еще один не менее важный с практической точки зрения вопрос, а именно выбор расчетной схемы при исследовании механической системы, находящейся под действием неконсервативных нагрузок. Некоторые упрощения, связанные со схематизацией упругих и инерционных свойств могут привести к существенным ошибкам при определении критических значений неконсервативных нагрузок, а в некоторых случаях к некорректным трактовкам и терминологии [2]. Все рассуждения проводятся на задаче об устойчивости положения равновесия стержня длиной l , жесткостью на изгиб EI и погонной массой m , защемленного на одном конце, с прикрепленным твердым телом на другом. Обозначим массу тела через M , момент инерции относительно оси, лежащей в плоскости сечения, где стержень крепится с телом через J . Для момента

инерции примем соотношение $J = \gamma M l^2$. На твердое тело действует сжимающая следящая сила, направление которой совпадает с касательной к кривой изгиба на конце стержня. Рассматриваются различные варианты схематизации системы. Уравнение и граничные условия динамического метода для указанной системы относительно отклонений от прямолинейной формы равновесия $w(\xi, \tau)$ записываются в виде

$$\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} + \beta^2 \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} + m \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} = 0,$$

$$w = 0, \quad \frac{\partial w}{\partial \xi} = 0, \quad (\xi = 0), \quad \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} = -\gamma \mu \frac{\partial^3 w}{\partial \xi \partial \tau^2}, \quad \frac{\partial^3 w}{\partial \xi^3} = \mu \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2}, \quad (\xi = 1).$$

Здесь введены безразмерные параметры

$$\xi = \frac{x}{l}, \quad \tau = \omega_* t, \quad \omega_* = \frac{1}{l^2} \sqrt{\frac{EI}{m}}, \quad \beta^2 = \frac{Pl^2}{EI}, \quad \mu = \frac{M}{ml}$$

В предположении, что масса прикрепленного тела M много больше, чем масса стержня ml и является сосредоточенной ($\gamma = 0$) получим систему с одной степенью свободы. В этом случае исследование устойчивости сводится по существу к построению зависимости частоты колебаний от параметра следящей нагрузки $\omega(\beta)$. Эта зависимость монотонно неограниченно возрастает и имеет вертикальную асимптоту при $\beta_*^2 = 20,19$. Затруднительно представить поведение системы при $\omega \rightarrow \infty$. Тем не менее в работе [2] предлагается назвать это явление «динамической дивергенцией» и считать ее как «отдельный динамический тип потери устойчивости». Однако на наш взгляд расчетная схема реальной механической системы, представленная в виде системы с одной степенью свободы, является несостоятельной для описания динамической потери устойчивости (флаттера) положения равновесия при действии неконсервативных нагрузок. Рассмотренный выше пример изложен в монографии [1] исключительно для иллюстрации неприменимости статического метода исследования устойчивости при действии неконсервативных нагрузок. Все недоразумения исчезают, если учесть момент инерции присоединенного тела любой конечной величины. Система уже имеет две степени свободы. Критическое значение следящей силы определяется слиянием частот, определяя тем самым частоту флаттера – частоту колебаний при динамической потере устойчивости. Проведено исследование зависимости β_*^2 от величины γ , характеризующего величину момента инерции присоединенного тела.

Далее определение критических значений следящей силы проводится с учетом распределенной массы стержня. Для уменьшения числа варьируемых

параметров принято, что стержень имеет круговое поперечное сечение диаметра d , а прикрепленное тело – форму шара. Материал стержня и тела одинаков. Тогда параметр μ , т.е. отношение масс тела и стержня, будет определять и параметр γ . Дополнительным параметром при вычислениях также принималось отношение d/l , характеризующий гибкость стержня. Как показали многочисленные вычисления, замена системы с распределенной массой системой с двумя степенями свободы может дать большую ошибку в вычислении критического значения следящей силы, особенно для систем большой гибкости.

Литература

1. Болотин В.В. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. – М.: Физматгиз, 1961. – 339 с.
2. Каган-Розенцвейг Л.М. Устойчивость равновесия неконсервативных стержневых систем. – Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. М., 2012. 34 с.

РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ГРАНУЛООБРАЗОВАНИЯ В ПРОЦЕССАХ ДОГРАНУЛИРОВАНИЯ РАСПЛАВАМИ, РАСТВОРАМИ, СУСПЕНЗИЯМИ И ПОРОШКАМИ

Захаров М.К., Морозов Р.В., Семченко М.С., Таран А.В., Таран А.Л. Таран Ю.А.

(Москва)

Процесс послойного нанесения исходного или иного продукта (продуктов) на поверхность гранул внешнего ретурга, реализуемый по технологии окатывания называется “fattening”. Наносимый состав может быть в форме расплава, раствора, суспензии, эмульсии, порошка, применяемого с использованием связующего или без него в аппаратах барабанного, тарельчатого, реже - другого типа [1, 2]. Технология использовалась нами для решения различных задач: придания поверхности требуемых свойств перед последующим капсулированием, упрочнения гранул, для введения добавок, создания многослойных гранул с управляемым выделением компонентов, а также – для укрупнения грансостава. Во всех случаях важно знать динамику изменения грансостава.

В настоящей работе нами было составлено математическое описание процесса догранулирования и предложена методика расчета изменения распределения гранул по размерам в результате процесса догранулирования и построения кривых распределения гранул по размерам и массе.

Изменение текущей массы гранул массой M во времени τ в аппарате равно:

$$\frac{\partial M(m)}{\partial \tau} = M_z(m) - M_{zn}(m) + \Delta_+ M(m) - \Delta_- M(m) \quad (1)$$

где $M_r(m)$ – массовый расход гранул массой от 0 до m , поступающих в аппарат с исходным ретуром; $M_{rn}(m)$ – массовый расход гранул массой от 0 до m , ушедший из аппарата с догранулированным ретуром (продуктом); $\Delta_+ M(m)$ – массовый расход прироста массы гранул массой от 0 до m за счет их роста при догранулировании с безразмерной скоростью роста массы $\cdot \Delta_- M(m)$ – массовый расход гранул, масса которых в результате роста стала больше (m) и они «выбыли» из пространства масс, принадлежащего интервалу 0- m .

После подстановки Известных соотношений в уравнение (1) получим:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} [M \cdot F(m)] = G_z F_z(m) - G_{zn} F_{zn}(m) + M \int_0^m \bar{v}(m') \frac{dF(m')}{dm'} dm' - \\ - M \bar{v}(m) \frac{dF(m)}{dm} m \end{aligned} \quad (2)$$

В стационарном случае (после выхода на режим непрерывного процесса)

$\frac{dM}{d\tau} = 0$ и $G_r(1+\lambda) = G_{rp}$, тогда:

$$\frac{1}{(1+\lambda)\tau} F_z(m) - \frac{1}{\tau} F(m) + M \int_0^m \bar{v}(m') \frac{dF(m')}{dm'} dm' - M \bar{v}(m) \frac{dF(m)}{dm} m = 0 \quad (3)$$

Продифференцируем уравнение (3) по (m). Тогда получим дифференциальное уравнение для расчета плотности распределения на момент выхода процесса догранулирования на стационарное распределение по массе:

$$\begin{aligned} \frac{1}{(1+\lambda)\tau} f_z(m) - \frac{1}{\tau} f(m) + \bar{v}(m) f(m) - \frac{d}{dm} [\bar{v}(m) \cdot f(m) \cdot m] = 0 \Rightarrow \\ \frac{1}{(1+\lambda)\tau} f_z(m) - \frac{1}{\tau} f(m) - m \frac{d}{dm} [\bar{v}(m) f(m)] = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

где λ – степень догранулирования исходного ретура, \bar{v} – среднее время пребывания гранул в аппарате, \bar{v} – безразмерная скорость роста массы гранул.

Предложено, также, уравнение для расчета динамики изменения распределений по массе при выходе процесса на стационарный режим.

$$\frac{dF(m)}{d\tau} = \frac{1}{(1+\lambda)\tau} F_z(m) - \frac{1}{\tau} F(m) + \int_0^m \bar{v}(m') \frac{dF(m')}{dm'} dm' - \bar{v}(m) \frac{dF(m)}{dm} m \quad (5)$$

Для выполнения расчетов уравнения (3)-(5) записывали в разностной форме и создавалась программа для расчета и построения интегральных и

дифференциальных функций распределения гранул различных веществ по массе в процессе догранулирования.

Расчет по приведенным выше уравнениям даст хорошее совпадение с экспериментом на лабораторной установке для догранулирования по технологии “fattening”.

Литература

1. Таран А.Л. Теория и практика процессов гранулирования расплавов и порошков // Дисс. д-ра техн. наук. М.: МИТХТ, 2001. – 487 с.

2. Классен П.В., Гришасв И. Г. Основные процессы технологии минеральных удобрений. // М.: Химия, 1990, 304 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОДОЛЬНОГО УДАРА О ЖЕСТКУЮ ПРЕГРАДУ ЦИЛИНДРА ИЗ ПОРИСТОГО МЕТАЛЛА

Иванов В.А., Кибец А.И., Кибец Ю.И., Шошин Д.В.

(Нижний Новгород, Саров, Чебоксары)

В докладе рассматривается нелинейная задача нестационарного деформирования пористых металлов. Излагается методика численного решения и результаты ее верификации на тесте Тэйлора.

Определяющая система уравнений формулируется с позиций механики сплошных сред с применением текущей лагранжевой формулировки [1]. Уравнение движения выводится из баланса виртуальных мощностей. В качестве уравнений состояния для металлов используются соотношения теории течения с кинематическим и изотропным упрочнением. Деформирование пористого металла описывается двухуровневой моделью [2] континуально однородной, ортотропной, физически нелинейной среды. Приведенные (осредненные) характеристики этой среды определяются на основании численного или экспериментального анализа деформирования и разрушения типовых блоков (представительных объемов) с учетом их структуры. Контакт цилиндра и преграды описывается условиями непроникания, допускающими отрыв поверхностей друг от друга и повторное вступление в контакт [3]. Определяющая система уравнений, дополняется начальными условиями и кинематическими граничными условиями.

Для решения задачи применяется метод конечных элементов и явная конечно-разностная схема интегрирования по времени типа «крест» [1]. Шаг интегрирования по времени определяется из условия устойчивости Куранта. Для решения задачи контакта деформируемых тел на несогласованных конечно-элементных сетках используется алгоритм [3] интерполяции узловых полей скоростей перемещений с одной сетки на другую, основанный на законах

сохранения массы, количества движения и моментов количества движения. Программная реализация конечно-элементной методики осуществлена в рамках вычислительного комплекса «Динамика-3» [4,5].

На основе изложенной методики выполнено численное моделирование продольного удара о жесткую стенку цилиндрического образца из объемно-перфорированного алюминиевого сплава Д16Т (тест Тейлора) [6]. Вычислительные эксперименты проводились на цилиндрах с отношением длины к диаметру 2,5. В расчетах варьировалась начальная скорость удара и пористость материала (отношение плотности матрицы или сплошного металла к средней плотности пористого металла). Построены графики зависимости остаточной длины образца от начальной скорости удара и пористости материала. Достоверность полученных результатов по остаточной форме и длине образцов подтверждается данными конечно-элементного решения задачи с прямым выделением пор [6].

Работа выполнена в рамках реализации гранта Президента РФ для поддержки ведущих научных школ РФ НШ–2843.2012.8, а также при поддержке РФФИ (проекты №14-08-00656-а, 12-08-33106-мол_а_вед, 12-08-12044-офи_м).

Литература

1. *Артемяева А.А., Баженов В.Г., Кибец А.И., Лаптев П.В., Шошин Д.В.* Верификация конечно-элементного решения трехмерных нестационарных задач упругопластического деформирования, устойчивости и критического поведения оболочек//Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т.3, №2. С.5-14.

2. *Артемяева А.А., Кибец А.И., Кибец Ю.И.* Конечно-элементная методика решения трехмерных задач деформирования композитных оболочек с пористым наполнителем при динамическом нагружении//Материалы IX Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ 2012), 25-31 мая 2012 г. Алушта. – М.: Изд-во МАИ, 2012 С.295-297

3. *Баженов В.Г., Кибец А.И., Цветкова И.Н.* Численное моделирование нестационарных процессов ударного взаимодействия деформируемых элементов конструкций//Проблемы машиностроения и надежности машин.1995. № 2. С.20-26.

4. Программный продукт «Пакет прикладных программ для решения трехмерных задач нестационарного деформирования конструкций, включающих массивные тела и оболочки Динамика-3» (ППП «Динамика-3»). Сертификат соответствия Госстандарта России № РОСС RU. ME20. Н00338

5. Вычислительный комплекс «Динамика-3». Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности. Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный паспорт аттестации ПС № 325 от 18.04.2013.

6. Применение теста Тейлора для исследования динамических механических свойств высокопористого алюминиевого сплава/Г.В. Белов, А.П. Гусаров, В.А. Марков, В.И. Пусев, А.Ф. Овчинников, В.В. Селиванов, М.Ю. Сотский//Наука и образование. Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный научно-технический журнал. 2012г. №9. С.13-25. (<http://technomag.edu.ru/doc/442058.html>)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ РАВНОВЕСИЯ АНИЗОТРОПНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ С СОПРЯЖЕННЫМИ ПОЛЯМИ

Игумнов Л.А., Литвинчук С.Ю., Марков И.П.

(Нижний Новгород)

Представлены модели численного построения ядер граничных интегральных уравнений трехмерной теории упругости с сопряженными полями. Рассмотрены следующие линейные теории – анизотропной упругости, электроупругости, термоупругости, магнитоэлектроупругости и т.д. Для записи математической модели краевой задачи использована формализация, позволяющая рассматривать задачи равновесия разных теорий формально с единых позиций. Представлены примеры гранично-элементных расчетов.

Рассмотрена задача о действии осевой нагрузки на призматическое анизотропное упругое тело. Компоненты ядер интегрального уравнения строились тремя способами – прямым интегральным, интерполяционным интегральным и с помощью преобразования Фурье. Исследовались перемещения в нескольких точках, приведено сравнение с аналитическим решением.

Рассмотрено решение задачи о единичном кубе под действием одноосного растяжения или приложенного поверхностного заряда. Фундаментальные решения вычислялись аналитически по формулам для трансверсально изотропного материала и численно с помощью полиномиального подхода. Приведены значения перемещений и электрического потенциала в выбранной точке для двух пьезоупругих материалов. Представлено сравнение полученных значений с аналитическим решением и результатами других авторов.

Рассмотрена задача о распределении температуры на поверхности призматического тела. Продемонстрирована высокая степень соответствия полученных результатов результатам других авторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 12-08-00984-а, 12-01-00698-а, 13-08-00658-а, 13-08-97091_р_поволжье_а, 14-08-31410_мол_а, 14-08-00811-а).

ГРАНИЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СЛОИСТОГО ПОРОУПРУГОГО ПОЛУПРОСТРАНСТВА

Игумнов Л.А., Литвинчук С.Ю., Петров А.Н.

(Нижний Новгород)

Рассматривается слоистое полупространство в рамках модели многосвязного тела. Принимается, что граница тела кусочно-ляпуновского типа. Каждый слой (однородная часть) являются однородным телом. Динамическое состояние каждой однородной части описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных пороупругости для четырех обобщенных перемещений.

Методика построения дискретных аналогов ГИУ основана на гранично-элементном подходе к аппроксимации границы области, на обобщенных граничных перемещениях и обобщенных поверхностных силах и использовании методов численного обращения преобразования Лапласа. В качестве проекционного метода применялся метод коллокации. Гранично-элементная дискретизация рассматривается регуляризованное уравнение.

Численно решена и представлены результаты задачи о действии вертикальной силы в виде функции Хевисайда по времени на поверхность двухслойного пороупругого полупространства. Рассматривается случай, когда верхний слой является более мягким. При условии полного контакта слоев выбирались следующие краевые условия: на дневной поверхности составного полупространства на участке заданного размера действует сила, а остальная часть дневной поверхности свободна от поверхностной силы при нулевом значении порового давления на всей дневной поверхности. Исследовался динамический отклик на дневной поверхности полупространства при удалении от источника силы на заданном расстоянии. Толщина верхнего слоя принималась равной расстоянию удаления точки на дневной поверхности от воздействия. Гранично-элементная сетка на четверти геометрии состоит из 768 элементов для верхнего слоя и 384 элемента для нижнего слоя. Приведены результаты расчетов по дренированной и недренированной моделям материала с целью получения гранично-элементных оценок пороупругого решения. Дано сравнение гранично-элементных результатов с результатами других авторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 12-08-00984-а, 12-01-00698-а, 13-08-00658-а, 13-08-97091_р_поволжье_а, 14-08-31415_мол_а, 14-08-00811-а).

МЕТОД ГРАНИЧНО-ВРЕМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ШАГОВОЙ СХЕМЫ РУНГЕ-КУТТЫ

Игумнов Л.А., Ратаушко Я.Ю.

(Нижний Новгород)

Доклад посвящён развитию метода гранично-временных элементов для компьютерного моделирования динамики трёхмерных упругих и пороупругих тел. Гранично-элементная схема использует шаговый метод численного обращения интегрального преобразования Лапласа и формализм схем Рунге-

Кутты на основе таблиц Бутчера вида $\frac{c|A^T}{b^T}$, $A \in R^{m \times m}$, $b, c \in R^m$:

$$f_0 = 0, \quad f_n = b^T A^{-1} \sum_{k=1}^n \omega_k(\Delta t), \quad n = 1, \dots, N,$$

$$\omega_n(\Delta t) = \frac{R^{-n}}{L} \sum_{l=0}^{L-1} \bar{f}(p) p e^{-ml \frac{2\pi}{L}}, \quad p = \frac{\gamma(z)}{\Delta t}, \quad z = R e^{i \frac{2\pi n}{L}},$$

$$\gamma(z) = A^{-1} - z A^{-1} [I] b^T A^{-1}.$$

Возникающие шаговые гранично-элементные схемы применены для решения конкретных трёхмерных краевых задач. Рассмотрены тестовые задачи об упругой и пороупругой консолях с жёстко закреплённым концом, подвергаемых действию торцевой силы. Отклики перемещений, вызванные силой в виде функции Хевисайда, наблюдаются в средней точке приложения силы. Проведены расчёты с помощью метода гранично-временных элементов на основе шаговых схем численного обращения преобразования Лапласа на узлах метода Эйлера и метода Радо семейства Рунге-Кутты. Рассматриваются модификации схемы с постоянным и переменным шагом интегрирования для определения коэффициентов итоговой квадратурной формулы. Проводится сравнение полученных результатов с аналитическим решением.

На основе построенных графиков можно сделать вывод о применимости шаговой схемы численного обращения преобразования Лапласа на узлах методов Рунге-Кутты в рамках метода гранично-временных элементов и некотором её преимуществе перед традиционным подходом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 12-08-00984-а, 12-01-00698-а, 13-08-00658-а, 13-08-97091_р_поволжье_а, 14-08-31415_мол_а, 14-08-31410_мол_а, 14-08-00811-а).

ПРОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ ОРТОТРОПНЫХ ОБОЛОЧЕК

Карпов В.В., Семенов А.А.

(Санкт-Петербург)

В докладе приводится математическая модель деформирования подкрепленных ортотропных оболочек вращения [1]. Учитывается геометрическая нелинейность, поперечные сдвиги, сдвиговая и крутильная жесткость ребер. Математическая модель представлена в виде функционала полной энергии деформации оболочки при действии на нее поперечной механической нагрузки [2]. Приводится алгоритм исследования прочности и устойчивости оболочек, основанный на методе продолжения решения по наилучшему параметру [3]. По разработанному алгоритму составлена программа для ЭВМ.

Приводятся результаты расчета пологих оболочек прямоугольного плана, конических и цилиндрических панелей из углепластика. Результаты представлены графически в виде кривых «нагрузка – прогиб», полей прогибов и напряжений при некоторых значениях нагрузки. Для анализа прочности проводится сравнение наибольших напряжений с предельно допустимыми значениями при растяжении, сжатии и сдвиге.

По графику «нагрузка – прогиб» определяются верхние и нижние критические нагрузки. Для выявления особых точек анализируется определитель матрицы Якоби. Путем дополнительных исследований возможно нахождение точек бифуркации.

Как показали расчеты, для рассмотренных вариантов конических оболочек потеря устойчивости наступает раньше, чем потеря прочности.

Для рассмотренных конических оболочек устойчивость теряется путем «прохлопывания» конструкции с образованием симметричных вмятин вдоль образующей, количество которых после потери устойчивости изменяется. С увеличением угла разворота конической панели значение критической нагрузки уменьшается.

Для исследованных конических оболочек наибольшие значения напряжений наблюдаются в более узкой их части.

Литература

1. *Амбарцумян С.А.* Теория анизотропных пластин. – М.: Наука, 1987. – 360 с.
2. *Карпов В.В.* «Прочность и устойчивость подкрепленных оболочек вращения», В 2ч. Ч.1 Модели и алгоритмы исследования прочности и устойчивости подкрепленных оболочек вращения. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 288 с.

3. Кузнецов, Е.Б. Метод продолжения решения и наилучшая параметризация. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. – 160 с.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЖАРСТОЙКИХ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ ПОКРЫТИЙ ТИПА Me_1-Me_2-Si НА ОСОБОТУГОПЛАВКИХ ПОДЛОЖКАХ

Касаткин А.В., Терентьева В.С.

(Москва)

На базе системы Nb-(Mo;W)-Si разработаны методы синтеза самоорганизующихся покрытий на основе низших силицидов вольфрама и молибдена. С точки зрения термомеханических свойств наилучшей системой теоретически является диффузионный слой, представляющий непрерывный ряд твердых растворов. Такой слой можно сформировать при температурах порядка 2000°C. В основном, жаростойкие композиции представляют собой многофазные системы, состоящие из последовательно расположенных слоев химических соединений в ограниченных твердых растворах. Процесс нанесения жаростойких покрытий следует вести таким образом, чтобы общую структуру твердого раствора кремния в системе молибден-вольфрам формировать на определенную глубину, а затем превратить данный слой в фазу $(Mo-W)_5Si_3-Me_3Si$. Пропорцию толщин всех образующихся фаз можно изменить таким образом, что в значительной мере покрытие будет приближаться к структуре слоя с непрерывным рядом твердых растворов. Такое покрытие принципиально отличается от получаемых на практике и представляющих фактически однофазные слои. При относительно высоких температурах включается механизм самозалечивания образующихся в процессе эксплуатации микродефектов покрытия. К физико-химическим свойствам пленок, определяющих их «самозалечивание», относятся вязкость, поверхностное натяжение, диффузия, температура плавления, скорость граничных химических реакций, испарение или летучесть. Чем шире температурный интервал оптимальных значений вязкости материала, тем лучше самозалечивающие свойства покрытия. Например, пленка SiO_2 , на молибдене с покрытием $MoSi_2$ имеет интервал самозалечивания от 800°C до температуры плавления эвтектики $MoSi_2-Mo_5Si_3$, равной 1900°C. В случае изучаемой системы этот интервал должен быть выше вследствие более высокой температуры плавления эвтектики $Mo(W)Si_2-Mo(W)_5Si_3$, превышающей 2200°C. Образование подобных структур в совокупности с эффектом самозалечивания придает покрытию в процессе эксплуатации самоорганизующие свойства. В настоящей работе на базе покрытий системы Nb-(Mo;W)-Si получен ряд самоорганизующихся структур и

исследована их жаростойкость при высокотемпературном окислении на воздухе в интервале температур 1400 – 1900°C.

Покрyтия системы Nb-W-Si получали в две стадии. На первой стадии на поверхность образцов из ниобия методом химического газофазного осаждения (CVD) наносили слой вольфрама толщиной от 50 до 120 мкм. Газофазное осаждение проводили в смесях водорода и гексофторида вольфрама при температурах 500 – 600°C. На второй стадии проводили силицирующую термообработку полученной композиции Nb-W, для чего образцы помещали в контейнер из тугоплавкого материала, заполненный порошком элементарного кремния (размером частиц от 1 до 5 мм) с добавлением галогенидного активатора – до 5% от массы загрузки. Термообработку проводили в вакуумной электропечи при температуре порядка 1200°C в течение 5 – 10 часов (в зависимости от требуемой толщины покрытия) в вакууме не хуже 0,1 Па. В результате общая толщина полученных покрытий системы Nb-W-Si составляла, в зависимости от режимов, от 140 до 250 мкм.

Покрyтия системы Nb-Mo-Si получали в две стадии. На первой стадии на поверхность образцов из ниобия методом плазменного напыления наносили слой молибдена. Затем, на второй стадии, проводили силицирующую термообработку полученной композиции Nb-Mo по той же технологии силицирования, что и при получении покрытий системы Nb-W-Si. Общая толщина полученных покрытий системы Nb-Mo-Si составляла, в зависимости от режимов, от 70 до 120 мкм.

Покрyтия системы Nb-(Mo;W)-Si получали в три стадии. На первой стадии на поверхность образцов из ниобия методом плазменного напыления наносили слой молибдена. Затем, на второй стадии на поверхность полученной композиции Nb-Mo методом CVD наносили слой вольфрама толщиной порядка 100 – 120 мкм. На третьей стадии проводили такую же силицирующую термообработку, как и в случае выше описанных систем. Общая толщина полученных покрытий системы Nb-(Mo;W)-Si составила порядка 230 – 250 мкм.

Для исследования и сравнения жаростойких характеристик полученных защитных покрытий образцы подвергали высокотемпературному окислению в атмосфере воздуха в интервале температур горячей (изотермической) зоны 1400 – 1900°C. Определялась длительность защитного действия покрытий указанных систем при сопоставимых температурах, характер оксидообразования и разрушения при различных температурах, влияние скоростей нагрева и охлаждения на термостойчивость и т.п.

Испытания проводили методом нагрева образцов прямым пропуском электрического тока. Испытуемые образцы по очереди помещали в камеру нагрева, закрепляя между подвижным и неподвижным водоохлаждаемыми токоподводами. Зазор между электродами, определяющий размер рабочей зоны,

устанавливали в интервале 40 – 55 мм, в зависимости от длины образца. Нагрев до заданной температуры осуществлялся в атмосфере воздуха, в условиях его свободной конвекции (без защитного колпака), скорость нагрева и охлаждения регулировалась в ручном режиме. Температура изотермической выдержки поддерживалась с точностью $\pm 10^\circ$ в интервале 1400 – 1800°C, и $\pm 20^\circ$ при температурах выше 1800°C, окисление на изотерме вели до разрушения образца. Специальное термоциклирование не проводилось, длительность изотермических выдержек определялась характером поведения образца (явные признаки разрушения, появление дефектов), техническими возможностями установки, графиком работы обслуживающего персонала.

Температура определялась пирометром спектрального отношения СПЕКТРОПИР 6 в режиме автоматического измерения и регистрации в пределах 1200 – 2200°C. Принцип действия пирометра СПЕКТРОПИР 6 основан на измерении отношения интенсивности излучения нагретого тела в двух участках спектра. Это отношение однозначно определяет цветовую температуру нагретого тела. Цветовая температура равна истинной температуре у «черных» и «серых» тел и близка к истинной температуре у многих нагретых тел с неселективным излучением. Для контроля температуры применяли также яркостные пирометры ЭОП-66 и «Проминь», использующие зависимость температуры от спектральной энергетической яркости раскаленных объектов, работающих по принципу уравнивания яркости изображения объекта с яркостью нити пирометрической лампы. В этом случае истинная температура нагретого тела связана с его яркостной температурой через коэффициент монохроматической излучательной способности материала поверхности. Данный способ контроля температуры достаточно точен на начальных стадиях эксперимента, когда известен фазовый состав поверхности испытываемого образца и, соответствующий ему коэффициент излучательной способности (в нашем случае силициды Mo, W, Nb). Однако в процессе высокотемпературного окисления на поверхности образца происходит образование оксидной пленки меняющегося фазового состава с достоверно неизвестным (изменяющимся) коэффициентом излучения, что может вносить большую погрешность в определение истинной температуры «яркостным» методом, увеличивающуюся с ростом температуры испытаний.

Особенности поведения покрытий при высокотемпературном окислении на стадиях нагрева, изотермической выдержки и охлаждения, зона и характер разрушения фиксировались визуально и с помощью оптических систем пирометров. Структурные и фазовые превращения, происходящие на различных участках покрытий в результате испытаний, толщина образующихся оксидных слоев определялись методами металлографического анализа по поперечным шлифам. Методами локального рентгеноспектрального анализа определялось

распределение элементов по профилю окисленного покрытия в «горячей» и «холодной» зонах.

ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПЛЁНОЧНО-ТКАНЕВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ В ТЕЧЕНИЕ ГОДА

Каюмов Р.А., Мангушева А.Р.

(Казань)

Излагается методика расчета длительной прочности плёночно-тканевого композиционного материала (ПТКМ) под воздействием солнечной радиации (УФ) с учетом изменения температурного поля в течение года. Рассматривается ячейка ПТКМ, которая представляет собой ткань из высокопрочных синтетических тканей и плёночного покрытия (матрицы) из эластомеров или термопластов. Последние служат для защиты армирующей основы от воздействия атмосферных факторов и придания воздухонепроницаемости материалу. В работах [1,2] предложены варианты определяющих соотношений процесса деформирования и фотодеструкции плёночного композиционного материала и рассмотрена плоская задача о долговечности представительного элемента этого материала (фактически для материала с искривленными армирующими слоями и поперечными прямолинейными волокнами). Здесь рассматривается трехмерная модель ячейки композита на основе ткани. Материалы матрицы и нитей принимаются вязко упругими, учитывается процесс накопления микроповреждений по модели Работнова-Качанова. Долговечность ПТКМ сводилась к долговечности матрицы (под ней понимается время, при котором нарушается условие прочности матрицы в какой либо точке), что было определено эксплуатационными требованиями герметичности ПТКМ. Критерий разрушения принимался, следуя работам Работнова Ю.Н., в упрощенном виде, согласно которому условию потери прочности соответствует значение параметра поврежденности, равное единице.

Приводятся результаты численных экспериментов, которые представлены в виде графиков.

Литература

1. Каюмов, Р.А. Моделирование поведения плёночно-тканевого материала при воздействии эксплуатационных факторов / Р.А. Каюмов, А.М. Сулейманов, И.З. Мухамедова // Механика композиционных материалов и конструкций. 2005. т.11. № 4. - С. 519-530.
2. Каюмов, Р.А. Деформирование представительной ячейки плёночно-тканевого композита при конечных перемещениях / Р.А. Каюмов,

В.Н. Куприянов, И.З. Мухамедова, А.М. Сулейманов, А.М. Шакирова // Механика композиционных материалов и конструкций. Том 13, 2, апрель-июнь 2007. Москва: РАН 2007. – С. 165-173.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПЛЕНОЧНО-ТКАНЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СИЛОВЫХ ФАКТОРОВ И СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ

Каюмов Р.А., Мухамедова И.З.

(Казань)

Конструкции из пленочно-тканевых материалов (ПТМ), с появлением новых полимерных материалов получили свое второе рождение. Невысокие капитальные затраты, малая материалоемкость, мобильность и быстрота монтажа сооружений из ПТМ (тентовые и пневматические конструкции) позволяют весьма эффективно использовать их в сельском хозяйстве, в освоении новых промышленных районов, в военной технике и гражданской обороне.

Анализ опыта применения мягких конструкций показывает, что в отличие от традиционных сооружений, наибольшая эффективность их использования определяется не столько максимальным, сколько экономически обоснованным оптимальным сроком службы. В связи с этим возникает проблема создания ПТМ не только с максимально возможной, но также с заранее заданной долговечностью в конкретных условиях эксплуатации. На сегодняшний день, одной из важнейших является оценка долговечности тканевых композитов с учетом старения материала под действием атмосферных факторов, температуры и ультрафиолетового облучения.

В данной работе разработана модель поведения представительных элементов пленочно-тканевых материалов при совместном воздействии силовых факторов и солнечной радиации. Разработана конечно-элементная методика расчета напряженно-деформированного состояния и долговечности представительных элементов пленочно-тканевых материалов на основе моделей поведения фаз пленочно-тканевого материала при совместном воздействии силовых факторов и солнечной радиации. Проведены численные эксперименты и выявлены закономерностей поведения ПТМ в зависимости от механических и геометрических характеристик композита.

Проведены качественные исследования закономерности влияния перепада температуры на долговечность ПТМ. В основе расчета долговечности, лежит принцип линейного суммирования повреждаемости. Построение определяющих соотношений для следующих механических параметров системы основывается на известных экспериментальных фактах, относительно полимерных

материалов.

Механические характеристики, входящие в соотношения ползучести, будут зависеть от влияния температуры. Введены функции, определяющие закон изменения механических характеристик ползучести от температуры. Модуль упругости аналогично вышесказанному, также будет зависеть от влияния температуры. Для него введена другая функция. Аналогично вышесказанному параметры поврежденности и фотодеструкции также будут функциями от температуры.

Проведены численные эксперименты. Расчеты велись в диапазоне малых деформаций, согласно построенной модели. Результаты численных экспериментов показали и ожидаемые результаты и совсем неожиданные. При увеличении предварительной деформации долговечность падает. Выявлены качественные закономерности изменения долговечности от перепада температуры. Если перепад температуры приводит к небольшим изменениям упругих характеристик и параметров ползучести, то при увеличении перепада температуры долговечность падает.

С другой стороны при достаточно больших изменениях упругих характеристик и параметров ползучести долговечность начинает увеличиваться с некоторого значения перепада температуры. Это можно объяснить тем, что материал настолько быстро размягчается для значительных перепадов температуры, что повреждаемость в материале накапливается медленнее.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-01-90715).

Литература

1. Работнов Ю.Н. *Механика деформируемого твердого тела* / - М.: Наука, 1988. - 712 с.
2. Каюмов Р.А. *Структура нелинейно-упругих соотношений для сильно анизотропного слоя тонкой оболочки // Механика композитных материалов.* - 1999.- Т.35, № 5. - С.615-628.
3. Сегерлинд Л. *Применение метода конечных элементов* / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979.-392 с.

ОЦЕНКА ОСАДКИ И НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГОФРИРОВАННОЙ ПОЛИЭТИЛЕНОВОЙ ТРУБЫ В ГРУНТЕ

Каюмов Р.А., Шакирзянов Ф.Р.

(Казань)

Проводится оценка осадки и предельной нагрузки полиэтиленовой гофрированной трубы низкого давления, находящейся в грунте, под действием внутреннего давления и температурного воздействия.

Связь деформаций и перемещений считается линейной, используются соотношения Коши. Для оценки прочности полиэтилена используется критерий Мизеса, а в качестве критерия прочности грунта принимается критерий Друккера-Прагера [1], записываемый в форме:

$$F = \alpha J_1 + \sqrt{J_2} - K = 0.$$

Оценка предельной нагрузки и осадки системы проводятся по теории упруго-вязко-пластического деформирования с учетом дилатансии и влияния температуры. Полная деформация определяется выражением:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^c + \varepsilon_{ij}^T.$$

Пластичность грунта описывается ассоциированным законом течения [2]:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}.$$

Ползучесть грунта учитывается на основе теории течения с упрочнением, в которой тензор скорости деформаций ползучести имеет вид:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^c = \frac{\mu \sigma_0^\alpha}{1 + A_1 \varepsilon_0^c} \delta_{ij} + \frac{\eta \sigma_i^\beta}{1 + A_2 \varepsilon_i^c} H^{ijkl} \sigma_{kl}.$$

Упругие деформации ε_{ij}^e определяются из нелинейных соотношений:

$$\varepsilon_{ij}^e = \left(\frac{1}{3K} - \frac{1}{2G} \right) \sigma_0 \sigma_{ij} + \frac{1}{2G} \sigma_{ij}$$

и принимаются в виде дробно-линейного соотношения, предложенного С.П. Тимошенко [3].

В полиэтиленовых трубопроводах водоснабжения температурные деформации определяются из закона линейного температурного расширения в виде:

$$\varepsilon_{ij}^T = \alpha_{ij} \Delta T.$$

Так как уплотнение и разуплотнение грунта непосредственно связаны с изменением его пористости, то зависимость коэффициента пористости грунта от сжимающего напряжения принята в виде:

$$e = e_0 \left(1 + \frac{e_1 \varepsilon_0}{1 + e_2 \varepsilon_0} \right).$$

При моделировании процессов деформирования грунта учитывается и дилатансия, т.е. изменение объема грунта от сдвига. Объемная дилатансионная часть деформации, вызванная сдвигом, записывается в виде:

$$\varepsilon_0^d = \frac{d_1 \gamma_i}{1 + d_2 \gamma_i}.$$

Пределы прочности при разных температурах T находятся с помощью формулы линейной аппроксимации:

$$\sigma_{\text{прочн}}(T) = \Delta T \cdot \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\text{прочн}}(T_0),$$

$$\sigma_{\Delta T} = \frac{[\sigma_{\text{прочн}}(T_0) - \sigma_{\text{прочн}}(T_1)]}{(T_1 - T_0)}.$$

Задача отыскания НДС системы грунт-конструкция решается методом последовательных догрузений [4], в котором на всех шагах нагружения решается уравнение равновесия в приращениях:

$$\begin{aligned} \iiint_V \{\Delta \varepsilon\}^T [D_{ep}] \{\delta \varepsilon\} dV &= \iiint_V \{\Delta Q\}^T \{\delta u\} dV + \iint_S \{\Delta P\}^T \{\delta u\} dS + \\ &+ \iiint_V \{\Delta \varepsilon^c\}^T [D] \{\delta u\} dV + \iiint_V \{\Delta \varepsilon^d\}^T [D] \{\delta u\} dV + \iiint_V \{\Delta \varepsilon^T\}^T [D] \{\delta u\} dV. \end{aligned}$$

где $[D_{ep}]$ – упруго-пластическая матрица.

В качестве примера рассмотрена задача оценки прочности трубопровода из полиэтилена, закрепленного на неподвижных опорах и находящегося в грунте. Для выявления закономерностей влияния геометрических и механических характеристик на предельную нагрузку и осадку системы проводятся численные эксперименты на базе разработанного авторами комплекса программ МКЭ. Исследуется влияние температуры на предельную нагрузку. Делаются выводы об эффективности использования законцовки вращающейся относительно оси параллельной оси z самолета.

Литература

1. *Drucker D.C., Prager W.* Soil mechanics and plastic analysis or limit design, Q. Appl. Math., 10, 1952. – P. 157-165.
2. *Качанов Л.М.* Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
3. *Работнов Ю.Н.* Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
4. *Каюмов Р.А., Шакирзянов Ф.Р., Шевченко С.Ю.* Оценка несущей способности системы конструкция-грунт // Изв. Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – Казань: Изд-во КазГАСУ, 2012. – № 4(22).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОСТЕЙ С ДЕФИЦИТОМ CU

Кириллова Э.Р., Саченков О.А., Харсиламова Л. У., Шамсутдинова Н.Г.

(Казань)

Механические свойства костей определяются их разнообразными функциями, а так же биологическими условиями; кроме двигательной, они выполняют защитную и опорную функции. Так как кость является живым организмом и механические свойства её изменяются со временем, в зависимости от среды обитания, питания и возраста объекта кость может как и упрочняться так и терять свои несущие способности. В настоящей работе производится исследование механических и прочностных свойств кости, подверженных диетой с нехваткой Cu. В рамках исследования испытывались кости крыс: бедренные кости испытывались на изгиб, позвонки подвергались испытаниям на сжатие.

Проксимальные участки бедренной кости закреплялись в стаканах с помощью сплава Вуда и устанавливаются на опору траверсы, изгиб производился через жесткую нить, прикрепленной одним концом ко второй траверсе, при испытаниях верхняя траверса перемещалась вверх, тем самым изгибающая кость. Перед испытанием кости производился замер для каждого образца: вес, объем. После установки образца в крепеж производился замер рабочей длины, диаметра кости. После испытаний замерялась толщина кости. Для испытаний на сжатие также производились замеры объема и массы образцов, размеров позвонка.

Проводились испытания на серии крыс, которые подвергались диете с нехваткой Cu в течении 2, 4, 6, 8 недель и потом подвергались восстановительной диете в течении 2, 4, 6 и 8 недель, а также контрольная группа. Результаты показали зависимость механических и прочностных характеристик от длительности нехватки Cu в организме.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №13-01-97059, №13-01-97058, № 12-01-00955, № 12-01-97026, № 12-01-31212, № 14-01-31291.

СТАТИЧЕСКАЯ АЭРОУПРУГОСТЬ ПРЯМОГО КРЫЛА ПРИ ОТКЛОНЕНИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ПО КРЕНУ

Коганов С.А., Шклярчук Ф.Н.

(Москва)

Рассматривается прямое крыло: удлинение 10, сужение 1. Упругой моделью крыла является четырехпоясный кессон, состоящий из верхней и нижней панелей, работающих на растяжение-сжатие и сдвиг, боковых панелей работающих на сдвиг и четырех стрингеров, идущих по ребрам кессона, работающих на растяжение-сжатие. Крыло разбивается на отсеки плоскостями параллельными скорости набегающего потока. Данная модель учитывает деформации сечений кессона и разработана для моделирования кессона стреловидного крыла. В качестве обобщённых координат упругой модели выбираются вертикальное перемещение, угол закручивания относительно оси параллельной оси z самолета, и угол поворота относительно оси параллельной оси x самолета торцов отсеков. Аэродинамические характеристики крыла определяются по методу дискретных вихрей.

Для выбранных значений скорости набегающего потока и угла атаки крыла строятся графики распределения подъемной силы по размаху и по хорде жесткого и упругого крыла, а также прогибы и углы закручивания в сечениях кессона для наглядного представления работы выбранного упругого кессона.

Исследуется эффективность управления по крену отклоняемой поверхности, положение которой меняется по размаху от $z \cdot L/2$ до $L/2$ и по хорде от $x \cdot B$ до B , где L - размах крыла, B - хорда крыла. Значение z меняется от 0.6 до 1, проходя 20 значений, x меняется от 0 до 1, также проходя 20 значений. Всего рассматривается 400 вариантов расположения отклоняемой поверхности.

Строятся поверхности коэффициентов M_x^δ , M_z^δ относительно фокуса крыла, координаты x_ϕ фокуса отклоняемой поверхности. Для жесткого крыла строятся кривые равной эффективности отклоняемых поверхностей. Первая поверхность, элерон, занимает положение по размаху от $0.6L/2$ до $L/2$ и меняет положение передней кромки по хорде от 0 до B . Вторая законцовка, занимает положение по хорде от 0 до B и меняет положение внутренней хорды по размаху от $0.6L/2$ до $L/2$. На основании этой кривой делаются выводы о эффективности использования площади отклоняемой поверхности в зависимости от ее положения.

Для жесткого крыла строятся кривые положения фокуса элерона при отклонении элерона и крыла целиком. Строятся кривые влияния упругости

крыла на коэффициент M_x^δ и кривая отношения углов отклонения элерона и законцовки на упругом крыле для получения одного значения M_x^δ . Строятся кривые влияния упругости крыла на положение фокуса отклоняемой поверхности.

Строятся поля давления на упругое крыло и графики распределения подъемной силы по размаху и по хорде при отклонении элерона и законцовки.

Делаются выводы об эффективности использования законцовки вращающейся относительно оси параллельной оси z самолета.

Литература

1. Гришанина Т.В., Шклярчук Ф.Н. Динамика упругих управляемых конструкций. – М.:МАИ, 2007.
2. Гришанина Т.В., Тютюнников Н.П., Шклярчук Ф.Н. Метод отсеков в расчетах колебаний конструкций летательных аппаратов. – М.:МАИ, 2010.
3. Белоцерковский С.М. Тонкая несущая поверхность в дозвуковом потоке газа. – М.:Наука, 1965.

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ПРИ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ

Комшина А.В., Помельникова А.С.

(Москва)

В настоящее время существует широкий спектр методов воздействия на материалы, целью которых является повышение эксплуатационных свойств поверхности изделий. Одним из перспективных методов упрочнения поверхности является магнитно-импульсная обработка (МИО).

Известно, что магнитно-импульсная обработка (МИО) - это эффективный инструмент воздействия на качество поверхности сплавов. Под влиянием МИО происходит изменение структуры, физико-механических свойств и снижение дефектов поверхности металла.

Однако широкому распространению МИО препятствует противоречивость приводимых результатов, недостаточное количество данных о причинах, вызывающих указанные изменения в материалах, ввиду сложности и многообразия процессов, происходящих под действием магнитных импульсов.

Существует целый спектр механизмов воздействия МИО на структуру и свойства материала, среди них: оплавление микровыступов поверхности за счет температурного воздействия; совпадение частот магнитных импульсов с резонансными частотами кристаллической решетки материала; микропластическая деформация; динамическая рекристаллизация;

фрагментация структуры; энергетическое воздействием на атомы вблизи дефектов.

Целью настоящей работы является теоретическое исследование влияния температуры, возникающей на поверхности различных сплавов при магнитно-импульсной обработке, на свойства поверхности.

Магнитно-импульсная обработка проводилась при атмосферном давлении и температуре 20°C на установке с системой автоматического управления параметрами импульсов. Обработке подвергались группы образцов сплава на основе железа 10СЮ (Fe-9,4%Si-5,2%Al) и титанового сплава ВТ23 (Ti - 5,9% Al- 4,3%V – 1,9%Mo – 1,1%Cr).

Прецизионные сплавы на основе системы Fe-Si-Al находят широкое применение в узлах приборов точной механики, работающих в динамическом режиме. Однако, ввиду высокой склонности данных сплавов к хрупкому разрушению, которое начинается с поверхности, в приборах может происходить ухудшение качества узлов в процессе эксплуатации.

Титановые сплавы – материалы, широкое распространение которых обусловлено уникальным комплексом физико-механических свойств. Высокопрочные титановые сплавы системы Ti-Al-V применяются для изготовления авиационных деталей, работающих в условиях усталостных и других нагрузок, когда качество поверхности играет ведущую роль.

Ранее было установлено [1], что МИО вызывает снижение открытой микропористости сплавов 10СЮ и ВТ23, повышение микротвердости поверхности, а также увеличение чистоты поверхности титанового сплава на 2 класса.

Для определения степени теплового воздействия во время МИО проведен расчет температуры, возникающей на поверхности металла при действии импульса, напряженностью $H = 50 \dots 60$ кА/с длительностью 0,1 с.

Процесс распространения теплоты в сплошной среде описывается уравнением Фурье (уравнением теплопроводности):

$$\left(\frac{\partial}{\partial t}\right)(c\rho T) = \text{div}(\lambda \text{grad}T) + q,$$

– тепловой источник, действующий в объеме тела; c , ρ и λ – удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность соответственно; T – температура.

В случае поверхностного нагрева q_v обращается в ноль и решение тепловой задачи следует искать при наложении граничных условий второго рода. Использование приведенного уравнения на практике является довольно трудоемкой задачей, однако, применяя это уравнение, можно получить приближенные оценки условий нагрева концентрированными потоками энергии при использовании соотношения для максимальной температуры T_{max} . Это

значение температуры достигается на поверхности полубесконечного тела к концу действия поверхностного теплового источника с плотностью мощности q .

$$T_{\max} = \frac{2q}{\lambda} \sqrt{\frac{a\tau}{\pi}} + T_0$$

$a = \lambda / c\rho$ - коэффициент температуропроводности; τ - время действия поверхностного теплового источника; T_0 - начальная температура тела.

Согласно паспорту магнитно-импульсной установки, мощность магнитного импульса W в амплитуде равна $1 \cdot 10^3$ Вт при напряженности $H = 50 \dots 60$ кА/м. Примем, что общая площадь поверхности облучения магнитным импульсом составляет $S = 2$ см² для обоих сплавов (большая часть образцов имела форму куба со стороной 1 см²). Используя теплофизические константы [2,3], рассчитаем плотность мощности потока:

$$q = \frac{W}{S} = \frac{1 \cdot 10^3}{2} = 500 \text{ Вт/см}^2$$

Время действия магнитного импульса возьмем равным $\tau = 0,025$ с - период нарастания напряженности для случая трапецеидальной формы импульса (при общем времени импульса 0,1 с). $T_0 = 300$ К.

Тогда максимальная температура на поверхности образца сплава 10СЮ равна: $T_{\max} = 346$ К

Для сплава ВТ23 максимальная температура на поверхности образца равна: $T_{\max} = 413$ К.

Расчет максимальной температуры нагрева поверхности образцов обоих сплавов не показал, что возникающая на поверхности образцов температура достаточна для протекания фазовых и структурных превращений. Однако, расчет проводился на макроуровне, а регистрируемые изменения, согласно проведенному комплексному исследованию микроструктуры и свойств [1], идут на микро- и наноразмере.

Рассмотрим реальную поверхность образцов, обладающую микрорельефом. Предположительно, температура на вершинах микронеровностей будет отличаться от той, что устанавливается по всей площади поверхности. Примем средний радиус вершины микронеровности равным $r_k = 0,1$ мкм. Тогда площадь одной вершины микровыступа равна: $S_k = 3,14 \cdot 10^{-10}$ см². Средний шаг местных выступов профиля равен $S = 10$ мкм. Отсюда общая площадь всех микровыступов будет равна $S_{\text{микро}} = 10^{-2}$ см². Плотность мощности теплового потока от импульса магнитного поля составляет:

$$q = \frac{1 \cdot 10^3}{10^{-2}} = 10^5 \text{ Вт/см}^2$$

Известно [4], что при плотностях мощности 10^8 – 10^5 Вт/см² поверхностное плавление происходит за время порядка наносекунды и менее. Время остывания расплава (примерно до половины максимальной температуры цикла) по порядку величины равно времени нагрева. Такое время жизни расплава, обеспечивающее сохранение геометрической формы детали (без учета искажений микрорельефа), обуславливает возможность проведения обработки деталей с оплавлением поверхности, что обычно не допускается при традиционных скоростях нагрева под закалку.

Максимальная температура на поверхности образца сплава 10СЮ (1) и сплава ВТ23 (2) будет равна, соответственно:

$$T_{\max} = 10^4 \text{ K}(1); T_{\max} = 2.5 \cdot 10^5 \text{ K}(2)$$

Проведенный расчет показал, что температура, создаваемая на вершине микровыступа импульсом магнитного поля, превышает температуру плавления как сплава 10СЮ, так и сплава ВТ23. То есть, полученный эффект снижения шероховатости связан с оплавлением микровыступов и облегчением протекания микродеформации поверхностного слоя благодаря повышению температуры металла и давлению, создаваемому магнитными импульсами.

Литература

1. Комшина А.В., Помельникова А.С., Шипко М.Н. Исследование влияния предварительной термической и магнитно-импульсной обработок на структуру и свойства сплавов // Материалы XIX Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Ярополец, 18-22 февраля, 2013. М.: МАИ, 2013. Т.1. С. 119-122.
2. Теплофизические свойства титана и его сплавов: Справ. Изд. / Пелецкий В.Э. [и др.] // М.: Металлургия. 1985. 103 с.
3. Физические свойства металлов и сплавов / Б.Г. Лившиц [и др.] // М.: Металлургия. 1980. 320 с.
4. Реди Дж. Действие мощного лазерного излучения: Пер. с англ. М.: Мир. 1974. 468 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫВИХА ВЕРТЛУЖНОГО КОМПОНЕНТА ИМПЛАНТАТА ПРИ ДИСПЛАЗИИ ВЕРТЛУЖНОЙ ВПАДИНЫ

Коноплев Ю.Г., Мазуренко А.В., Митрайкин В.И., Саченков О.А.

(Казань, Чебоксары)

Основным методом лечения пациентов с диспластическим коксартрозом остаётся эндопротезирование ТБС. Реконструктивные операционные

вмешательства эффективны лишь при ранних стадиях заболевания и дают положительный результат только в течение 5 – 10 лет. Вплоть до наших дней проблема эндопротезирования ТБС при диспластическом коксартрозе не решена окончательно. Риск неудач при диспластическом артрозе выше в 1,5 раза, а при диспластическом артрозе с вывихом в 2 раза, чем при стандартном эндопротезировании. Все вышеперечисленное свидетельствует об огромном арсенале методов и их комбинаций и отсутствии на сегодняшний день оптимальной тактики при эндопротезировании тазобедренного сустава у пациентов с диспластическим коксартрозом III – IV ст. (классификация дисплазии тазобедренного сустава по Crowe J F) и указывает на настоятельную необходимость поиска современных решений. С этой целью были проведены экспериментальные исследования нестабильности вертлужного компонента при эндопротезировании тазобедренного сустава с дисплазией вертлужной впадины.

Основной задачей является определение критической величины области непокрытия, при котором в процессе эксплуатации будет проявляться нестабильность вертлужного компонента. Силы, действующие на вертлужный компонент, передаются через бедренный компонент имплантата, а значит, при движении изменяются как количественно, так и по направлению действия.

Для проведения экспериментов был спроектирован и изготовлен испытательный стенд. Испытания проводились на универсальной двухзонной испытательной машине модель УТС 110М-100 напольного исполнения, сертификат об утверждении типа средств измерений № 34879. Диапазон измеряемых нагрузок, кН: 0,001 – 100; погрешность измерения нагрузки $\pm 1\%$ (0,5)% от показания вплоть до 1/100 от величины допустимой нагрузки тензодатчика. Для проведения эксперимента была подготовлена оснастка, которая состоит из жесткого стола для установки эндопротеза и стола для крепления модели ТБС, патология вертлужной впадины моделировалась на модели высверливанием дефекта заданного радиуса. Во время испытания нижней опоре, с закрепленным имплантатом придается движение, при этом измеряется перемещение траверсы, усилие прикладываемое для перемещения и время. При потери несущей способности вертлужного компонента (падение прилагаемого усилия и контроль маркеров взаимного расположения компонентов) эксперимент останавливается.

Испытания для недопокрытия 18% выявили явную стабильность вертлужного компонента (разрушаются испытываемые образцы); испытания для значения недопокрытия 25% - критическим диапазоном значения силы является 1100-1300 Н; испытания для недопокрытия 33% - критическим диапазоном значения силы является 600-950 Н; испытания для недопокрытия 33%, с подкреплением - критическим значением силы является 1050-1200 Н.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №13-01-97059, №13-01-97058, № 12-01-00955, № 12-01-97026, № 12-01-31212, № 14-01-31291.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧЕЛЮСТИ ПРИ ГИПЕРТОНУСЕ ЖЕВАТЕЛЬНЫХ МЫШЦ

Коноплев Ю.Г., Мустакимова Р.Ф., Салеева Г.Т., Саченков О.А.

(Казань)

На сегодняшний день распространенность бруксизма, по различным данным составляет от 1-3% населения до 30-50%. Настолько сильный разброс значений, по нашему мнению, образовался из-за особенностей проведения исследований. Источники указывающие на небольшую распространенность основывались на данных опроса. Те же кто указывают значительную распространенность основывались на данных полученных по результатам сомнологических записей. Подобные парафункции приводят к различным патологиям в виде сколов зубов, реставраций, ортопедических конструкций, причем локализация дефектов не всегда соответствовала участкам с супраконтактами.

У пациентов с бруксизмом часто встречаются абфракционные дефекты в сочетании с рецессией десневого края. В качестве этиологических причин их возникновения в различных работах указываются повышенное нажатие при чистке зубов, давление круговой мышцы рта, стираемость под воздействием пищевого комка, наличие повышенного давления из-за возникновения преждевременных контактов. При исследовании нами было определено наличие у указанной группы пациентов генерализованного гипертонуса мышц.

В рамках исследования была построена трехмерная параметрическая модель анатомически нормальной челюсти. Линии дуг зубных рядов замерялись с эталонной модели и моделировались сплошным сечением с механическими характеристиками $E = 1$ ГПа, $\nu = 0.1$, десна моделировалась более податливым материалом, по поверхностям соединения зуб-зуб, десна-зуб рассчитывались контактные напряжения. Параметрами модели выступали величины и направления прилагаемых нагрузок, эквивалентные действию жевательных мышц *musculus masseter*, *musculus temporalis*. Рассматривались случаи единичного и парного гипертонуса мышц.

Была проанализирована картина распределения интенсивности напряжений по зубным дугам, поле перемещение десны, зубного ряда. При выраженном гипертонусе были отмечены области концентрации напряжений (порядка 20-40 МПа). По расчетам так же подтвердилась рецессия десневого края, были отмечены перемещения (порядка 1 мм.) в области клыков.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №13-01-97059, №13-01-97058, № 12-01-00955, № 12-01-97026, № 12-01-31212, № 14-01-31291.

ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ЭЛЛИПТИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ С ВЫРЕЗОМ

Коноплев Ю.Г., Осипов М.Н., Саченков А.А.

(Казань)

Расчет на устойчивость является одним из важных элементов расчета при проектировании тонкостенных оболочечных конструкций в различных областях техники – авиастроении, судостроении, ракетостроении и проч. Целью работы является исследование устойчивости цилиндрических оболочек кругового и эллиптического поперечного сечения с круговым вырезом под действием осевой сжимающей нагрузки. При этом для оболочек эллиптического сечения рассматривается вариант расположения выреза в средней части зоны большой кривизны. В рамках исследования проводились эксперименты для определения критической силы, а также численные расчеты.

При проведении экспериментальной части исследования была использована установка, сконструированная для испытаний оболочек, различными видами нагрузок. Величина осевой силы регистрировалась динамометром ДОС 0.3 системы Токаря. Модели оболочек изготавливались из рулонной алюминиевой ленты толщиной 0,107 мм, модуль упругости $0,71 \cdot 10^{10}$ Н/м, коэффициент Пуассона $\nu=0,3$. Вырезанная заготовка плотно прижималась к оправке обоймой из тонкой листовой резины и склеивалась. Толщина шва не превышала 4 мм. После полимеризации клея оболочка торцевалась до нужной длины 132 мм, что соответствовало трем радиусам сечения круговой оболочки того же периметра, и фиксировалась на специальных фланцах. Периметры сечений круговых и эллиптических оболочек были одинаковы. К фланцам оболочка прижималась специальными стальными лентами толщиной 0,2 мм, такое закрепление оболочки обеспечивало выполнение граничных условий жесткого защемления. Вырезы в средней части образующей делались заранее, до склеивания оболочки.

Для анализа устойчивости оболочки с вырезом была построена параметрическая конечно-элементная модель в пакетно-программном комплексе ANSYS. При численной реализации использовался четырех узловой конечный элемент с шестью степенями свободы в узле. Параметрами модели выступали геометрические характеристики оболочки, расположение и величина выреза, величина конечного элемента, граничные условия. Полученные решения для

оболочек без выреза сравнивались с известными аналитическими решениями, а для оболочек с вырезом с результатами экспериментальных исследований.

При численно-аналитическом исследовании механические характеристики материала оболочек принимались такими же как и в эксперименте, а геометрические параметры были следующими: длина $L=132$ мм, радиус соответствующей круговой оболочки $R=44$ мм, отношение полуосей эллиптического сечения оболочек $a/b=1; 1,5; 2,0$.

Было отмечено, что для оболочек без выреза расчетные значения критического усилия превышают экспериментальные в 3-4 раза, что согласуется с литературными данными по устойчивости оболочек. При анализе устойчивости оболочки с круговым вырезом с увеличением радиуса отверстия расчетная критическая нагрузка уменьшается и приближается к экспериментальным результатам.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №13-01-97059, №13-01-97058, № 12-01-00955, № 12-01-97026, № 12-01-31212.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РОТАЦИОННОЙ ФЛЕКСИОННОЙ ОСТЕОТОМИИ ПРОКСИМАЛЬНОГО УЧАСТКА БЕДРЕННОЙ КОСТИ

Коноплев Ю.Г., Саченков О.А., Хасанов Р.Ф., Яшина И.В.

(Казань)

Болезнь Легга-Кальве-Пертеса - тяжелое и длительное заболевание бедренной кости тазобедренного сустава детского возраста, связанное с нарушением кровоснабжения головки бедренной кости и нарушением питания её суставного хряща с последующим некрозом, относится к группе болезней объединяемых под названием остеохондропатии. Практика показывает, что принятые в отечественных клиниках методы установления функционально-клинического и ортопедического диагноза при болезни Пертеса и юношеском эпифизеолизе головки бедренной кости, планирования лечебной программы, обоснования хирургической тактики и оценки эффективности всего комплекса реабилитации пациента во многом субъективны. Было решено провести исследование предложенного хирургического метода лечения.

Метод лечения заключается в остеотомии вдоль нижнего контура шейки бедренной кости, тем самым разделяя кость на два объекта и поворотом проксимального участка до определенного угла, снимая таим образом нагрузку с пораженного участка. Исследование проводилось на основе построенной ранее кинематической модели тазобедренного сустава. Модель была дополнена упругими элементами (мышцами), места креплений мышц

определялись по анатомическим атласам, механические характеристики брались из литературы.

Численная реализация основывается на итерационном алгоритме квази-Ньютона-Рафсона, для решения системы конечно-разностных уравнений и нахождения значений переменных состояния.

При моделировании остеотомии считалось, что проксимальный участок соединен с бедренной костью неподвижной вращательной парой. Моделирование проводилось для различных анатомических параметров: шеечно-диафизарный угол (ШДУ) 115° - 120° , угол антеторсии (АТ) 20° - 30° ; поворот производился обоих направлениях около оси вращения, при этом определялись удлинения мышц.

Анализ расчетов показал, что при повороте кпереди поведение мышц стабильней при изменении анатомических параметров, в то время как при повороте к спине ряд мышц в зависимости от угла антеторсии начинают сжиматься. На основании полученных данных проводится изучение устойчивости поведения мышц по отношению к местам крепления, сверка полученных результатов с клиническими испытаниями, а также анализ напряженного состояния проксимального участка кости после поворота.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №13-01-97059, №13-01-97058, № 12-01-00955, № 12-01-97026, № 12-01-31212, № 14-01-31291.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИСТЕРЕЗИСНОГО МЕХАНИЗМА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Коровайцева Е.А., Ломовской В.А.

(Москва)

В динамических режимах при напряжениях $\sigma \ll \sigma_{\text{м}}$ наблюдается нелинейная зависимость на диаграмме $\sigma = f(\varepsilon)$. Это определено экспериментально получаемыми эллипсоидными петлями, где площадь петли гистерезиса характеризует диссипацию части энергии внешнего деформирующего воздействия в исследуемом материале. Таким образом, на спектрах внутреннего трения в этом случае наблюдается фон потерь, слабо зависящий от температуры и частоты внешнего воздействия. Учитывая, что спектры внутреннего трения получаются только в динамических режимах, когда напряжения и деформации в исследуемом материале меняются по синусоидальному закону $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos(\omega t + \alpha_0)$, есть возможность перейти от нелинейного описания диссипативных потерь, определяемых площадью эллипсоидной петли, к линейному описанию диссипативных потерь,

характеризуемых величиной сдвига фаз α_c между напряжением и деформацией, возникающими в исследуемом образце.

Ранее нами была предпринята попытка описания фона диссипативных потерь на спектре внутреннего трения с использованием феноменологической модели Фойгта. В данной работе рассматривается взаимосвязь между интенсивностью фона диссипативных потерь и амплитудой и частотой внешнего деформирующего воздействия. При этом следует отметить, что на фон внутреннего трения могут накладываться процессы локальной неупругости, имеющие негистерезисный механизм внутреннего трения. Это могут быть процессы, связанные с фазовыми переходами 1-го и 2-ого рода, или процессами, имеющими релаксационный механизм. В этом случае при изменении частоты и температуры происходит смещение релаксационных диссипативных потерь, что ведет к частичному поглощению диссипативных процессов гистерезисного типа. Поэтому в данной работе анализируется возможность использования не только феноменологической модели Фойгта, но и других моделей (моделей Ильюшина или стандартного линейного тела).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ № 14–08–00806).

АНАЛИЗ РЕЗОНАНСНЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОЛЯРНО-ОРТОТРОПНЫХ ДИСКОВ ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ МЕТОДОМ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ВОЛЬТЕРРА 2-ГО РОДА

Королевич В.В.

(Прага)

В работе анализируются изгибные колебания полярно-ортотропного кольцевого диска переменной толщины $h(r)$ под действием осесимметричной поперечной нагрузки $q_z(r, t)$, гармонически изменяющейся во времени t с частотой Ω , совпадающей с частотой p_0 основного тона его собственных колебаний.

Для описания вынужденных резонансных осесимметричных колебаний кольцевого диска приложенная нагрузка $q_z(r, t)$ и динамическое перемещение $w(r, t)$ разлагаются в ряды по системе собственных ортонормированных функций $W^{(s)}(r) = W(p_s, r)$ [1,2]:

$$q_z(r, t) = q_0(r) \sin p_0 t = \rho h(r) \sum_{s=0}^{\infty} W_s(r) \cdot q_s(t), \quad w(r, t) = \sum_{s=0}^{\infty} W_s(r) \cdot T_s(t),$$

где $q_s(t) = Q_s \cdot \sin p_0 t$; $Q_s = \int_{r_0}^R \frac{q_0(r)}{\rho h(r)} W_s(r) \cdot r dr$; r_0, R – внутренний и

внешний радиусы анизотропного кольцевого диска соответственно;

$$T_s(t) = e^{-\beta t} (A_s \sin \alpha_s t + B_s \cos \alpha_s t) + \\ + \frac{Q_s}{\alpha_s} \int_0^t e^{-\beta(t-\tau)} \sin \alpha_s (t-\tau) \sin p_0 \tau \cdot d\tau;$$

A_s, B_s – постоянные интегрирования, которые находятся из начальных условий; $\alpha_s = \sqrt{p_s^2 - \beta^2}$ – круговая частота свободных осесимметричных изгибных колебаний диска с учётом внутреннего и внешнего сопротивления, определяемого коэффициентом β ; ρ – плотность материала диска; $W_s(r)$ – собственная координатная функция динамического перемещения $w(r,t)$, вычисляемая по формуле [3]:

$$W_s(r) = \frac{1}{6} \int_{r_0}^r (r-r_1)^3 X_s(r_1) dr_1 + \frac{1}{6} \ddot{W}_s(r_0) (r-r_0)^3 + \frac{1}{2} \dot{W}_s(r_0) (r-r_0)^2 + \\ + \dot{W}_s(r_0) (r-r_0) + W_s(r_0).$$

Функция $X_s(r)$ является решением интегрального уравнения Вольтерра 2-го рода:

$$X_s(r) = \lambda \int_{r_0}^r K_s^0(r, r_1) X_s(r_1) dr_1 + f_s^0(r),$$

где числовой параметр $\lambda = -1$; ядро интегрального уравнения:

$$K_s^0(r, r_1) = \left[2 \left(\frac{D'_{11}}{D_{11}} + \frac{1}{r} \right) + \left(\frac{D''_{11}}{D_{11}} + \frac{(2 + \nu_{\theta r}) D'_{11}}{r D_{11}} - \frac{k^2}{r^2} \right) (r-r_1) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{\nu_{\theta r} D''_{11}}{r D_{11}} - \frac{k^2 D'_{11}}{r^2 D_{11}} + \frac{k^2}{r^3} \right) (r-r_1)^2 - \frac{1}{6} \frac{\rho h(r) p_s^2}{D_{11}(r)} (r-r_1)^3 \right];$$

свободный член интегрального уравнения:

$$f_s^0(r) = \frac{\partial^3 K_s^0(r, r_0)}{\partial r_1^3} W_s(r_0) - \frac{\partial^2 K_s^0(r, r_0)}{\partial r_1^2} \dot{W}_s(r_0) + \\ + \frac{\partial K_s^0(r, r_0)}{\partial r_1} \ddot{W}_s(r_0) - K_s^0(r, r_0) \ddot{W}_s(r_0).$$

Интегральное уравнение Вольтерра 2-го рода решается методом последовательных приближений, положив нулевое приближение $X_s^{(0)}(r)$ равным нулю.

В качестве примера рассматривался стеклопластиковый параболический диск с параметрами, указанными в работе [1]. Удовлетворяя найденное решение интегрального уравнения в 3-м приближении заданным граничным условиям, находились собственные частоты p_s и соответствующие им собственные функции $W_s(r)$. При нулевых начальных условиях $w(r, 0) = 0, \dot{w}(r, 0) = 0$ постоянные интегрирования A_s, B_s будут равны нулю. Вычислив интеграл в формуле для $T_s(t)$, получим достаточно простую формулу для вычисления динамического прогиба $w(r, t)$ в анизотропном кольцевом диске переменной толщины, нагруженного поперечной нагрузкой $q_z(r, t)$ вибрирующей на частоте p_0 основного тона его собственных колебаний:

$$w(r, t) = \sum_{s=0}^{\infty} Q_s W_s(r) \sin(p_0 t - \phi_s),$$

где $\phi_s = \arctg \frac{2\beta p_0}{(p_s^2 - p_0^2)}$ - начальная фаза s -й гармоники колебаний.

Отметим, что динамический прогиб диска на приложенную гармоническую нагрузку отстает по фазе на величину ϕ_s в каждой s -й гармонике колебаний, причём наибольший фазовый сдвиг равный $\frac{\pi}{2}$ достигается на основной частоте p_0 и убывает с ростом величины собственных частот p_s , стремясь в пределе к нулю при высокочастотных колебаниях.

Литература

1. Маслов Н.М. Колебания круглых цилиндрически-ортотропных пластин переменной толщины // Сб. научн. тр. «Некоторые задачи теории упругости о концентрации напряжений и деформации упругих тел». Саратов. – 1965. – Вып.2. – С. 101 - 119.
2. Кубенко Д.В., Старовойтов Э.И., Леоненко Д.В. Свободные и вынужденные колебания трехслойных круговых пластин на упругом основании // Межвузов. сб. научн. тр. «Геотехническая механика». Днепропетровск. – 2009. – Вып. 81. – С. 262 – 274.
3. Королевич В.В. Интегральные уравнения Вольтерра второго рода в задачах динамики полярно-ортотропных дисков переменной толщины // Сб. научн. тр. «Проблемы вычислительной механики и прочности конструкций». Днепропетровск. – 2012. – Вып. 20. – С. 192 – 199.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ МАЯТНИКА В ЖИДКОСТИ

Коцур О.С., Щеглов Г.А.

(Москва)

Одной из простейших сопряженных задач гидроупругости (ГУ) является задача о свободных колебаниях маятника в покоящейся несжимаемой среде. Затухание колебаний в общем случае нелинейно. Оно обусловлено действием нестационарных гидродинамических сил, возникающих во время колебаний. Интенсивность затухания существенно зависит от геометрии обтекаемой поверхности и начальной фазы колебаний. В случае, когда колеблющееся в среде тело является плохообтекаемым и вклад в демпфирование колебаний сил инерции среды значительно превосходит вклад сил вязкости, колебания маятника сопровождаются образованием вихрей и в этом случае уже нельзя считать течение потенциальным и использовать для расчета присоединенные массы жидкости.

Описанная задача может служить хорошим тестом для верификации различных численных методов, применяемых при решении задач ГУ. Известно, что сеточные методы обладают так называемой схемной вязкостью, которая может в определенных случаях приводить к существенному расхождению расчетных и экспериментальных данных.

В 2013 г. в Федеральном Политехническом Университете Лозанны (EPFL), Швейцария был проведен ряд экспериментов, в ходе которых методом лазерной трассировки (PIV) были получены поля скоростей и завихренности вблизи маятников различной формы, совершающих свободные колебания с частотой порядка 1 Гц в воде и в воздухе.

Тот же самый динамический процесс был смоделирован численно методом контрольных объемов (МКО) с помощью свободно распространяемой библиотеки OpenFOAM, позволяющей решать задачи ГУ с использованием деформируемой сетки. Такой подход к решению задачи ГУ требует решения трех групп уравнений: уравнения динамики жидкости; уравнения малых колебаний маятника; уравнения деформации сетки жидкого домена, которое сводится к уравнению Лапласа.

Численные и натурные эксперименты проводились в спокойной воздушной среде и в воде. В данной работе обсуждаются результаты сравнения полей скорости и завихренности среды вокруг маятника с результатами численного эксперимента в OpenFOAM. Предлагается методика сравнительного анализа расчетных и экспериментальных полей скорости и завихренности. Также сравниваются законы затухания амплитуды колебаний. Делается вывод о

качестве совпадения результатов численного моделирования и натурального эксперимента.

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ КРУГОВОЙ СЛОИСТОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ УДАРЕ О ЖИДКОСТЬ

Крупенин А.М., Мартыросов М.И.

(Москва)

Рассматривается вертикальный удар о первоначально невозмущенную свободную поверхность идеальной сжимаемой жидкости упругой трехслойной пластины со сплошным наполнителем из легкого и жесткого изотропного материала. Форма изучаемой пластины — круговая. Исследуется начальный этап взаимодействия, когда возникают максимальные гидродинамические давления, и характеристики реакций достигают предельных значений. Скорость взаимодействия пластины с жидкостью принимается много меньшей скорости распространения звука в жидкости. Проводится параметрический анализ по начальной скорости взаимодействия. Учитывается влияние на динамику пластины гравитационных сил. Слои пластины состоят из однородных изотропных материалов. Влиянием воздушной прослойки между падающей пластиной и свободной поверхностью жидкости на характер ударного взаимодействия пренебрегаем.

Исследование ударного взаимодействия конструкций с жидкостью проводилось ранее в связи с решением ряда практических задач: посадкой гидросамолетов, сбросом грузов и техники на воду, ударного взаимодействия судов с набегающей волной.

В общем случае задачи взаимодействия конструкций с жидкостью крайне сложны. В прошлом исследователи пользовались упрощенными математическими моделями. Решения, полученные подобным образом, не могут описать всех нюансов процесса ударного взаимодействия. Численное моделирование, в частности методом конечных элементов, позволяет подробно описать взаимодействие конструкций с жидкостью и учесть большинство известных явлений.

Расчеты выполнены в среде ANSYS AUTODYN и Mathcad 14 в 2D постановке. Получены и проанализированы эпюры гидродинамических давлений, нагрузок, перемещений, скоростей, ускорений и напряжений по времени и координате (по слоям). В качестве несущих слоев пластины рассматривается алюминиевый сплав 1163РДТВ, а в качестве наполнителя — фторопласт-4. Проведен анализ динамических характеристик. Дано сравнение полученных численных результатов с некоторыми имеющимися

экспериментальными и теоретическими данными, полученными рядом отечественных и зарубежных специалистов при решении подобных задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ (код проекта НШ-2047.2012.8) и РФФИ (код проекта 11-01-00540_а).

О ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СЕМЕЙСТВАХ ЧИСЛЕННЫХ СХЕМ МКЭ РЕШЕНИЯ ДВУМЕРНЫХ И ТРЕХМЕРНЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Крутова К.А., Спиринов С.В., Чекмарев Д.Т.

(Нижний Новгород)

Проблема эффективности численных методов решения многомерных задач механики сплошных сред остается актуальной. Известен эффект экспоненциального роста объема вычислений при увеличении размерности задач. Один из возможных подходов к повышению эффективности – применение КЭ схем на ажурных сетках [1-3]. В ажурных схемах МКЭ расчетные элементы покрывают область задачи с регулярными промежутками, что позволяет на сетках одинаковых размеров заметно уменьшить число элементов и тем самым сократить объем вычислений. Наиболее удачной ажурной схемой МКЭ решения трехмерных задач теории упругости и пластичности представляется схема на основе гексаэдральной сетки, в каждой ячейке (гексаэдре) которой располагается один линейный элемент в виде центрального тетраэдра, а остальные 4 тетраэдра в расчетах не участвуют. При этом по сравнению с традиционной схемой линейного КЭ на одинаковых сетках число элементов сокращается в 5 раз, а число узлов – в 2 раза. При лучшей экономичности ажурная схема обладает вторым порядком точности. Она также показала лучшую сходимость по сравнению с традиционными схемами.

Предлагается новый способ построения численных схем МКЭ решения двумерных и трехмерных задач механики сплошных сред. Метод основан на проектировании ажурных схем линейных конечных элементов большей размерности соответственно на двумерную или трехмерную КЭ сетку. На примере линейной задачи теории упругости рассмотрен процесс построения 4-узловой двумерной и 8-узловой трехмерной конечных элементов. Полученные конечные элементы близки к известным полилинейным элементам и превосходят их по эффективности. Схемы содержат параметры, позволяющие регулировать сходимость численных решений.

Численную схему решения двумерной задачи теории упругости (плоская деформация) получим путем проектирования трехмерной ажурной схемы на

плоскость $x_1 O x_2$. Полагая, что трехмерная расчетная область имеет вид $\Omega \times [0, h_3]$, где Ω – область в R^2 , возьмем один ряд ячеек по третьей координате и наложим на решение ограничение $u_3 = 0$.

Таким образом, в результате проектирования трехмерной ажурной схемы получено однопараметрическое семейство численных схем МКЭ решения плоской задачи теории упругости, близких к схеме билинейного КЭ. Настраивая параметр h_3 , можно изменять влияние моментной составляющей в элементе и тем самым регулировать сходимостъ численных решений. Более подробно способ построения и свойства полученного параметрического семейства схем описаны в [4].

Обобщая данный подход, можно построить семейство 8-узловых схем МКЭ решения трехмерных задач теории упругости, близких к схеме 8-узлового полилинейного КЭ.

Для построения схемы рассмотрим расширение задачи теории упругости на 7-мерное пространство. Такое расширение очевидно. Определим тензор деформаций в R^7 как обобщение соотношений Коши:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad i, j = 1, \dots, 7$$

Связь напряжений и деформаций установим на основе «закона Гука»:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, 7$$

В результате 7-мерные «уравнения равновесия теории упругости» в перемещениях запишутся в виде, аналогичном системе уравнений Ламе

$$(\lambda + \mu) \operatorname{grad} \operatorname{div} u + \mu \Delta u + \rho F = 0,$$

где градиент, дивергенция и оператор Лапласа определены соответственно в R^7 . Построение ажурной схемы МКЭ на основе линейного конечного элемента не представляет трудностей. Для построения трехмерной схемы поступим аналогично рассмотренному выше случаю двумерной схемы. Полагая во всех узлах $u_4 = u_5 = u_6 = u_7 = 0$, получим после проектирования в трехмерное пространство искомую схему МКЭ.

Таким образом, в результате проектирования в R^3 ажурной схемы построено 4-параметрическое семейство численных схем МКЭ решения трехмерной задачи теории упругости. Параметры h_4, h_5, h_6, h_7 можно настраивать, изменяя влияние моментных составляющих в элементе.

Приводятся результаты решения тестовых задач и сравнение с численными результатами традиционных схем МКЭ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 13-01-97052 р_поволжье_a).

Литература

1. *Чекмарев Д.Т.* Численные схемы метода конечного элемента на «ажурных» сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2009. Вып. 2. С. 49-54.

2. *Жидков А.В., Зефиоров С.В., Кастальская К.А., Спиринов С.В., Чекмарев Д.Т.* Ажурная схема численного решения трехмерных динамических задач теории упругости и пластичности // Вестник ННГУ. Н. Новгород: Изд-во ННГУ. 2011. № 4, часть 4. С. 1480-1482.

3. *Жидков А.В., Спиринов С.В., Чекмарев Д.Т.* Ажурная схема метода конечных элементов решения статических задач теории упругости // Учен. зап. Казан. Ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2012. - Т. 154, Кн. 4. - С. 26-32

4. *Чекмарев Д.Т., Гладильщикова К.М.*, Об одном классе двумерных схем МКЭ // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. Сб. / Нижегород. ун-т. – 2006. – Вып. 68. С. 236-242.

РАСЧЕТ СИЛ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ВИБРАЦИИ СКОРОСТНОГО СУДНА И ГИДРОСАМОЛЕТА, ДВИЖУЩЕГОСЯ В РЕЖИМАХ ВЗЛЕТА И ПОСАДКИ

Крыжевич Г.Б., Норьков Е.С.

(Санкт-Петербург)

В данной работе представлен новый подход к определению сил гидродинамического сопротивления с использованием численного решения задач гидродинамики вязкой жидкости. Важной составляющей сил гидродинамического сопротивления вибрации объектов, движущихся по поверхности жидкости, являются силы вязкостной природы. Поэтому для достоверного расчета вынужденной вибрации корпуса необходимо располагать достаточно точной информацией об этих силах. В настоящее время традиционные расчетные методики вибрации судов и гидросамолетов допускают пренебрежение силами вязкостной природы [1, 2]. Однако, как показывается в работах [3, 4], необходимо учитывать вязкостное сопротивление жидкости общей вибрации судна при высоких скоростях хода, соответствующих переходному режиму движения и глиссированию. Эта необходимость в определенной мере подтверждена результатами испытаний модели судна переходного режима движения [5].

В представленной работе силы гидродинамического сопротивления разбиваются на несколько составляющих, и затем оценивается влияние каждой из них. Первой составляющей являются внутренние потери в конструкциях и системах судна. Она имеет большое значение при анализе вибрационных характеристик тихоходных объектов. Второй составляющей является транцевое

демпфирование, учет которого важен для быстроходных судов. Третьей составляющей определяется волновое и вязкостное сопротивление колебаниям. Эта составная часть зависит от распределения силы сопротивления по длине судна или гидросамолета. Распределение силы сопротивления по длине находится методами численной гидродинамики или приближенным способом с использованием концепции эквивалентной пластины. Четвертой составляющей является вязкостное демпфирование, возникающее при поперечном обтекании судна.

Решалась пространственная задача стационарного внешнего обтекания судна в программном комплексе ANSYS. Построение конечно-элементной сетки проводилось в программе ANSYS Workbench, для вычислений использовался программный комплекс CFX в режиме параллельных вычислений.

Для определения вязкостного демпфирования, возникающего при поперечном обтекании объекта, решалась дополнительная задача. Суть ее заключается в определении сил гидродинамического сопротивления при обтекании поперечного сечения объекта, совершающего вертикальные колебания на границе раздела двух сред, воды и воздуха. Эта дополнительная задача решена в динамической постановке, а силы оценены для установившегося режима обтекания.

Таким образом, предложен новый способ расчета вынужденной общей вибрации судов и гидросамолетов с учетом гидродинамических сил сопротивления колебаниям вязкостной и волновой природы. Проведена оценка вклада различных составляющих гидродинамических сил в демпфирование общей вибрации.

В работе показано, что при относительно низких скоростях движения судов (при числах Фруда, меньших 0.3) в расчетах вынужденной общей вибрации необходимо учитывать вязкостное демпфирование, возникающее при поперечном обтекании судна. Наличие скуловых килей на корпусе судна увеличивает значимость этой составляющей гидродинамического демпфирования. При числах Фруда, больших 0.15, нужен учет характеристик волнового и вязкостного сопротивления по длине судна. При этих же скоростях хода судна появляется необходимость учета транцевого демпфирования, которое прямо пропорционально зависит от скорости судна.

Литература

1. Справочник по строительной механике корабля под редакцией академика Ю.А. Шиманского, том 3, Судпромгиз, Ленинград, 1960 г.
2. Шиманский Ю.А. Динамический расчет судовых конструкций. - Ленинград, 1948г.
3. Крыжевич Г.Б. Гидроупругость конструкций судна. - СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2006 г.

4. *Крыжевич Г.Б.* Демпфирование качки и общей вибрации скоростных судов и вопросы их рационального проектирования. – Труды Крыловского государственного научного центра, 2013, выпуск 76 (360).

5. *Иванов М.А., Крыжевич Г.Б.* Экспериментальное и расчетное исследование влияния гидродинамического демпфирования на общую вибрацию скоростного судна. - Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2012, выпуск 67 (351).

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С ГРУНТОВЫМИ СРЕДАМИ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ НАГРУЗКАХ

Кубенко В.Д., Тарлаковский Д.В., Мейш В.Ф., Мейш Ю.А.

(Киев, Москва)

Рассматривается бесконечная подкрепленная цилиндрическая полость в грунтовой среде. Предполагается, что к внутренней поверхности подкрепляющей оболочки при $r = r_0$ приложена распределенная импульсная нагрузка $P_3(t)$.

Уравнения движения подкрепляющей тонкой цилиндрической оболочки радиусом R и толщиной h имеет вид

$$\rho_{об} h \ddot{u}_3 = \frac{Eh}{1-\nu^2} \frac{u_3}{R^2} + P_3(t) - P_r(t), \quad (1)$$

где $P_3(t)$ - нагрузка на внутреннюю поверхность оболочки; $P_r(t)$ - давление грунта на оболочку; u_3 - радиальное перемещение оболочки; $\rho_{об}$, E , ν - физико-механические параметры материала оболочки.

Для описания поведения грунтовой среды используется модель нелинейной жидкой многокомпонентной среды согласно В.М. Ляхова [1]. Уравнение состояния данной модели записываются в виде

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \left[\frac{\gamma_i (P - P_0)}{\rho_{i0} c_{i0}^2} + 1 \right]^{-\chi_i}, \quad (2)$$

где $\chi_i = 1/\gamma_i$, γ_i - показатель изэнтропии i -й компоненты.

Для уравнения состояния трехкомпонентной среды (водонасыщенного грунта) (2) вводятся следующие обозначения: α_i - содержание по объему компонент, ρ_{i0} - плотность; V_{i0} - их удельный объем; c_{i0} - скорость звука в компонентах при атмосферном давлении P_0 ; i - номер компоненты (1 - воздух, 2 - жидкость, 3 - твердые частицы). При давлении $P = P_0$ плотность среды ρ_0 и удельный объем V_0 определяется по формулам

$$\rho_0 = \frac{1}{V_0} = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \rho_{i0}, \quad \sum_{i=1}^3 \alpha_i = 1.$$

Характеристики каждого слоя определяются соответствующими величинами α_i, ρ_{i0} .

Движение грунтовой среды для случая распространения цилиндрических волн описывается системой уравнений в эйлеровых координатах [2]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(\rho U^2 + P)] - \frac{1}{r} P = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(\rho U)] = 0.$$

В уравнениях (3) - r - пространственная координата, t - временная координата, U - скорость, ρ - плотность, P - давление.

Уравнения движения грунтовой среды (3) дополняются уравнением состояния (2) вида $F(P, \rho) = 0$, где

$$F(P, \rho) = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \left[\frac{\gamma_i (P - P_0)}{\rho_{i0} c_{i0}^2} + 1 \right]^{-1/\gamma_i} - \frac{\rho_0}{\rho}. \quad (4)$$

Связанность задачи взаимодействия обеспечивается заданием условия непротекания на деформируемой поверхности контакта оболочка – грунтовая среда

$$\dot{u}_3 = U_r, \quad (5)$$

где U_r - скорость границы грунтовой среды.

В качестве граничных условий для задачи динамики грунтовой среды принимаются уравнения (1), (5) при $r = r_0$ и условия невозмущенного движения на бесконечности. На границе контакта грунтов с разными плотностями задаются условия непрерывности скорости.

Алгоритм решения задачи о распространении цилиндрических волн в грунтовой среде (уравнения (3) – (4)) основывается на применении конечно – разностной схемы Мак-Кормака [3].

Получены закономерности распространения цилиндрических волн при взаимодействии цилиндрической оболочки с грунтовой средой при действии импульсной нагрузки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №14-01-90412, №13-08-90435).

Литература

1. Ляхов В.М. Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах – М.: Недра, 1982. – 288 с.
2. Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н. Системы квазилинейных уравнений и их приложение к газовой динамике – М.: Наука, 1978. – 688 с.
3. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 2 – М.: Мир, 1991. – 526 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛЗУЧЕСТИ И РАЗРУШЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ СТАДИИ УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛА

Кузнецов Е.Б., Леонов С.С.

(Москва)

Диаграммы ползучести большинства современных конструкционных материалов при умеренных температурно-силовых режимах имеют явно выраженную начальную стадию, в которой интенсивность процесса ползучести монотонно уменьшается (стадия упрочнения) до своего минимального значения (установившаяся стадия). Неучет стадии упрочнения при моделировании процесса ползучести и длительной прочности может привести к заметным погрешностям [1]. Однако исследование таких моделей сопряжено с определенными сложностями, связанными с особенностями моделирования стадии упрочнения материалов. Поэтому большое значение имеет разработка эффективных методов исследования данных моделей.

Рассматривается задача расчета ползучести и длительной прочности конструкций с учетом стадии упрочнения материалов. Для описания поведения конструкции используются уравнения кинетической теории ползучести (в частности, уравнения энергетического варианта теории ползучести). Проводится расчет двух конструкций:

1. Растяжение прутков фиксированного радиуса из стали 45;
2. Осевое растяжение образцов из титанового сплава 3В.

Каждая из данных задач описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений вида [1–3]

$$\begin{cases} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{f(\sigma, T)}{\omega^{\alpha(T)} (1 - \omega^{\alpha(T)+1})^{m(T)}}, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{\varphi(\sigma, T)}{\omega^{\alpha(T)} (1 - \omega^{\alpha(T)+1})^{m(T)}}, \end{cases}$$

где ε – деформация ползучести; σ – напряжение; ω – параметр поврежденности; α, m – параметры задачи, зависящие от температуры T ;

функциональные зависимости $f(\sigma, T)$ и $\varphi(\sigma, T)$ выбираются для каждой задачи по результатам эксперимента.

При постоянных напряжениях и фиксированной температуре можно получить аналитические решения указанных задач [4]. Однако, в более общем случае, когда напряжения переменны и зависят от времени, деформации ползучести и ее скоростей, задача не может быть решена аналитически, что приводит к необходимости применения численных методов.

Отметим следующую особенность. Правые части дифференциальных уравнений указанной системы обращаются в бесконечность в начальный момент времени и в момент разрушения (при стремлении параметра поврежденности к единице), что делает невозможным применение традиционных методов численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений (например, явных методов семейства Рунге-Кутты).

Данная особенность устраняется при помощи параметризации исходных уравнений методом продолжения решения по параметру, применение которого приводит к системе трех обыкновенных дифференциальных уравнений [5]

$$\begin{cases} \frac{d\varepsilon}{d\lambda} = \frac{f(\sigma, T)}{\sqrt{\omega^{2\alpha(T)}(1-\omega^{\alpha(T)+1})^{2m(T)} + (f(\sigma, T))^2 + (\varphi(\sigma, T))^2}}, \\ \frac{d\omega}{d\lambda} = \frac{\varphi(\sigma, T)}{\sqrt{\omega^{2\alpha(T)}(1-\omega^{\alpha(T)+1})^{2m(T)} + (f(\sigma, T))^2 + (\varphi(\sigma, T))^2}}, \\ \frac{dt}{d\lambda} = \frac{\omega^{\alpha(T)}(1-\omega^{\alpha(T)+1})^{m(T)}}{\sqrt{\omega^{2\alpha(T)}(1-\omega^{\alpha(T)+1})^{2m(T)} + (f(\sigma, T))^2 + (\varphi(\sigma, T))^2}}. \end{cases}$$

Правые части данной системы не обращаются в бесконечность, более того, по модулю меньше единицы.

Параметризованная система с однородными начальными условиями для ряда начальных напряжений была решена численно методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности с переменным шагом интегрирования [6]. Полученное приближенное решение хорошо согласуется как с аналитическим решением задачи, так и результатами эксперимента. Погрешность приближенного решения не превосходит 10^{-3} , а в среднем имеет порядок 10^{-6} .

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 13-08-00473а).

Литература

1. Соснин О.В., Шокало И.К. Энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности. Сообщение 2. Ползучесть и разрушение материалов с начальным упрочнением // Проблемы прочности. – 1974. – № 1. – С. 43-48.

2. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
3. *Горев Б.В., Захарова Т.Э., Клопотов И.Д.* К описанию процесса ползучести и разрушения материалов с немонотонным изменением деформационно-прочностных свойств// Физическая мезомеханика. – 2002. – Том 5. – № 2. – С. 17 – 22.
4. *Горев Б.В.* Высокотемпературная ползучесть конструкционных сплавов и ее приложение к формообразованию крупногабаритных деталей: дис. ... доктора технических наук : 01.02.04. – Новосибирск, 2003. – 426 с.
5. *Шалашилин В.И., Кузнецов Е.Б.* Метод продолжения решения и наилучшая параметризация. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 224 с.
6. *Арушанян О.Б., Залеткин С.Ф.* Численное решение обыкновенных дифференциальных уравнений на Фортране. – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 336 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЫТА ВНЕДРЕНИЯ ПРИНЦИПОВ “ВСЕОБЩЕГО МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА” В ВЫСШЕМ ОБРАЗОВАНИИ

Кузьмичева А.А.

(Москва)

В последние 10-15 лет во всём мире тысячи образовательных организаций внедряют методологию Всеобщего управления качеством (Total Quality Management – TQM). Всеобщее управление качеством является философией, которая может и должна быть положена в основу деятельности современных организаций для постоянного улучшения всех процессов их функционирования. Впервые принципы TQM были выдвинуты американским учёным и основоположником концепции TQM Майроном Трайбусом. На сегодняшний день методология TQM непосредственно связана и базируется на нормах обеспечения качества, заложенных в серии международных стандартов ISO 9000, разработанных Международной организацией стандартов (International Standards Organization – ISO). Первоначально использование методов управления качеством получило наибольшее распространение в промышленности, однако в настоящее время нормы обеспечения качества ISO 9000, находят применение в сфере предоставления услуг – в здравоохранении, в сервисе, не исключение – сфера образования [1]. Данные тезисы посвящены исследованию зарубежного опыта внедрения принципов “Всеобщего менеджмента качества” в высшем образовании в западных странах, анализу зарубежных источников по проблеме, а также тому, каким образом принципы всеобщего менеджмента качества могут быть применены в системе российского высшего образования. Результаты анализа зарубежной литературы могут быть использованы в практике образовательных учреждений РФ.

Проблема качества образовательных услуг актуальна для западных университетов. Если в 1995 г. только четыре образовательных учреждения за рубежом были сертифицированы в соответствии с требованиями норм международных стандартов серии ISO 9000, то в настоящее время работы по внедрению элементов системы качества и созданию руководства по качеству для образовательных учреждений ведутся практически во всех странах Европы и США. Согласно ISO 8402: “TQM – это подход к руководству организацией, нацеленный на качество, основанный на участии всех её членов и направленный на достижение долгосрочного успеха путем удовлетворения требований потребителя и выгоды для членов организации и общества”. [2.] Перу М. Трайбуса принадлежит ряд важных работ по методологии Всеобщего менеджмента качества и по исследованию особенностей проявления принципов Всеобщего менеджмента качества в Западных университетах. [3.] Американский экономист Дэниэл Сеймур подходит к проблеме качества высшего образования с других позиций. Монография американского учёного “Влияние качества образования на систему высшего образования” представляет из себя попытку осмыслить влияние качества образование на все сферы жизни Вуза и необходимость принять TQM как основную стратегию Вуза. [4.] Автор доказывает тезис о том, что стратегия качества образовательных услуг является наилучшей для академического сообщества, анализирует такие показатели качества образовательных услуг как удовлетворённость услугой, выбор стратегической альтернативы качества услуг Вузом, вовлечение сотрудников в процесс улучшения качества преподавания , создание новой организационной культуры, в рамках которой происходит процесс улучшения и проводятся стратегические процедуры.

Традицию анализа проблем качества высшего образования активно поддерживают отечественные авторы. Крупный блок источников, посвященных исследованию зарубежного опыта внедрения принципов “Всеобщего менеджмента качества ” в высшее образование РФ представляют из статьи в специализированных журналах по образованию. Подходы отечественных коллег можно разделить на два типа: применение рыночных показателей качества образовательной услуги и нерыночных, так называемых внутренних показателей. Проф. В.Я. Цветков и Н.М. Оболяева показывают целесообразность учёта обоих подходов при оценке процессов обучения в Вузе и представляют Гейдельбергскую модель качества образования как вариант решения проблемы[5]

Интерес к проблеме, затронутой в данной статье представляется актуальным в связи с введением в РФ в сентябре 2013 г. нового “Закона об образовании”. Переход на Болонскую систему Российское диктует высшему образованию необходимость выработки единых критериев качества и отказа от

нормативных (внутренних) параметров оценки качества, не ориентированными на рыночные запросы. В связи с этим, опыт западных стран будет очень полезен для руководства российских Вузов.

Литература

1. См. Глудкин О.П. и др. Всеобщее управление качеством. - М.: Радио и связь, 1999; Руководство по применению стандарта ИСО 9000:2000 в области обучения и образования. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2002].

2. Пузанков Д.В., Степанов С.А., Шапошников С.О. Использование принципов всеобщего управления качеством и стандартов серии ISO 9000 в инженерном образовании //Проблемы качества в сфере образования, 1999. - № 1. [Электронный ресурс.] www.mgu-consulting.ru/st/ecanom/uslugi1.htm. Дата обращения – 22.03.2013)

3. Tribus M. Quality management in education. Eric Clearinghouse. 1992. 225 p.; An application of quality management principles in education at Mt. Edgcomb high school. Sitka. Alaska. [Электронный ресурс.] www.scholar.google.com. Дата обращения – 22.03.2013].

4. Seymour, Daniel T. Causing Quality in Higher Education. 1992. Macmillan Publishing Company, NJ. USA. Электронный ресурс. www.scholar.google.com. Дата обращения – 22.03.2013].

5. В.Я. Цветков и Н.М. Оболяева / Дистанционное и виртуальное обучение. № 1. 2013, С. 5-11].

РЕШЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЗАДАЧ ТЕРМОУПРУГОСТИ ДЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОМПОЗИТНЫХ ОБОЛОЧЕК НА ОСНОВЕ МЕТОДА ОТСЧЕТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Куликов Г.М., Плотникова С.В.

(Тамбов)

Как известно, традиционный путь построения теории термоупругих оболочек состоит в разложении перемещений в степенные ряды относительно поперечной координаты θ_3 , отсчитываемой вдоль внешней нормали к срединной поверхности. Для приближенного представления поля перемещений можно воспользоваться конечными отрезками степенных рядов, поскольку основная цель теории оболочек состоит в получении приближенных решений задач трехмерной теории термоупругости. Однако кажущееся преимущество этой теории теряется при ее применении в задачах статики толстых оболочек, в которых для получения приемлемых результатов необходимо удерживать достаточно большое число членов в соответствующих разложениях [1].

Более продуктивный подход [2-4] связан с введением внутри n -го слоя оболочки I_n отсчетных поверхностей $\Omega^{(n)1}, \Omega^{(n)2}, \dots, \Omega^{(n)I_n}$ параллельных срединной поверхности с целью использования векторов перемещений $\mathbf{u}^{(n)1}, \mathbf{u}^{(n)2}, \dots, \mathbf{u}^{(n)I_n}$ и температур $T^{(n)1}, T^{(n)2}, \dots, T^{(n)I_n}$ этих поверхностей в качестве искоемых функций, где $I_n \geq 3$. При этом поверхности $\Omega^{(n)1}$ и $\Omega^{(n)I_n}$ могут совпадать с поверхностями раздела слоев $\Omega^{[n-1]}$ и $\Omega^{[n]}$. Здесь, индекс n указывает на принадлежность некоторой величины к n -му слою и принимает значения $1, 2, \dots, N$, где N – число слоев. Такой выбор искоемых функций с последующим использованием полиномов Лагранжа степени $I_n - 1$ в пространственных аппроксимациях перемещений и температуры в пределах n -го слоя позволяет представить разрешающие уравнения данной теории оболочек высокого порядка в достаточно компактной форме и построить деформационные соотношения, которые точно представляют смещение оболочки как жесткого тела в системе криволинейных координат срединной поверхности.

Теория оболочек высокого порядка [2] основана на использовании эквидистантных отсчетных поверхностей, при этом лицевые поверхности оболочки выбираются в качестве отсчетных. Это ограничивает применение данной теории для расчета толстых оболочек [3]. Дело в том, что предложенная пространственная полиномиальная интерполяция вектора перемещений и температуры с использованием полиномов Лагранжа высокой степени может приводить вследствие феномена Рунге к значительной осцилляции полиномиальных аппроксимаций в зоне красного эффекта. Этот феномен был открыт Рунге при изучении погрешности полиномиальной интерполяции для приближения некоторых функций на равномерной сетке. С возрастанием степени полинома погрешность интерполяции может стремиться к бесконечности. В численном анализе для борьбы с указанным явлением в качестве узлов интерполяции принято использовать корни многочлена Чебышёва, что помогает существенно улучшить поведение полиномиальных аппроксимаций высокой степени, для которых ошибка интерполяции стремится к нулю при $I_n \rightarrow \infty$. Таким образом, для поперечных координат отсчетных поверхностей в пределах n -го слоя оболочки предлагается использовать следующие выражения:

$$\theta_3^{(n)1} = \theta_3^{[n-1]}, \quad \theta_3^{(n)I_n} = \theta_3^{[n]},$$

$$\theta_3^{(n)m_n} = \frac{1}{2}(\theta_3^{[n-1]} + \theta_3^{[n]}) - \frac{1}{2}h_n \cos\left(\pi \frac{2m_n - 3}{2(I_n - 2)}\right)$$

где $\theta_3^{[n-1]}$, $\theta_3^{[n]}$ – поперечные координаты поверхностей раздела слоев $\Omega^{[n-1]}$ и $\Omega^{[n]}$; $h_n = \theta_3^{[n]} - \theta_3^{[n-1]}$ – толщина n -го слоя; $m_n = 2, 3, \dots, I_n - 1$.

Это дает возможность находить решение трехмерных задач статики для толстых и тонких оболочек с любой наперед заданной точностью при достаточно большом числе отсчетных поверхностей. Рассмотрен расчет шарнирно опертых прямоугольных пластин и цилиндрических оболочек под действием синусоидального температурного нагружения и проведено сравнение с известными аналитическими решениями пространственной теории термоупругости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 13-01-00155).

Литература

1. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. – Киев: Наукова думка, 1970. – 308 с.
2. Куликов Г.М., Плотникова С.В. Решение задачи статики для упругой оболочки в пространственной постановке // Доклады РАН. – 2011. – Т. 439, № 5. – С. 613–616.
3. Kulikov G.M., Plotnikova S.V. Advanced formulation for laminated composite shells: 3D stress analysis and rigid-body motions // Composite Structures. – 2013. – V. 95. – P. 236–246.
4. Kulikov G.M., Plotnikova S.V. Heat conduction analysis of laminated shells by a sampling surfaces method // Mechanics Research Communications. – 2014. – V. 55. – P. 59–65.

НАПРЯЖЕНИЯ В КЛЕЕВОМ СОЕДИНЕНИИ ПРИ МГНОВЕННО ПРИЛОЖЕННОЙ НАГРУЗКЕ

Куреннов С.С.

(Харьков)

В классических моделях клеевых соединений касательные напряжения в клеевом слое достигают максимума на концах соединения, что физически невозможно, поскольку внешний край соединительного слоя имеет свободную границу. Чтобы исключить данное противоречие в ряде работ [1, 2] предложено считать распределение нормальных напряжений линейным по толщине шва. Альтернативный подход, предложенный в работе [3], заключается в моделировании клеевого слоя двухпараметрическим упругим основанием в мембранной интерпретации М.М. Филоненко-Бородича. Данная модель использована для решения задачи о динамических напряжениях в клеевом соединении, вызванных мгновенно приложенной нагрузкой.

Внешние (несущие) слои рассматриваются как балки Тимошенко, масса

клеевого слоя ввиду его относительно малой толщины распределяется поровну между несущими слоями. Уравнения движения внешних слоев и клеевого слоя сведены к системе семи дифференциальных уравнений в частных производных относительно перемещений двух внешних слоев (продольные, поперечные и угол поворота) и поперечных перемещений мембраны – элемента модели клеевого слоя. Краевые условия неоднородные – в начальный момент времени приложено постоянное продольное или поперечное усилие. Решение имеет вид суперпозиции решения статической задачи и задачи о свободных колебаниях. Задача о свободных колебаниях решена при помощи метода разделения переменных, решение разлагается в ряд Фурье по собственным вектор-функциям, определяемым с точностью до произвольного множителя. Для поиска неизвестных коэффициентов используется минимальное свойство коэффициентов ряда Фурье, т.е. минимизируется среднеквадратическое отклонение перемещений и скоростей от начальных условий в нулевой момент времени. Это приводит к системе линейных уравнений относительно неизвестных коэффициентов. Решена модельная задача. Обнаружено, что максимальные динамические напряжения могут в 2-4 раза превышать соответствующие статические напряжения.

Литература

1. *Артюхин Ю. П.* Модифицированная теория Голанда – Рейснера склеенных пластин // Исследования по теории пластин и оболочек. – К.:Изд-во КГУ, 1975. – Вып. 11. – С.136-148.
2. *da Silva L.F.M., das Neves P.J.C., Adams R.D., Spelt J.K.* Analysis of Mixed Adhesive Bonded Joints Part I: Theoretical Formulation // J. of Adhesion Science and Technology. – 2009, V. 23, Pp. 1–34.
2. *Wang J., Zhang C.* Three-parameter elastic foundation model for analysis of adhesively bonded joints // Int. J. Adhes. & Adhes. 2009. V. 29, P.495–502.

НЕУСТАНОВИВШИЕСЯ ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ДВУХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЕ

Кушнир Р.М., Попович В.С., Гарматий Г.Ю.

(Львов)

Повышение прочности и надежности современных элементов слоистых конструкций в условиях высокотемпературного нагрева связано с точным определением их термонапряженного состояния. Решение этой задачи приводит к необходимости определения температурных полей и обусловленных ими тепловых напряжений на основании моделей термочувствительного тела (с учетом влияния зависимости от температуры термомеханических характеристик

материалов) [1-3], которые обеспечивают высокий уровень адекватности реальным состояниям слоистых конструкций. Использование таких моделей при определении нестационарного температурного поля слоистых тел не позволяет применять классические методы решения задач математической физики, поскольку уравнение теплопроводности и условия контакта слоев являются нелинейными. В связи с этим возникает потребность в разработке более совершенных и эффективных методов расчета нелинейных краевых задач теплопроводности. Такие задачи в общем виде могут решаться только численно.

В данной работе для исследования неустановившегося термонапряженного состояния термочувствительной двухслойной, свободной от внешних нагрузок, бесконечной пластины используется аналитико-численная методика решения нелинейной нестационарной краевой задачи теплопроводности [4]. Суть методики, в предположении, что коэффициенты теплопроводности слоев пластины постоянные, заключается в поэтапной линейзации исходной задачи посредством введения интегральных переменных Кирхгофа и линейзируемого параметра. Решение линейризованной задачи построено с использованием интегрального преобразования Лапласа по времени. Получив аналитические выражения для вычисления переменных Кирхгофа (как функций координаты, времени и линейзируемого параметра), находим распределение температурного поля в пластине по заданной температурной зависимости коэффициентов теплопроводности материалов слоев. При этом линейризуемый параметр подбираем с заданной точностью в зависимости от времени из условия равенства температур на границе контакта слоев.

Две ненулевые компоненты тензора температурных напряжений пластины $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma(z)$, обусловленные найденным температурным полем, определены по формуле [1]

$$\bar{\sigma}(z) = \frac{E^*(T)}{1 - \nu_0 \nu^*(T)} \left[\frac{(A_* N_i^* - B_* M_i^*) \bar{z} + A_* M_i^* - C_* N_i^*}{A_*^2 - B_* C_*} - \Phi_*(T) \right],$$

где модули упругости $E_i(t)$, коэффициенты линейного теплового расширения $\alpha_i^{(i)}(t)$ и коэффициенты Пуассона $\nu_i(t)$ слоев пластины представлены в виде $\chi^i(t) = \chi_0^{(i)} \chi_i^*(\bar{T}_i)$ ($i = 1, 2$); $E^*(T)$, $\alpha_i^*(T)$, $\nu^*(T)$ имеют вид $\chi^*(T) = \chi_1^*(\bar{T}_1) + [\chi_2^*(\bar{T}_2) - \chi_1^*(\bar{T}_1)] S(z - z_1)$, $S(z)$ – единичная функция;

$$A_* = \sum_{i=1}^2 \int_{\bar{z}_{i-1}}^{\bar{z}_i} \frac{\bar{z} E_i^*(T_i)}{1 - \nu_{0i} \nu_i^*(T_i)} d\bar{z}, \quad B_* = \sum_{i=1}^2 \int_{\bar{z}_{i-1}}^{\bar{z}_i} \frac{E_i^*(T_i)}{1 - \nu_{0i} \nu_i^*(T_i)} d\bar{z},$$

$$C_* = \sum_{i=1}^2 \int_{\bar{z}_{i-1}}^{\bar{z}_i} \frac{\bar{z}^2 E_i^*(T_i)}{1 - \nu_{0i} \nu_i^*(T_i)} d\bar{z}, \quad N_i^* = \sum_{i=1}^2 \int_{\bar{z}_{i-1}}^{\bar{z}_i} \frac{E_i^*(T_i) \Phi_{i^*}(T_i)}{1 - \nu_{0i} \nu_i^*(T_i)} d\bar{z},$$

$$M_i^* = \sum_{i=1}^2 \int_{\bar{z}_{i-1}}^{\bar{z}_i} \frac{E_i^*(T_i) \Phi_{i^*}(T_i)}{1 - \nu_{0i} \nu_i^*(T_i)} \bar{z} d\bar{z}, \quad \Phi_{i^*}(T_i) = \int_0^{\bar{z}_i} \alpha_{i^*}(T_i) dT.$$

Здесь $\bar{\sigma}(z) = \sigma(z) / (E_0 \alpha_{i_0} t_0)$ удовлетворяет условию

$$\int_0^1 \bar{\sigma}(z) dz = \int_0^1 z \bar{\sigma}(z) dz = 0.$$

Исследовано температурное поле и обусловленные им напряжения в свободной от силовых нагрузок двухслойной пластине, составляющие которой изготовлены из керамики ZrO_2 и титанового сплава $Ti-6Al-4V$ с зависимыми от температуры термомеханическими характеристиками в диапазоне температур от 300К до 1100К. Поверхности пластины поддерживаются при постоянной температуре. Анализ проведенных исследований указывает на важность учета влияния термочувствительности материалов слоистой пластины на ее термонапряженное состояние.

Литература

1. Кушнір Р.М., Попович В.С. Термопружність термочутливих тіл. – Львів: Сполум, 2009. – 412 с. – (Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. Я.Й. Бурака, Р.М. Кушніра: В 5 т. – Т. 3.).
2. Процюк Б.В. Квазистатические температурные напряжения в многослойной пластине при нагреве тепловым потоком // Теор. и прикл. механика. – 2003. – №1. – С. 21–26.
3. Tanigawa Y., Akai T., Kawamura R. and Oka N. Transient heat conduction and material thermal stress problems of a nonhomogeneous plate with temperature-dependent properties // Journal of Thermal Stresses. – 1996. – V.19. –No.1. - P. 77–102.
4. Кушнір Р.М., Попович В.С., Гарматій Г.Ю. Неусталений термопружний стан шаруватих термочутливих тіл // Импульсные процессы в механике сплошных сред: Мат. X Международной научной конференции (19-22 августа 2013). – Николаев: КП “Миколаївська обласна друкарня”, 2013. – С. 3-6.

КОЛЕБАНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН СИММЕТРИЧНОГО СТРОЕНИЯ ПО ТОЛЩИНЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ АКУСТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Куштур Р.М., Марчук М.В., Паймушин В.М.

(Львов, Казань)

Трехслойные пластины занимают особенное место среди многослойных несущих конструкций. Они используются в тех случаях, когда необходима повышенная изгибная жесткость и минимальная материалоемкость [1, 3]. Высокая изгибная жесткость в этом случае достигается путем разнесения на некоторое расстояние за счет промежуточного легкого заполнителя двух жестких внешних слоев. Заполнителями часто служат различные пенопласты, соты из металлической фольги, либо полимерной бумаги и др. в зависимости от функционального предназначения среднего слоя. В частности, при необходимости обеспечения требуемого уровня звукоизоляции, он должен обладать высокими демпфирующими свойствами [6]. Несущие слои изготавливаются, как правило, из композиционных материалов с высокими удельными жесткостными характеристиками – стеклопластиков, углепластиков и боропластиков, в зависимости от целевого предназначения.

В предлагаемом докладе рассмотрена слоистая плоская структура, которая состоит из трех пластин и находится под воздействием нормальной акустической нагрузки [2, 4] на верхнюю лицевую плоскость. Предполагается, что на многослойных плоскостях выполняются условия идеального механического контакта. Нижняя лицевая плоскость свободна от нагрузок. Верхний и нижний слои имеют одинаковые толщины и изготовлены из одного и того же материала.

Вследствие действия на межслойных плоскостях контактных касательных напряжений динамическое напряженно-деформированное состояние каждого из слоев описывается системами из пяти дифференциальных уравнений движения относительно продольных и нормального перемещений точек срединных плоскостей и углов наклона нормальных элементов [5]. При выводе этих уравнений удовлетворены точно граничные условия в напряжениях на лицевых поверхностях каждого слоя [7]. Путем использования условий идеального механического контакта на межслойных плоскостях и симметрии строения пакета по толщине, задача о вынужденных колебаниях прямоугольных трехслойных пластин при действии нормальной акустической нагрузки сведена к отысканию решения системы пяти дифференциальных уравнений в частных производных. Искомыми функциями являются общий прогиб слоистой структуры и углы наклона нормальных до деформирования к срединным плоскостям элементов в среднем и одном из лицевых слоев.

В качестве примера рассмотрен пакет, состоящий из жестких внешних слоев, в которых отсутствует демпфирование, и мягкого изотропного относительно упругих и демпфирующих свойств среднего слоя. Для случая шарнирного закрепления кромок нижнего слоя по всему контуру получены выражения для контактных межслойных напряжений. Проанализировано влияние соотношений толщин и физико-механических характеристик составляющих пакета на их уровни. Установлено преобладание касательных контактных напряжений над нормальными. Выявлены области возможных нарушений идеального механического контакта на межслойных плоскостях.

Работа выполнена при финансовой поддержке УФФИ (прект № Ф53.1/028), а также РФФИ (проект и грант № 13-08-90435 UKR-F-A).

Литература

1. *Алфутов Н. А., Зиновьев П. А., Попов Б. Г.* Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
2. *Карачун В. В., Мельник В. Н.* Волновые совпадения и особенности его проявления // *Авиационно-космическая техника и технология.* – 2010. – № 10(77). – С. 153–157.
3. *Кобелев В. Н., Коварский Л. М., Тимофеев С. И.* Расчет трехслойных конструкций: Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 304 с.
4. *Мельник В. Н., Карачун В. В.* Дифракция звукового излучения на импедансном основании. Смешанная краевая задача // *Авиационная техника и технология.* – 2012. – № 8(95). – С. 199–202.
5. *Осадчук В. А., Марчук М. В.* Математическая модель динамического деформирования податливых к сдвигу и сжатию композитных пластин // *Прикл. проблемы механики и математики.* – 2005. – Вып. 3. – С. 43–50.
6. *Паймушин В.Н.* О задачах излучения звуковой волны при динамическом процессе деформирования пластин с учетом внешнего и внутреннего демпфирования // *Мат. методы и физ.-мех. поля.* – 2013. – 56, № 2. – С. 72–85.
7. *Пелех Б. Л., Сухорольский М. А.* Контактные задачи теории упругих анизотропных оболочек. – Киев: Наук. думка, 1980. – 214 с.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЁТА ОБЪЁМА РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В ГАЗОГИДРАВЛИЧЕСКОМ ПРИВОДЕ С ВЫТЭСНИТЕЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ

Лалабеков В.И., Самсонович С.Л.

(Москва)

Стремление к энергомассовому совершенству элементной базы летательного аппарата приводит к необходимости расчёта рабочих параметров с обеспечением минимума коэффициентов запаса прочности конструктивного исполнения, с учётом как можно большего числа факторов, существенно влияющих на основные технические и эксплуатационные показатели изделий.

Подобная задача актуальна и для разработки широко используемых в составе БЛА газогидравлических приводов органов управления, в энергетический канал которого входит твёрдотопливный газогенератор (ТГ) и источник энергии с вытеснительной (ВИЭ) подачей рабочей жидкости под давлением к рулевым машинам.

Если для расчёта массы ТГ достаточно иметь данные по требуемой мощности, максимальному давлению и времени работы, то для оценки запаса рабочей жидкости, составляющий половину массы ВИЭ, необходимо определение следующих компонентов [1]:

1. Объёма, потребляемого рулевыми машинами (РМ) при движении штока, в ходе выполнения задачи управления – интегрального хода;
2. Объёма, требуемого для компенсации непроизводительно расходуемой рабочей жидкости через зазоры золотников РМ, при неподвижном их состоянии;
3. Объёма, требуемого для компенсации непроизводительно расходуемой рабочей жидкости через зазоры золотников РМ, при их движении.
4. Объёма, требуемого для компенсации непроизводительно расходуемой жидкости на участке от момента запуска ВИЭ до достижения требуемой мощности;
5. Увеличения объёма, вследствие объёмного расширения жидкости при действии максимальной температуры эксплуатации в составе ЛА.

Если полезный объём определяется достаточно просто, как произведение интегрального хода на эффективную площадь поршня, то основное внимание при расчёте запаса рабочей жидкости в баке вытеснителя должно быть уделено учёту тех внешних факторов, которые определяют разброс величины непроизводительного расхода. К ним относятся, в первую очередь, температура эксплуатации окружающей среды и зависящий от неё диапазон рабочего давления, обусловленный изменением кинематических показателей рабочей жидкости и внутрибаллистических характеристик топлива от температуры.

Для решения поставленной задачи необходимо построение математической модели работы системы ТГ – ВИЭ - РМ, представляющей собой ряд взаимосвязанных, взаимодействующих элементов, параметры которых изменяются в зависимости от условий эксплуатации в составе ЛА и, в частности, от температуры окружающей среды.

Математическая модель привода, представленная в работе [2], разработана с учётом линейной зависимости непроизводительного расхода рабочей жидкости только от действующего в системе давления, вследствие чего величина объёма определяется с погрешностью.

Разработанная математическая модель расчёта объёма учитывает все перечисленные факторы и позволяет получить более точное решение задачи определения требуемого объёма для выполнения приводом управления движением ЛА в течение заданного времени.

Для сравнительной оценки эффективности расчёта объёма использованы математические модели двух вариантов исполнения:

1) модель, построенная с учётом непроизводительного расхода Q_{ym} , зависящего от температуры и давления $Q_{ym} = f(t, P)$, и приращения объёма рабочей жидкости $\Delta V_i(t)$ в зависимости от температуры $\Delta V_i = f(t)$.

2) модель, в которой непроизводительный расход линейно зависит только от давления $Q_{ym} = k_{ym} \cdot P_n$.

Как следует из результатов моделирования на примере базового образца привода, разница в объёмах для времени работы привода $t = 60c$ составляет $\Delta V = V_v - V = 500cm^3$, что по отношению к объёму, рассчитанному без учёта влияния фактора температуры на вязкость рабочей жидкости $V = 3500 cm^3$ даёт недостачу объёма величиной $\bar{\Delta V} = (\Delta V_v / V) \cdot 100\% = 14.3\%$. По данным моделирования в результате привод закончит свою работу на 51.4с вместо требуемых 60с не выполнив задачу управления в течение 8,6с.

Разработанная математическая модель с учётом действия температурного фактора на параметры рабочей жидкости даёт более точный результат расчёта объёма для ВИЭ газогидравлического привода ЛА.

Литература

1. Лалабеков В.И., Прилипов А.В. Газогидравлические приводы органов управления летательных аппаратов. Основы разработки, ФГУП «НТЦ «Информтехника», 2012 г.

2. Евстратов Д.И., Лалабеков В.И. Методика расчёта объёма рабочей жидкости в ПАД, Сборник докладов IX конференции «Проблемы

совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем ЛА», Москва, МАИ, июнь 2012 г.–М.: МАИ-ПРИНТ, 2012, стр. 219...224.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОБ ИЗГИБЕ ТРЕХСЛОЙНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ В УПРУГОЙ СРЕДЕ

Леоненко Д.В., Шавловская О.Г.

(Гомель)

Трехслойные элементы конструкций типа пластин и оболочек широко применяются в современных отраслях промышленности, что обуславливает необходимость разработки методов их расчета. В монографии [1] исследовано статическое и динамическое деформирование трехслойных пластин и оболочек при отсутствии упругих сред. В работе [2] исследована механика трехслойных пластин и стержней, скрепленных с упругим основанием. В монографии [3] исследовано поведение однослойных элементов конструкций на упругом основании. Здесь выполнена постановка задачи о статическом деформировании трехслойной цилиндрической оболочки радиуса R упругой среде.

В тонких изотропных несущих слоях оболочки толщиной h_k приняты гипотезы Кирхгофа–Лява. В толстом заполнителе ($h_3 = 2c$) учитывается работа поперечного сдвига и обжатие по толщине, изменение перемещений принято линейным по поперечной координате. На границах контакта используются условия непрерывности перемещений. Деформации малые. К внешним поверхностям несущих слоев приложены распределенные внешние нагрузки q_α^k и реакция упругих сред q_{3r}^k .

Уравнения равновесия трехслойной цилиндрической оболочки следуют из вариационного принципа Лагранжа:

$$\delta A = \delta W,$$

где δA – вариация работы внешних сил, δW – вариация работы внутренних сил упругости.

Уравнения равновесия рассматриваемой оболочки в усилиях имеют вид ($k = 1, 2; i = 1, 2, 3$)

$$L_i^k = 0,$$

$$\text{где } L_1^1 = -(RT_{11}^1)_{,1} - (T_{21}^1)_{,2} - (0,5RM_{11}^{3+})_{,1} - (0,5M_{21}^{3+})_{,2} + 0,5c^{-1}RT_{13}^3 + \\ + (R + c + h_1)(q_1^1 + q_{1r}^1),$$

$$\begin{aligned}
L_2^2 = & -\left(T_{22}^2\right)_{,2} - \left(\frac{1}{R}c_2^2M_{22}^2\right)_{,2} - \left(RT_{12}^2\right)_{,1} - \left(c_2^2M_{12}^2\right)_{,1} - \left(B_{22}M_{22}^{3-}\right)_{,2} - \left(RB_{22}M_{12}^{3-}\right)_{,1} - \\
& -c^{-1}RB_{22}T_{23}^3 - B_{22}M_{23}^{3-} + \left(R \pm 0,5h_2c_2^2\right) \left(1 - (c+h_2)\frac{1}{R}\right) \left(q_2^2 + q_{2r}^2\right), \\
& \dots \\
L_3^2 = & -\left(RM_{11}^2\right)_{,11} - \left(c_2^2M_{12}^2\right)_{,12} - \left(M_{21}^2\right)_{,12} - \left(c_2^2\frac{1}{R}M_{22}^2\right)_{,22} + T_{22}^2 - \left(R\frac{h_2}{4}M_{11}^{3-}\right)_{,11} - \\
& -\left(RD_{22}M_{12}^{3-}\right)_{,12} - \left(\frac{h_2}{4}M_{21}^{3-}\right)_{,12} - \left(D_{22}M_{22}^{3-}\right)_{,22} + \\
& + 0,5M_{22}^{3-} - c^{-1}\left(R\frac{h_2}{4}T_{13}^3\right)_{,1} - \frac{1}{2}\left(RM_{13}^{3-}\right)_{,1} - c^{-1}\left(RD_{22}T_{23}^3\right)_{,2} - \\
& -\left(D_{22}M_{23}^{3-}\right)_{,2} - \frac{1}{2}\left(M_{23}^{3-}\right)_{,2} - \frac{1}{2}c^{-1}RT_{33}^3 + (R - (c+h_2)) \times \\
& \times \left[q_3^2 + q_{3r}^2 - 0,5h_2\left(q_{1,1}^2 + q_{1r,1}^2 + R^{-1}c_2^2\left(q_{2,2}^2 + q_{2r,2}^2\right)\right)\right].
\end{aligned}$$

Полученная система уравнений с точностью до обозначений при $q_{3r}^k = 0$ совпадает с уравнениями равновесия трехслойной оболочки, не связанной с упругой средой [1].

Граничные условия запишутся в виде

$$L_{\alpha\beta N}^k = N_{\alpha\beta 0}^k, \quad L_{\alpha Q}^k = Q_{\alpha 0}^k, \quad L_{\alpha M}^k = M_{\alpha\alpha 0}^k, \quad (\alpha, \beta, k = 1, 2),$$

где $N_{\alpha\beta 0}^k$, $Q_{\alpha 0}^k$, $M_{\alpha\alpha 0}^k$ – заданные обобщенные нагрузки,

$$L_{1\beta N}^k = R\left(T_{11}^k + 0,5M_{11}^{3\pm}\right), \quad L_{2\beta N}^k = c_2^kM_{12}^k + R\left(T_{12}^k + B_{k2}M_{12}^{3\pm}\right),$$

$$\begin{aligned}
L_{\alpha Q}^k = & RM_{11,1}^k + c_2^kM_{12,2}^k + M_{21,2}^k \mp 0,25Rh_kM_{11,1}^{3\pm} \mp \\
& \mp RD_{k2}M_{12,2}^{3\pm} \mp 0,25h_kM_{21,2}^{3\pm} + 0,25c^{-1}h_kRT_{13}^3 + 0,5RM_{13}^{3\pm},
\end{aligned}$$

$$L_{\alpha M}^k = R\left(-M_{11}^k \pm 0,25h_kM_{11}^{3\pm}\right).$$

Литература

1. Старовойтов Э. И. Вязкоупругопластические слоистые пластины и оболочки. – Гомель: БелГУТ, 2002. – 343 с.
2. Плескачевский Ю.М. Старовойтов Э. И., Леоненко Д. В. Механика трехслойных стержней и пластин, связанных с упругим основанием. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 560 с.

3. Власов В. З., Леонтьев Н. Н. Балки, плиты, оболочки на упругом основании. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 491 с.

ИЗНОСО- И ФРЕТТИНГОСТОЙКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИГАТЕЛЕЙ И ЭНЕРГОУСТАНОВОК ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Лесневский Л.Н., Ляховецкий М.А., Тюрин В.Н.

(Москва)

Для узлов трения элементов двигателей и энергоустановок летательных аппаратов, работающих в условиях износа и фреттинг-коррозии, характерно непрерывное ужесточение условий их эксплуатации при высоких требованиях к ним по надежности и ресурсу. Одним из эффективных путей достижения требуемых уровней ресурса и надежности рабочих поверхностей узлов трения в этих случаях является использование защитных покрытий.

Как известно, в качестве конструкционных материалов при создании двигателей и энергоустановок широко используются сплавы «вентильных» металлов: Al, Ti, Mg, Zr. В качестве единого метода формирования покрытий для этих материалов в настоящей работе рассматривается метод микродугового оксидирования (МДО), позволяющий получать на поверхности деталей из таких материалов керамические слои (покрытия) с кристаллической структурой толщиной от нескольких микрометров до десятых долей миллиметра, отвечающие самым высоким требованиям по износо- и фреттингостойкости.

В работе рассмотрена обобщенная картина процесса МДО и особенности, присущие каждому из рассматриваемых сплавов, обсуждаются условия и режимы протекания процесса для получения повышенных значений износо- и фреттингостойкости.

Для исследования износо- и фреттингостойкости формируемых покрытий была спроектирована и изготовлена специализированная установка, позволяющая получать экспериментальные данные: интенсивности разрушения контактирующих поверхностей при фреттинг-коррозии в зависимости от механических параметров контактного взаимодействия, природы контактирующих материалов, состава внешней среды и т.п.; энергетические показатели трибоконтакта, позволяющие определять природу взаимодействия трущихся поверхностей и прогнозировать вид и развитие разрушения в данных условиях моделирования.

Проведенные эксперименты по исследованию МДО покрытий в различных парах трения позволили установить, что основными параметрами (факторами), влияющими на величину износа Δ являются: амплитуда фреттинга A , контактное давление или нормальная нагрузка в контактной паре N , частота колебаний ν , число циклов нагружения N_{ν} . Были построены зависимости

величины износа $\Delta=f(v,A)$, $\Delta=f(N)$; $\Delta=f(N_w)$, которые позволяют в значительной степени оценить влияние этих факторов на долговечность покрытий.

Для описания и анализа процесса фреттинг-коррозии были использованы так называемые карты фреттинга. Рассмотрено три различных типа карт фреттинга: карта действия нормальной силы N при различных значениях амплитуды фреттинга A , карта действия нормальной силы N при различных значениях тангенциальной силы T (силы трения) и карта зависимости износа Δ и фреттингостойкости (числа циклов N_w) от амплитуды A . Построение таких карт фреттинга позволяет определить области режимов взаимодействия рассматриваемой пары трения, отличающихся преимущественным видом повреждения в пятне контакта. Были определены четыре такие области по критериям наличия или отсутствия повреждений в контакте при фреттинг – коррозии: область упругого деформирования, область пластического деформирования и частичного пограничного скольжения, переходная (смешанная) зона пластического деформирования и скольжения, область полного скольжения. Таким образом, была получена информация о природе взаимодействия МДО покрытий в контакте при различных режимах фреттинга и сделана оценка защитной способности МДО покрытий.

О ПОСТРОЕНИИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ СХЕМ БОКОВЫХ РУЧЕК УПРАВЛЕНИЯ САМОЛЕТОМ.

Макарин М.А., Оболенский Ю.Г., Самсонович С.Л.

(Москва)

Необходимость применения боковых ручек управления самолетом первоначально возникла в военной авиации. Для того, чтобы летчики легче переносили высокие перегрузки, было разработано специальное кресло, которое могло отклоняться и придавать пилоту положение близкое к лежащему и позволяло уменьшить разность высот сердца и головного мозга. Применение такого кресла потребовало пересмотра органов управления в кабине, поэтому ручку управления самолетом установили в подлокотнике и сделали малоходной. [1]

В гражданских самолетах, где большинство систем и процессов на борту автоматизировано, пилотам в большинстве режимов полета отводится роль наблюдателя. Для улучшения обзорности мониторов и общей эргономики кабины конструкторы самолета А-320 отказались от штурвалов, заменив их боковыми джойстиком. [2].

Конструктивно-кинематические схемы существующих боковых ручек управления делятся на тензометрические, пассивные и активные.

Тензометрический джойстик является экспериментальным вариантом. По

сути он представляет собой жестко зафиксированную рукоятку в подлокотнике, оснащенную датчиками усилия. Достоинством данной конструкции является исключительная простота и минимальные массогабаритные показатели. Однако, такое решение не обеспечивает ни точность ни безопасность управления и вызывает крайне негативные отзывы пилотов, из-за крайне малой информативности.

Пассивные боковые ручки, применяющиеся, в частности, на А-320, являются лишь задатчиками положения. И, если к ним не приложена управляющая сила, всегда находятся в нейтральном положении. Достоинства данной конструкции: простота в реализации т.к. для загрузки применяются пружины и демпферы. Недостатки: большие габариты и, главное, возможность возникновения путаницы в управлении, т.к. джойстики не связаны между собой кинематически.

Перспективным направлением является разработка активных боковых ручек управления, которые обеспечивают пилота актуальной тактильной информацией, позволяют избежать путаницы в управлении, однозначно задавая положение для нескольких рукояток, дают возможность реализации пересиливания, а также имеют другие преимущества, например, гибкость в настройке ходов и усилий по крену и тангажу.

Актуальными остаются проблемы улучшения информативности управления для боковых ручек. На случай отказа электропитания или других сбоев в работе оборудования иногда применяют механическую связь с тягами или тросами, как на традиционных штурвалах.

Существующие образцы боковых ручек управления самолетом выполнены с использованием различных кинематических схем с применением приводов различной природы: гидравлических и электромеханических.

Гидравлические приводы имеют высокое быстродействие и обеспечивают пилота актуальной тактильной информацией без каких-либо существенных задержек, но применяются, в основном, на экспериментальных моделирующих стендах из-за сложностей установки и обслуживания гидравлических агрегатов в кабине. На практике предпочтение отдается электромеханическим приводам, построенным по различным кинематическим схемам содержащим карданный шарнир, конические зубчатые колеса или магнитный подвес. [3]

В описываемых устройствах, как правило, применяются датчики положения, но существуют схемы, в которых применяется пара датчиков для каждого канала: датчики положения и датчики усилия. Такое решение обеспечивает более полную картину для составления модели устройства, повышает отказобезопасность системы и дает возможность плавного и податливого перемещения рукоятки. По сути, рукоятку перемещает как пилот так и следящая система, которая реагирует на сигналы датчиков усилий, а

фактическое положение контролируется с помощью датчиков положения. [3]

В настоящее время авторами разрабатывается конструкция активной боковой ручки на основе электромеханических приводов с редукторами на основе волновой передачи с телами качения. Каждый исполнительный механизм представляет собой цилиндр, в котором расположены безкорпусной электродвигатель и волновой редуктор. Исполнительные механизмы расположены один над другим и соединены с помощью стойки, при этом верхний привод соединен с выходным звеном нижнего. Продольные оси исполнительных механизмов приводов являются скрещивающимися прямыми, расположенными под углом 90 градусов. Таким образом, исполнительные механизмы образуют кардан с двумя степенями подвижности. Для организации обратной связи применяются датчики тока двигателя и положения выходного звена исполнительного механизма.

Данная схема выгодно отличается от аналогичных, т.к. позволяет очень компактно разместить электроприводы и обеспечить пилота (пилотов) актуальной и однозначной тактильной информацией.

Литература

1. В.И.Алимов «Проблема потери сознания летчиками-истребителями при маневрировании с большими перегрузками». Авиастроение, экспресс-информация № 17 1987 г
2. Обзор устройства кабины Airbus A320 <http://lx-photos.livejournal.com/89619.html>
3. Dietrich Hanke, Christian Herbst «Active sidestick technology- a means for improving situational awareness» Aerospace science technology 1999

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Мартиросов М.И., Серпичева Е.В.

(Москва)

Механика разрушения элементов конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) весьма сложна из-за анизотропии, взаимного влияния напряженно-деформированного состояния (НДС) отдельных монослоев, образующих композитный пакет (КП), специфики структуры и других причин.

Анализ прочности КП обычно сводится к анализу НДС его монослоев и определению их коэффициентов запаса по различным критериям. Минимальный из них определяет запас прочности всего КП.

Для КП не существует однозначного критерия разрушения. Имеющиеся критерии являются феноменологическими и описывают прочность в монослое на основе экспериментов.

У ряда применяемых на практике критериев разрушения КП серьезным недостатком является невозможность определения причины разрушения монослоя (разрушается матрица или волокно). Однако разрушение матрицы отдельного монослоя может не привести к исчерпанию его несущей способности и КП может и далее воспринимать действующую нагрузку (критерии Хилла, Хоффмана, Цая-Ву и другие). В настоящее время получили распространение критерии, которые дают возможность определить запасы прочности матрицы и волокна отдельно (критерии Пака, Хашина-Ротема).

В работе рассматривается плоская удлиненная панель из углепластика на основе препрега HexPly M21/40%/285T2/AS4C-6K производства фирмы HexcelComposites, США (углеродная ткань 285T2/AS4C на основе углеродного высокомодульного волокна HexTow AS4C 6K GP и эпоксидное модифицированное связующее M21) с форматом укладки $+45^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}/+45^{\circ}$). Проводится расчет на прочность данной панели методом конечных элементов под действием различных комбинаций заданных погонных нагрузок (в плоскости КП). Принято шарнирное закрепление данной панели по всему контуру. Используются следующие критерии разрушения: максимальных напряжений, максимальных деформаций, Хилла, Хоффмана, Цая-Ву, Далиа, Фишера, Ханкинсона, Коуина, Пака, Хашина-Ротема и другие. Дается сравнение различных критериев разрушения панели из ПКМ. Результаты представлены графически. Выработаны практические рекомендации. Расчеты проведены с помощью программного комплекса NX 7.5.

Работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ (код проекта НШ-2047.2012.8) и гранта РФФИ (код проекта 11-01-00540-а).

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНОЙ КОНСТРУКЦИИ СОСУДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Миринова Л.И.

(Подольск)

Температурные напряжения, возникающие в процессе сварки оболочечных элементов конструкции, имеют некоторые особенности от аналогичных напряжений в пластинах. Это касается характера термонапряжений в окрестности сварного соединения. В процессе сварки вся конструкция испытывает осесимметричное термическое нагружение, неравномерно

распределенное по поверхности. После сварного соединения оболочечные конструкции имеют осесимметричное остаточное напряженное состояние. Оно локализовано в околошовной узкой полосе и может быть отнесено к быстроменяющемуся напряженному состоянию с краевыми эффектами. Такой процесс можно рассматривать как локальное термонапряжение под действием высокоградиентного точечного температурного поля.

Проведено исследование термонапряженного состояния сварного алюминиевого бака (сосуда высокого давления). Бак имеет горизонтальный шов обечайки и два кольцевых шва днища сосуда. Внутренний диаметр обечайки \varnothing 494 мм, толщина стенки обечайки – 6 мм, высота изделия – 700мм. Способ сварки – автоматическая дуговая неплавящим электродом в среде защитных газов.

Для анализа термонапряженного состояния натурной конструкции использовались расчетные математические модели метода определения локального теплового экстремума в упругой тонкой оболочке, изложенные в работе [1]. Учитывались особенности сварки алюминиевых сплавов, обусловленные наличием окисной пленки на поверхности металла. Образованная окисная пленка в процессе сварки препятствует сплавлению частиц металла и загрязняет шов. Температура плавления окисной пленки 2050°C.

Приведены расчетные значения температурных напряжений, возникающих в околошовных зонах сварных швов (продольного и кольцевых). Установлено, что исследуемая конструкция сосуда высокого давления имеет неоднородное остаточное термонапряженное состояние. Сварные напряжения продольного шва обечайки бака ниже сварных напряжений шва кольцевого соединения. Разброс уровня колеблется в пределах $1,2 \div 1,4$ раза и зависит от температурного режима сварочной ванны, т.е. от режимов сварки. Отсюда появляются возможности управления термонапряженным состоянием сварных конструкций за счет оптимизации технологического процесса сварки.

Литература

1. Миронова Л.И. Параметры оптимального управления термонапряженным состоянием конструкций оболочечного типа при термическом нагружении. – Проблемы машиностроения и автоматизации. №1, 2013, с.101-105.

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ СТАБИЛИЗАТОРОВ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Москвитин Г.В., Балашова А.В.

(Москва)

Для гашения высоких частот и стабилизации колебаний в трубопроводных системах высокого давления разработан стабилизатор, в котором упругие камеры, расположенные в потоке жидкости, заполнены упругим наполнителем с большими демпфирующими свойствами[1]. Высокая эффективность гашения колебаний давления может быть достигнута только при распределенном по длине воздействии на пульсирующий поток, которое конструктивно обеспечивается путем сборки стабилизатора из типовых секций.

Предложена конечно-элементная модель для численного исследования и оценки напряженно-деформированного состояния основного упругого демпфирующего элемента стабилизатора - эллиптической трубки с наполнителем, нагруженной внешним давлением[2]. Достоинством модели является ее универсальность. Имеются возможности варьировать геометрические параметры, условия закрепления, характеристики материала и жидкости, демпфирование, а также задавать произвольную зависимость изменения величины внешнего давления от времени.

Для упругой камеры с реальными параметрами определены собственные частоты и формы колебаний, получены амплитудно-частотные характеристики, для случая работы поршневого насоса вычислены деформации и напряжения в наиболее нагруженной зоне - на наружной поверхности в середине оболочки.

Разработана методика расчета на усталостную прочность по значениям вычисленных напряжений в наиболее нагруженных зонах упругой камеры стабилизатора для многосного напряженного состояния, полученная преобразованием классических формул [3]. Получена расчетная оценка выносливости при регулярном нагружении с учетом различного демпфирования.

Литература

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

2. *Москвитин Г.В., Балашова А.В.* Некоторые результаты численного исследования напряженно-деформированного состояния стабилизаторов волновых процессов. - Труды XX международного семинара «Технологические проблемы прочности». Подольск. - 2013. С.103-110.

3. *Кагаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П.* Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 224с.

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И СЕЙСМОСТОЙКОСТИ РЕАКТОРА ИВВ.10М

Москвитин Г.В., Роцин М.Н., Балашова А.В.

(Москва)

Задачи обеспечения прочности и сейсмостойкости ядерных реакторов являются основными при разработке, реализации в производстве и эксплуатации ядерных установок. Необходимо определение напряженно-деформированного состояния элементов конструкций при различных режимах эксплуатации, включая сейсмическое воздействие, с учетом требований и рекомендаций действующих норм расчета на прочность и норм проектирования сейсмостойких атомных станций. Предлагаемый материал содержит результаты численного исследования прочности и сейсмостойкости новой перспективной конструкции исследовательского водо-водяного реактора ИВВ.10М [3].

Для получения расчётного обоснования правильности заложенных конструкторских решений выбран метод расчета, разработаны подробные конечно-элементные модели, соответствующие конструкторской документации и реально отражающие взаимосвязь всех основных несущих элементов с действующими на конструкции нагрузками. Проведено численное исследование статической прочности и устойчивости, сопротивления хрупкому разрушению, длительной статической прочности, длительной циклической прочности, отклика при сейсмическом воздействии. При этом определены собственные частоты и формы колебаний конструкции в соответствии с линейно-спектральным методом. При учете реальных спектров ответа рассчитаны динамические нагрузки при сейсмическом воздействии. Получены количественные оценки параметров напряженно-деформированного состояния в опасных областях.

Результаты расчетов сопоставлены с действующими в отечественной атомной энергетике нормативными документами. Обосновано соответствие новых конструкторских решений требованиям безаварийной работы реакторной установки в течение всего срока службы не только при нормальных условиях эксплуатации, но и в экстремальной ситуации, в частности, при землетрясении [4,5].

Литература

1. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86. М.: Энергоатомиздат. - 1989. - 524с.

2. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций НП-031-01. Вестник Госатомнадзора России. – 2001. - №6. С.7-31.

3. Патент RU 90252 U1. Ядерный исследовательский реактор.

4. *Роцин М.Н., Москвитин Г.В., Балашова А.В.* К вопросу исследования прочности корпуса и внутрикорпусных устройств реактора ИВВ.10М. Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2010. - №4. - С.47-55.

5. *Роцин М.Н., Москвитин Г.В., Балашова А.В.* Исследование напряженно-деформированного состояния корпуса и внутрикорпусных устройств реактора ИВВ.10М с учетом сейсмических воздействий. Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2012. - №4. – С.101-106.

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНОГО СОСТОЯНИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБОКОМПРЕССОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Мотова Е.А., Никитина Н.Е., Тарасенко Ю.П.

(Нижний Новгород)

В процессе эксплуатации ротора турбокомпрессора высокого давления (ТКВД) двигателя ДЖ59Л рабочие лопатки испытывают высокие температуры, подвергаются значительным инерционным, знакопеременным и циклическим нагрузкам, воздействию химически агрессивных сред. Указанные факторы могут привести к существенным изменениям упругих свойств и структурного состояния лопаток, вплоть до возникновения пластических деформаций и даже микроповреждений в материале. Наиболее существенные из этих изменений можно оценить на основе применения неразрушающих методов контроля [1-2]. Неразрушающий контроль позволяет выявить ухудшение состояния материала деталей еще до возникновения макротрещин. Скорость распространения упругих волн и затухание ультразвука являются важнейшими информативными характеристиками акустических методов контроля и диагностики материала.

Нами исследованы рабочие лопатки компрессора ТКВД из нержавеющей жаропрочной стали 14X17H2Щ, после эксплуатации в течение установленного срока и последующей термической обработки. В качестве объектов акустического контроля выбрано по три лопатки из шестой, седьмой и восьмой ступеней, отработавших установленный срок, те же лопатки исследованы после проведения термической обработки материала.

Совокупность акустических измерений с использованием эхо-импульсного метода описана нами в работах [3-5] и применена для прецизионного измерения времени распространения ультразвуковых импульсов в материале деталей рабочих лопаток ротора ТКВД. Для трех серий лопаток не удалось обеспечить разрешение импульсов сдвиговых волн с частотами меньше 9 МГц.

Сдвиговые волны обладают большой информативностью при исследовании технического состояния материалов. При возникновении напряжений или пластической деформации вдоль данного направления скорости сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперек этого направления, будут меняться по-разному. Параметром, характеризующим это различие, является параметр акустической анизотропии конструкционного материала. Акустические измерения для продольных волн провести не удалось, так как время их распространения в тонком слое материала почти в два раза больше, чем у сдвиговых упругих волн.

Для каждой серии испытуемых деталей проведены прецизионные (с погрешностью 0,01 мкс) измерения задержек импульсов сдвиговых волн взаимно-перпендикулярной поляризации и измерения ослабления их амплитуды в материале. Контролю подвергали среднюю часть вблизи основания пера лопатки. Распространение сдвиговых волн - по нормали к поверхности лопатки, поляризация волны - вдоль и поперек оси лопатки.

На основании прецизионных измерений задержек импульсов сдвиговых волн взаимно-перпендикулярной поляризации частотой 9,5 МГц вычислены параметры собственной акустической анизотропии материала лопаток трех рабочих ступеней ротора ТКВД. По результатам амплитудных измерений определены коэффициенты затухания сдвиговых волн в материале детали.

Данные экспериментов позволили сделать следующие выводы.

1. Представленные для измерений лопатки имеют самую малую (менее 4 мм) толщину из исследованных нами, что совсем уже затрудняет разрешение эхо-импульсов. Удалось провести надежные измерения только для импульсов сдвиговых волн с основной частотой 9 МГц.

2. Выявлен большой разброс акустических свойств как между сериями деталей (лопатки 6-й, 8-й или 7-й ступеней), так и между разными лопатками одной ступени. Поэтому результаты измерений на отдельных лопатках с трудом поддаются обобщению.

3. Параметр собственной акустической анизотропии материала после термообработки обычно уменьшается. Существенное уменьшение указанного параметра наблюдается для лопаток 6-й и 8-й ступеней. В лопатках 7-й ступени акустическая анизотропия после термообработки растет.

5. Величина коэффициента затухания сдвиговых волн после восстановительной термообработки либо не меняется, с учетом большой погрешности его измерения, либо растет, что совпадает с результатами ранее проведенных исследований. Существенный (более 20%) рост наблюдается для деталей 6.3, 8.2 и 7.2. Для лопатки 6.1 указанный параметр увеличился в 1,5 раза, причем для волн обеих поляризаций.

6. Для исследованных серий лопаток выявлено наибольшее влияние условий эксплуатации на техническое состояние материала, по сравнению с аналогичными деталями, исследованными нами ранее.

Литература

1. Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Филиппов В.Н. и др. Неразрушающий контроль и диагностика. М.: Машиностроение. 1995. 488 с.
2. Ботаки А.А., Ульянов В.Л., Шарко А.В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 1983. 80 с.
3. Никитина Н.Е., Мотова Е.А. Контроль состояния компрессорных лопаток газотурбинных двигателей ультразвуковым методом // Контроль. Диагностика. 2013. № 3. С. 38-42.
4. Мотова Е.А., Никитина Н.Е., Тарасенко Ю.П. О возможности диагностики компрессорных лопаток по параметрам затухания и скорости ультразвука // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 4. С. 88-95.
5. Никитина Н.Е., Мотова Е.А., Тарасенко Ю.П. Неразрушающий контроль рабочих компрессорных лопаток авиационного двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. Вып. 3(34). Часть 1. С. 291-295.

ПОЛОГИЕ ОБОЛОЧКИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕРЕГУЛЯРНЫЕ ПЛАСТИНКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ БЫСТРОПЕРЕМЕННЫХ ПО ПРОСТРАНСТВЕННЫМ КООРДИНАТАМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ И СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В ЗОНАХ ЗАКРЕПЛЕНИЯ КРАЕВ

Мыльцина О.А., Белосточный Г.Н.

(Саратов)

Рассматриваются тонкие, прямоугольные в плане пологие оболочки стандартным образом отнесенные к декартовым координатам. Два противоположных края, которых подвергаются действию быстропеременных по одной из пространственных координат силовых и температурных факторов. Интенсивность краевых нагрузок задается в виде произведения некоторой функции $f(x, x_1) \in C^n[0, a]$ на функцию Хевисайда $H(x - x_1)$.

Для избежания скачкообразного поведения температуры и нагрузки функция f должна обращаться в ноль вместе со своими производными до необходимого порядка включительно в точке $x = x_1$. Решение несвязанной термоупругости пологих оболочек методом функции перемещений сводится к

интегрированию одного неоднородного дифференциального уравнения восьмого порядка в частных производных при неоднородных краевых условиях, содержащих функции Хевисайда. Функция перемещений разыскивается методом суперпозиции одинарного тригонометрического ряда с неизвестными переменными коэффициентами, многочленов и других функций, вид которых определяется структурой неоднородности краевых условий. Например, для оболочки двоякой кривизны, под действием линейного по толщине температурного поля, и шарнирно опертыми краями при $y = 0, y = b$:

$$[(2 + \nu)k_{11} - k_{22}] \Phi_{,122} + (k_{11} + \nu k_{22}) \Phi_{,111} = 0,$$

$$[(2 + \nu)k_{22} - k_{11}] \Phi_{,1122} + (k_{22} + \nu k_{11}) \Phi_{,2222} = (1 + \nu) \alpha \Theta_0,$$

$$\nabla^2 \nabla^2 \Phi = 0, \quad \nabla^2 \nabla^2 \Phi_{,22} = -\frac{(1 + \nu)}{h} \alpha \Theta_1 - \frac{M_0}{D} f(x, x_1) H(x - x_1).$$

Функция перемещений, если $\Theta_l (l = 0, 1)$ постоянные функции, запишется

$$\begin{aligned} \Phi(x, y) = & \sum_k \Phi_k(x) \sin \frac{k\pi y}{b} + \frac{(1 + \nu) \alpha \Theta_0}{4\Delta} \left[-18(k_{11} + \nu k_{22}) x^2 y^2 + \right. \\ & \left. 3\{(2 + \nu)k_{11} - k_{22}\} x^4 + 3\{(1 + 2\nu)k_{22} - \nu k_{11}\} y^4 \right] - \\ & - \left[\frac{\alpha(1 + \nu) \Theta_1}{6!h} + \frac{M_0}{6!D} f(x, x_1) H(x - x_1) \right] F(y), \end{aligned}$$

где $F(y) = y^6 - 3by^5 + 5b^3y^3 - 3b^5y$, $f(x, x_1) = (x - x_1)^l (l = 2, \text{ либо } 4)$

Коэффициенты $\Phi_k(x)$ тригонометрического ряда определяются как замкнутые интегралы неоднородных дифференциальных уравнений, содержащих функции Хевисайда и их производные. Постоянные интегрирования, этих уравнений, находятся из условий закрепления двух оставшихся краев оболочки, которые могут быть любыми из известных, но при условии сохранения непрерывности силовых и температурных нагрузок в угловых точках.

В случае геометрически нерегулярных пластин решения неоднородных краевых задач теплопроводности и термоупругости разыскиваются по той же схеме и сводятся к интегрированию обыкновенных неоднородных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами в виде дельта - функций и функциями Хевисайда и их производными в правых частях. Например, при краевых условиях

$$x = 0, \quad x = a$$

$$\Theta_1(x, y) = \frac{\theta_1^0}{24b^4} (y - y_1)^4 H(y - y_1), \quad W = 0,$$

$$M^{11}(x, y) = \frac{M^0}{24b^4} (y - y_1)^4 H(y - y_1);$$

$$y = 0 \quad \Theta_1(x, y) = 0, \quad W(x, y) = 0, \quad M^{22} = 0;$$

$$y = b \quad \Theta_1(x, y) = \frac{\Theta_1^0}{24b^4} (b - y_1)^4, \quad W = 0, \quad M^{22}(x, y) = \frac{M^0}{24b^4} (b - y_1)^4.$$

температурная функция $\Theta_1(x, y)$ и функция прогиба $W(x, y)$ примут вид

$$\Theta_1 = \left(\frac{a}{b}\right)^4 \sum_k \frac{\Theta_1^0 a_k}{(k\pi)^4} \left\langle \frac{sh \frac{k\pi y}{a}}{sh \frac{k\pi b}{a}} \left(ch \frac{k\pi(y-y_1)}{a} - \frac{(k\pi)^2 (b-y_1)^2}{2a^2} - 1 \right) - \left(ch \frac{k\pi(y-y_1)}{a} - \frac{(k\pi)^2 (y-y_1)^2}{a^2} - 1 \right) H(y-y_1) \right\rangle \sin \frac{k\pi x}{a} + \frac{\Theta_1^0}{24b^4} (y-y_1)^4 H(y-y_1).$$

$$W(x, y) = \sum_k \left\langle \sum_{l=1}^4 C_k^l \phi_{kl} + \left(\frac{a}{k\pi}\right)^6 M^0 a_k \left[\frac{k\pi(y-y_1)}{2a} sh \frac{k\pi(y-y_1)}{a} - 3ch \frac{k\pi(y-y_1)}{a} + \left(\frac{k\pi}{a}\right)^2 (y-y_1)^2 + 3 \right] H(y-y_1) + \sum_{l=1}^4 F_k^l \phi_{kl} H(y-y_2) \right\rangle \sin \frac{k\pi x}{a} + \frac{M^0}{24} (y-y_1)^4 \frac{ax-x^2}{2} H(y-y_1),$$

где C_k^l - постоянные интегрирования.

Количественный анализ решений теплопроводности и термоупругости показал, что во всех случаях преобладающее влияние на конфигурацию поверхности прогиба оказывает температурное поле. Область наибольших прогибов малочувствительна к силовой нагрузке и совпадает с областью наибольших перепадов температуры по толщине. По этой причине подкрепляющие элементы, в виде ребер жесткости, после предварительного анализа конфигурации термической поверхности, целесообразно располагать вне зон наибольших перепадов температур.

НАПРЯЖЕНИЯ В МНОГОСЛОЙНОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ПАНЕЛИ С ОТВЕРСТИЯМИ РАЗЛИЧНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Нерубайло Б.В., Аксенов А.В., Ву Ба Зуи

(Москва)

На основе конечноэлементной модели рассматривается напряженное состояние плоских многослойных панелей, изготовленных из большого числа

неоднородных слоев. Используются различные варианты укладки монослоя: наличие только 0/90 слоев в укладке, +45/-45 слоев и комбинированная укладка: 0/90/45/-45.

Для исследования концентрации напряжений вблизи отверстий выбрано несколько типов отверстий: круглое, квадратное, ромбовидное, овальное. Для ромбовидного и квадратного отверстий сделано скругление острых углов радиусом 1 мм. Анализ результатов расчета показал, что укладка слоев в пакете оказывает значительное влияние на конечный результат, что позволяет получать более совершенные конструкции и производить их оптимизации..

Дается сравнение результатов расчета с классическим решением задачи Кирша (Kirsch G.) [1].

Литература

1. Тимошенко С.П. Теория упругости. М.: ОНТИ, 1937.- 451 с.

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНИЧЕСКИХ И КОНУСОИДАЛЬНЫХ -ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ И ГИПЕРБОЛИЧЕСКИХ - ОБОЛОЧЕК ПРИ ЛОКАЛЬНОЙ НОРМАЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

Нерубайло Б.В., Ву Ба Зуи, Тисов В.А

(Москва)

Рассматриваются круговые конические оболочки и так называемые конусоидальные оболочки вращения, поверхности которых получаются в результате вращения наклоненных относительно оси вращения криволинейных выпуклых или вогнутых образующих в виде эллипса или гиперболы (при вращении прямолинейной образующей, как частный случай, получается коническая поверхность).

Оболочки нагружены нормальной силой, создающей равномерное давление на области, ограниченной линиями кривизны. Напряженно-деформированное состояние определяется на основе метода конечных элементов: в полуаналитической версии [1] и в форме MSC/NASTRAN for Windows [2]. Дается сравнение численных результатов для различных оболочек, а для конической оболочки проводится также сравнение с натурным экспериментом [1].

Литература

1. Матвеев А.М., Нерубайло Б.В. Вопросы прочности, устойчивости и надежности конструкций. - М.: Изд-во МАИ, 2013. -185 с.
2. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows.- М.: ДМК, 2001.- 446 с.

КОЛЕБАНИЯ ПОДАТЛИВОЙ ПРИ ТРАНСВЕРСАЛЬНОМ СДВИГЕ ПЛАСТИНЫ С НЕКЛАССИЧЕСКИМ ЗАЩЕМЛЕНИЕМ КОНТУРА

Нестеров В.А.

(Красноярск)

Композиты обладают высокими удельными механическими характеристиками, что позволяет изготавливать конструкции с высокой степенью весового совершенства. Поэтому они чаще всего применяются в производстве авиационной и ракетно-космической техники. Для композитов характерна низкая сдвиговая жесткость по отношению к трансверсальным напряжениям. Учет трансверсального сдвига вносит заметные изменения в классические расчетные модели балок, пластин и оболочек. Низкой трансверсальной сдвиговой жесткостью отличаются и трехслойные конструкции, которые благодаря высоким прочностным и жесткостным свойствам также широко используются в производстве авиационных и космических летательных аппаратов.

Рассматривается задача о собственных колебаниях слоистых композитных пластин и трехслойных пластин с композитными несущими слоями. Решение основывается на математической теории пластин Рейсснера-Миндлина и численно реализуется с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Основные матрицы теории МКЭ для модального расчета пластин – матрица жесткости и матрица инерции – получены вариационным способом. Функционал задачи получен с помощью выражения для потенциальной энергии деформации пластины и кинетической энергии ее колебания [1]:

$$\begin{aligned} & \int_0^a \int_0^b \left\{ B_{11} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + D_{11} \left(\frac{\partial \psi_x}{\partial x} - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + 2B_{12} \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \right. \\ & + 2D_{12} \left(\frac{\partial \psi_x}{\partial x} - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \left(\frac{\partial \psi_y}{\partial y} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + B_{22} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \\ & + D_{22} \left(\frac{\partial \psi_y}{\partial y} - \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + B_{33} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + D_{33} \left(\frac{\partial \psi_x}{\partial x} + \frac{\partial \psi_y}{\partial y} - 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \\ & \left. + K_x \psi_x^2 + K_y \psi_y^2 \right\} dx dy - \\ & - \omega^2 \int_0^a \int_0^b \left\{ B_p (u^2 + v^2 + w^2) + D_p \left[\left(\psi_x - \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\psi_y - \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy = 0. \end{aligned}$$

Здесь ψ_x и ψ_y – осредненные по толщине деформации трансверсального

сдвига, u , v , – перемещения произвольной точки начальной плоскости вдоль осей x , y соответственно, w – прогиб пластины, ω – круговая частота колебания, B , D и K – параметры мембранной, изгибной и трансверсальной жесткости соответственно, B_ω , D_ω – параметры инерции пластины, в общем случае вычисляемые по формулам:

$$B_p = \int_{-h/2}^{h/2} \rho dz, \quad D_p = \int_{-h/2}^{h/2} \rho z^2 dz,$$

где ρ – плотность материала, а h – толщина пластины.

Используется четырехузловой прямоугольный конечный элемент пластины [2], среди основных узловых кинематических параметров которого присутствуют осредненные по толщине углы трансверсального сдвига. Показано, что данная конечно-элементная модель свободна от недостатка, который в теории оболочек получил название *эффект сдвигового запирания* [3].

Для четырехузлового конечного элемента пластины вектор узловых кинематических параметров d_e имеет следующее представление:

$$d_e = \{d_1 \ d_2 \ d_3 \ d_4\}^T,$$

где d_i ($i=1,2,3,4$) – вектор неизвестных i -го узла

$$d_i = \left\{ w_i \quad \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_i \quad \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)_i \quad \Psi_{xi} \quad \Psi_{yi} \quad u_i \quad v_i \right\}^T.$$

Сравниваются частоты и формы собственных колебаний слоистой композитной пластины с углом армирования волокон $\alpha = \pm 45^\circ$ при двух видах граничных условий: при *классическом защемлении*, когда в контурных узлах все компоненты вектора d_i равны нулю и при *защемлении со свободным сдвигом*, когда только пять компонентов этого вектора (u , v , w , $\partial w/\partial x$, $\partial w/\partial y$) равны нулю, а деформации сдвига ψ_x и ψ_y – свободны от связей. Показано, что расхождение по первой частоте для моделей с различным видом защемления контура в случае относительно толстых пластин может достигать 16 %. Еще более заметной эта разница достигает в моделях с ярко выраженной ортотропией свойств (до 29% при $\alpha = \pm 5^\circ$).

Аналогичная картина обнаружена при исследовании колебаний трехслойной пластины с композитными слоями и податливым наполнителем. Частоты (и в некоторых случаях формы) собственных колебаний трехслойки с неклассическим защемлением контура (при $\psi_x \neq 0$ и $\psi_y \neq 0$) заметно отличаются от частот колебания модели с полным защемлением сторон пластины.

Проведенные численные эксперименты показали, что невозможно дать сколько-нибудь строгой оценки частот и форм собственных колебаний податливых при трансверсальном сдвиге пластин с неклассическим защемлением (со свободным трансверсальным сдвигом) по результатам

расчетов пластин с классическим защемлением, а требуется выполнять каждый раз самостоятельное решение, которое можно осуществить, в частности, с привлечением разработанной автором конечно-элементной модели. Отличительной особенностью ее является наличие в векторе основных узловых параметров углов трансверсального сдвига, что делает возможным учитывать на контуре граничные условия по деформациям трансверсального сдвига.

Литература

1. *Васильев В. В.* Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
2. *Нестеров В. А.* Матрица жесткости конечного элемента пластины, податливой при трансверсальном сдвиге. // Механика композитных материалов. – 2011. Т. 47. - №3 - С. 399-418.
3. *Нестеров В. А.* Конечно-элементный расчет оболочки, податливой при трансверсальном сдвиге // Вестник МАИ. - 2013. Т. 20, - №4, С. 168-178.

О ВЛИЯНИИ НАСЛЕДСТВЕННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА НА НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ

Нетребко А.В., Пшеничнов С.Г.

(Москва)

Рассматриваются задачи о переходных волновых процессах в линейно-вязкоупругих круговых цилиндрических оболочках в рамках теории Тимошенко. Вязкоупругие свойства материала описываются интегральными соотношениями Больцмана-Вольтерра. Уделяется внимание двум моментам. Во-первых, ранее была разработана эффективная методика динамических расчетов переходных волновых процессов в линейно-упругих цилиндрических оболочках на основе применения интегрального преобразования Лапласа по времени с последующим вычислением оригиналов. Здесь эта методика распространена на задачи о переходных волновых процессах в оболочках из линейно-вязкоупругого материала и представлены примеры расчета величин, характеризующих динамическое напряженно-деформированное состояние круговой цилиндрической оболочки, в котором проявляются волновые эффекты, связанные с наличием вязкости.

Во-вторых, в предшествующих работах в качестве гипотезы были предложены соотношения, устанавливающие соответствие между ядрами релаксации, принадлежащими разным классам функций, но влияющими на переходные волновые процессы схожим образом. Эти соотношения ранее нашли подтверждение в определенном диапазоне изменения исходных данных в случае

конечной области распространения возмущений в нестационарных динамических задачах линейной вязкоупругости. В данной работе правомерность указанных соотношений проверена на нестационарной динамической задаче для конечной и полубесконечной круговой цилиндрической оболочки. Строгие математические критерии близости волновых процессов пока не рассматриваются, но подразумевается визуальное сравнение графиков изменения во времени или по продольной координате перемещений и усилий при одном и другом наследственном ядре.

Представлены результаты сравнительного параметрического анализа переходных волновых процессов в круговой цилиндрической оболочке, подверженной воздействию на торец продольной внешней нагрузки в виде одиночного импульса или функции Хевисайда по времени. Рассмотрена ситуация, когда ядру в виде суммы нескольких экспонент или сингулярному ядру Колтунова-Ржаницына ставится в соответствие, согласно указанной гипотезе, ядро из одной экспоненты. В определенном диапазоне изменения исходных данных показана возможность найти среди ядер релаксации, состоящих всего из одной экспоненты, те, которые окажут на переходные волновые процессы в линейно-вязкоупругой оболочке практически такое же влияние, что и изначально заданные регулярные ядра в виде суммы нескольких экспонент или сингулярные ядра.

ВЛИЯНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ЕГО АКУСТИЧЕСКИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА

Никитина Н.Е.

(Нижний Новгород)

Усталость металла является основным видом разрушения при переменном (в том числе гармоническом) нагружении [1]. Если разрушение от усталости происходит в макроупругой области напряжений, то за него ответственно зарождение усталостных микротрещин за счет процессов микротекучести преимущественно в поверхностных слоях металла [2]. Зачастую металлы и сплавы не разрушаются идеально хрупко, то есть без предшествующей пластической деформации [3].

Ультразвуковые методы неразрушающего контроля получают все большее распространение для оценки технического состояния конструкционных материалов при их изготовлении и эксплуатации [4]. Наиболее часто в практике используется эхо-импульсный метод, примененный нами для изучения действия циклического нагружения на материал образцов из стали 38ХНЗМА и сплава Д16. Для большей информативности исследования мы использовали сдвиговые

упругие волны, распространяющиеся поперек оси образца и поляризованные вдоль и поперек этого направления.

По результатам измерения времени распространения импульсов сдвиговых волн различной поляризации определяли параметр акустической анизотропии материала a , который и взяли в качестве информативного для интегральной оценки процессов, происходящих в материале при пластической деформации и циклическом нагружении:

$$a = \frac{V_1 - V_2}{V_{cp}} = \frac{t_2 - t_1}{t_{cp}},$$

где V_1 и V_2 - скорости сдвиговых волн, t_1 и t_2 - задержки в материале импульсов сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперек направления нагружения и распространяющихся по нормали к поверхности образца.

Вначале было проведено исследование влияния пластической деформации ε образца из стали 38ХНЗМА (ε от 0 до 1,2%) на величину акустической анизотропии материала. Параметр акустической анизотропии измеряли в 5 точках стального образца по 3 раза в каждой точке, наблюдали его увеличение при росте пластической деформации образца.

Затем было исследовано влияние малоциклового усталости на акустическое поведение второго стального образца, при симметричном цикле нагружения с амплитудой деформации $\varepsilon_a = 0,5\%$. Акустические измерения проведены до нагружения, затем после $N = 1000, 2000, 3000$ циклов. Найдена зависимость параметра акустической анизотропии материала от числа циклов нагружения.

Немонотонность зависимости информативного параметра от степени усталости конструкционного материала можно объяснить наличием двух конкурирующих физических механизмов, влияющих на величину акустической анизотропии, а именно: а) увеличение степени пластической деформации – рост величины анизотропии; б) зарождение микротрещин (микродефектов), расположенных перпендикулярно линии нагружения и уменьшающих скорость волн, поляризованных вдоль действия нагрузки. Экспериментальные исследования показали, что первый из указанных факторов наиболее важен на начальном этапе нагружения, а второй – на конечном его этапе.

Влияние переменного нагружения с синусоидальным циклом частотой 30 Гц и сравнительно небольшой амплитудой 3 МПа ($\varepsilon_a = 0,004\%$) на акустические характеристики конструкционного материала изучено с использованием двух образцов из сплава Д16. Исследования проведены с целью установления связи между акустическими параметрами и образованием микродефектов в материале, вплоть до его разрушения.

Дюралюминиевые образцы № 1 и № 2 были подвергнуты гармоническому нагружению ступенями по 30 000 периодов нагружения. Через каждые 30 000

циклов нагрузки образцы вынимались из испытательной машины, затем проводились акустические измерения в нескольких точках каждого образца, вплоть до его разрушения. Образец № 1 выдержал 190 000 циклов нагружения, а образец № 2 разрушился после 210 000 циклов. Переходным от малоциклового к многоциклового усталости является число циклов $N = 50000-100000$ [2], поэтому можно считать, что и в этом случае мы находимся в рамках малоциклового усталости.

Судя по результатам экспериментов, закономерности изменения параметра акустической анизотропии, выявленные при нагружении стальных образцов, сохраняются и для сплава Д16. Если для образца № 2 зависимость параметра акустической анизотропии от числа циклов нагружения идентична найденной для стальных образцов, то у образца № 1 рост указанного параметра начинается после 90 000 циклов и продолжается почти до самого разрушения.

Судя по результатам проведенных экспериментов, акустическая диагностика эхо-методом с применением сдвиговых волн мегагерцевого диапазона частот может выявить как момент начала интенсивного трещинообразования (по максимуму найденных зависимостей), так и момент начала разрушения (возникновения макротрещин) (по прекращению уменьшения измеряемого параметра).

Литература

1. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. 312 с.
2. Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. М.: ИНТЕРМЕТИНЖИНИРИНГ, 2002. 287 с.
3. Трошенко В.Т. Деформирование и разрушение металлов при многоциклового нагружении. Киев: Наукова думка, 1981. 344 с.
4. Ботаки А.А., Ульянов В.Л., Шарко А.В. Ультразвуковой контроль прочностных свойств конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 1983. 80 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ И УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ БОЛЬШИХ РУССКИХ КОЛОКОЛОВ

Огрызков С.Г (иеродиакон Роман), Березовский А.В

(Москва)

В настоящее время в связи с необходимостью восстановления и сохранения исторического и культурного наследия, в частности - исторических церквей и колоколен, при использовании музейных и древних колоколов возникают проблемы научно-технического характера, обусловленные, в первую очередь,

наличием у исторических реликвий механических повреждений и трещин различного характера, в том числе – усталостных.

Характерной особенностью церковных колоколов является конструктивное исполнение верхней части – короны - комплекса несущих элементов, за которые производится подъем и закрепление колокола на балке. Корона русского колокола состоит из центральной четырехгранной части – маточника, и прилитых к четырем его сторонам шести ушей: двух парных и двух одинарных. Маточник выполняется в виде усеченной пирамиды с параллелепипедом наверху, в котором находится монтажное отверстие. Уши, своеобразные серги для закрепления колокола, примыкают к маточнику в месте перехода пирамиды в параллелепипед.

В декабре 2013 года в Новгородском Кремле проводились ответственные работы по подъему и монтажу на металлоконструкции для временной эксплуатации в исследовательских целях музейных экспонатов – древних колоколов Софийской звонницы. Самый крупный из них, отлитый в 1677 году 5-тонный колокол «Будничный», имел механические повреждения короны: выступающая над ушами часть маточника была спилена до уровня верхней плоскости ушей. Кроме того, в месте примыкания ушей к маточнику могли образоваться трещины, которые в случае их критических размеров исключали работу по монтажу и эксплуатации колокола. Для диагностирования дефектов в виде трещин, а также оценки их влияния на прочность несущих элементов исторических колоколов был разработан и практически реализован метод вибрационного исследования, в котором наличие или отсутствие трещин диагностировалось при определении собственных низших частот колебаний ушей. Следует отметить, что из-за погодных условий, характеристик исследуемых деталей и ряда других причин, методики капиллярной дефектоскопии и УЗК были признаны нецелесообразными. Был разработан и использован метод вибрационного исследования, в котором при определении собственных низших частот колебаний ушей диагностировалось наличие или отсутствие трещин. Для оценки влияния длины трещины на параметры напряженно-деформированного состояния и динамические характеристики были разработаны три конечно-элементные модели уха короны. Результаты исследований показали существенное изменение собственных частот колебаний жестко закрепленного с двух сторон уха при наличии сквозной трещины в месте крепления уха к маточнику. На основе разработанных конечно-элементных математических моделей была определена зависимость нижней частоты колебаний от размера и вида трещины (вертикальная, горизонтальная) в месте крепления уха к маточнику, а также проведена оценка прочности уха в зависимости от возможного размера трещины.

Результаты вычислительного эксперимента использовались при проведении натурного эксперимента, в ходе которого при помощи высокоточной программы-звукоанализатора на профессиональном оборудовании производилась запись отклика каждого уха на постукивание в его боковую плоскость молотком. Фиксация производилась двумя микрофонами: контактным и измерительным кардиоидным. Анализ результатов показал, что все уши исследуемого колокола не имеют выраженных опасных дефектов и могут быть использованы для подъема и монтажа колокола с целью последующей его эксплуатации. В настоящее время колокол подвешен и успешно эксплуатируется в целях кампанологических исследований.

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОЙ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

Осинов М.Н., Чекменев А.Н., Щеглов Ю.Д.

(Самара)

При решении задач динамики и прочности различных конструкций, в том числе обеспечения безопасности летательных аппаратов при их эксплуатации, важную роль играют такие динамические характеристики как резонансные частоты и амплитуды колебаний на этих частотах. Несмотря на большие достижения в разработке математических моделей механики твердого тела и математических методов численного моделирования, а также развития вычислительной техники, все эти теоретические исследования поведения элементов конструкций при динамических нагрузках требуют подтверждения экспериментальными результатами.

В настоящее время для проведения измерений динамических характеристик применяются различные программно-аппаратные системы сбора и обработки данных от набора датчиков. При выборе типов датчиков принимают во внимание их возможное влияние на упругомассовые характеристики испытываемой конструкции, а также на частотные характеристики самих датчиков [1].

Следовательно, для определения динамических характеристик конструкций, особенно малогабаритных, целесообразнее применять бесконтактные способы измерений. Среди бесконтактных методов особо следует выделить методы когерентной оптики – голографическую и спекл-интерферометрию.

Голографический и спекл-интерферометрический анализ вибраций исследуемых конструкций позволяет определить их основные частотные характеристики [2,3]. Но обычно эти методы не позволяют проводить измерения

в реальном времени, так как при исследованиях в основном используются методы двух экспозиций и усреднения во времени. Также в силу того, что исследуемые объекты, как правило, имеют шероховатую поверхность, возникают шумы (зернистость изображения), которые накладывают ограничения на диапазон измеряемых перемещений, точность и чувствительность измерений. Кроме того, собственные шумы приводят к падению контраста интерференционных полос, что делает невозможным исследование высокочастотных колебаний и их форм, как в голографической, так и в спекл-интерферометрии. В работе [4] предложен способ повышения контрастности интерференционных полос путем использования программно-аппаратного комплекса, что приведет к увеличению точности измерений. Однако все рассмотренные методы не позволяют измерять частотные характеристики элементов конструкций в реальном времени.

Для преодоления всех ограничений, описанных выше, предлагается выполнять анализ субъективной спекл-интерферограммы исследуемого объекта по исследованию поведения интенсивности одиночного спекла в этой интерферограмме. Использование субъективных спекл-картин позволяет связать одиночный спекл в плоскости изображения с конкретной точкой исследуемой конструкции, то есть проводить динамические измерения в этой точке.

Анализ изменения интенсивности одиночного спекла зависит от изменения фазы спекла, характеризующей его динамику и связанную с перемещением исследуемой поверхности. Для решения задач динамики конструкций предлагается совместить возможность регистрации спекл-интерферограммы и анализ поведения распределения интенсивности в одиночном спекле с использованием быстродействующего точечного фотодетектора. Такое решение позволит определить форму колебаний, а также проводить измерения динамических характеристик в реальном времени. Результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований поведения интенсивности одиночного спекла показали, что при установившихся гармонических колебаниях объекта выходной сигнал точечного фотодетектора состоит из пакетов, длительность которых пропорциональна амплитуде, а частота их следования пропорциональна частоте колебаний исследуемого объекта в конкретной точке [5].

Предлагаемый способ не требует строгого выполнения всех условий, необходимых для голографической и спекл-интерферометрии, что позволяет проводить измерения в реальном времени и в условиях, приближенных к промышленным. Кроме того способ позволяет увеличить точность измерений, а также проводить исследование динамических характеристик крупногабаритных конструкций при различных частотных возбуждениях [6].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-08-00390-а.

Литература

1. *Микишев Г.Н.* Экспериментальные методы в динамике космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1978. – 183 с.
2. *Стетсон К.А.* Голографический анализ вибраций // Голографические неразрушающие исследования/ред. Эрф Р.К., пер. с англ. под ред. Карасева В.А. – М.: Машиностроение, 1979, с. 215-217.
3. Пат. 2237884 Российская Федерация, МПК⁷ G01N21/62. Способ измерения частотных характеристик механических конструкций / Смотров А.В.; заявитель и патентообладатель ФГУП «ЦАГИ». - №2003115727/28; заявл. 28.05.03; опубл. 10.10.04. – 10 с.
4. *Осипов М.Н., Щеглов Ю.Д.* Оптоэлектронный спекл-интерферометр для определения полей перемещений // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. № 4. Часть 4.: Изд-во ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2011 – с. 1672-1675.
5. *Осипов М.Н., Попов М.А., Попова Т.А.* Поведение выходного сигнала в системе измерения на основе оптоэлектронного интерферометра Майкельсона // Ползуновский вестник. – 2011. - № 3/1. – с. 38-41.
6. *Осипов М.Н., Хохлов В.А., Чекменев А.Н.* Развитие цифровой спекл-интерферометрии для исследования динамических процессов в реальном времени // Вестник СамГУ. – 2013. - № 9/2(110). – с. 110-118.

НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Помельникова А.С.

(Москва)

Разработана металловедческая концепция низкоэнергетической упрочняющей обработки сталей и сплавов: при низкоэнергетических воздействиях упрочнение определяется видом, плотностью и характером распределения дефектов кристаллического строения и достигается не в связи с присутствием самих дефектов, а за счет структурных изменений, вызванных наведенными дефектами.

В работе показано, что низкоэнергетические воздействия в виде флюенсов различной энергии могут приводить к возникновению вакансий, преобразованию кристаллических решеток через возникновение промежуточных фаз или минуя их, перераспределению легирующих элементов с образованием новых фаз. В качестве примера рассмотрены системы Fe-B и Fe-O.

Развит кристаллогеометрический подход к трактованию механизма образования и перестройки кристаллических решеток в системах Fe-B, Fe-O, основанный на локальных изменениях химического состава и характера дефектов при температурном воздействии. Изучен процесс формирования и преобразования кристаллических решеток в системах Fe-B и Fe-O. Показано, что образование и структура фаз систем Fe-B, Fe-O определяется скоростью диффузии В, О в решетку α -Fe.

Обнаружено несколько типов структурного состояния сплавов системы Fe-Si(Al) и фаз системы Fe-B, отличающихся концентрацией и характером упорядочения атомных вакансий, а также прочностными характеристиками.

Изучены закономерности трансформации кристаллической структуры, микроструктуры, а также изменений прочностных характеристик прецизионных сплавов, конструкционных и инструментальных сталей при воздействии коронного разряда, при магнитной и импульсной магнитной обработках, при температурном и электрополевым воздействиях [1,2].

Обнаружен эффект управляемого воздействия коронного разряда на твердость и склонность к хрупкому разрушению сплава системы Fe-Si(Al) (сендаст) и сталей 45 и Р6М5. Предложено объяснение влияния магнитного поля и магнитной импульсной обработки на их прочностные характеристики, основанное на изменении качества поверхности, субмикроструктуры, плотности и динамических характеристик дислокаций.

Список использованных источников литературы

1. Влияние обработки в импульсном магнитном поле и в коронном разряде на прочность сталей/Полетаев В.А. Помельникова А.С., Шипко М.Н. и др.//МиТОМ.-2000.-№4.-С.34-37.

2. Изменение кристаллической структуры и прочности сплава сендаст под влиянием коронного разряда/Помельникова А.С., Перетьяко В.Н., Шипко М.Н. и др.//МиТОМ.-1999.-№12.-С18-22.

ТРЕЩИНА В ВИДЕ ТРЕХЗВЕННОЙ ЛОМАННОЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВОЛНЫ ПРОДОЛЬНОГО СДВИГА

Попов В.Г.

(Одесса)

Рассматривается неограниченная упругая изотропная среда в условиях антиплоской деформации и содержащая сквозную трещину, занимающую в плоскости Oxy трехзвенную ломаную. С трещиной взаимодействует плоская волна продольного сдвига с фронтом, образующим угол θ_0 с осью Ox и вызывающая в среде следующие перемещения вдоль оси Oz

$$W_o^{(i)}(x, y) = A_o e^{ik_o(x \cos \theta_o + y \sin \theta_o)}, \quad \kappa_2^2 = \frac{\rho \omega^2}{G}, \quad (1)$$

где G, ρ – плотность и модуль сдвига упругой среды, ω – частота колебаний. Зависимость от времени определяется множителем $e^{-i\omega t}$, который здесь и всюду далее отброшен. Пусть $W(x, y)$ – единственная отличная от нуля при антиплоской деформации z -компонента вектора перемещений. В системе координат Oxy она удовлетворяет уравнений Гельмгольца

$$\Delta W + \kappa_2^2 W = 0 \quad (2)$$

Для формулировки граничных условий на трещине, с каждым звеном ломаной связывается системы координат $O_l x_l y_l$, центры которых совпадают с серединами звеньев. Пусть $W_l(x_l, y_l)$ перемещение дифракционного поля в системе координат, связанной с l -м звеном трещины. Тогда при отсутствии на берегах трещины напряжений на каждом из звеньев выполнены равенства

$$\tau_{zy}(x_l, 0) = -\tau_{zy}^{(i)}(x_l, 0), \quad x_l \in [-d_l, d_l]$$

$$\tau_{zy} = G \frac{\partial W_l}{\partial y_l}, \quad \tau_{zy}^{(i)} = G \frac{\partial W_l^{(i)}}{\partial y_l}, \quad l = 1, 2, 3.$$

Так же наличие трещины приводит к разрывности перемещений, для скачков которых вводятся обозначения

$$W_l(x_l, +0) - W_l(x_l, -0) = \chi_l(x_l), \quad x_l \in [-d_l, d_l] \quad (3)$$

Кроме того из условия непрерывности перемещения вдоль берега трещины следует

$$W_l(d_l, \pm 0) = W_{l+1}(-d_{l+1}, \pm 0), \quad l = 1, 2. \quad (4)$$

Относительно неизвестных скачков перемещений (3) получена система трех сингулярных интегро-дифференциальных уравнений, которая после ряда преобразований имеет вид

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 \left(\frac{E}{\tau - \zeta} + G(\tau, \zeta) + R(\tau, \zeta) \right) \Phi'(\tau) d\tau +$$

$$+ \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 \left(-\kappa_0^2 \ln|\tau - \zeta| + U(\tau, \zeta) \right) \Phi(\tau) d\tau = F(\zeta). \quad (5)$$

$$\Phi(\tau) = \begin{pmatrix} \varphi_1(\tau) \\ \varphi_2(\tau) \\ \varphi_3(\tau) \end{pmatrix}, \quad \Phi'(\tau) = \begin{pmatrix} \varphi'_1(\tau) \\ \varphi'_2(\tau) \\ \varphi'_3(\tau) \end{pmatrix}, \quad F(\tau) = \begin{pmatrix} f_1(\tau) \\ f_2(\tau) \\ f_3(\tau) \end{pmatrix}$$

$$\varphi_l(\tau) = d_l \chi(d_l \tau),$$

$$f_l(\zeta) = -i\kappa_0 C_0 \sin(\theta_0) \exp(i\kappa_0 (\varepsilon_l \cos \theta_0 + \delta_l \sin \theta_0 + \gamma_l \zeta \cos(\theta_0 - \theta_l)));$$

$$\varepsilon_l = a_l d^{-1}, \quad \delta_l = b_l d^{-1}, \quad \gamma_l = d_l d^{-1}, \quad C_0 = d^{-1} A_0, \quad \kappa_0 = \kappa_2 d,$$

$$d = \max(d_l, l=1, 2, 3)$$

$$E = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad G(\tau, \zeta) = \begin{pmatrix} 0 & g_{12}(\tau, \zeta) & 0 \\ -g_{21}(\tau, \zeta) & 0 & g_{23}(\tau, \zeta) \\ 0 & -g_{23}(\tau, \zeta) & 0 \end{pmatrix},$$

$$R(\tau, \zeta) = \{R_k(\tau, \zeta)\}, \quad U(\tau, \zeta) = \{U_{lk}(\tau, \zeta)\}, \quad l, k = 1, 2, 3.$$

Ненулевыми элементами матрицы $G(\tau, \zeta)$ являются функции

$$g_k(\tau, \zeta) = -\text{sign}(l-k) \gamma_k Q_k(\gamma_k(1-s_k \tau), \gamma_k(1+s_k \zeta))$$

$$Q_k(x, y) = \frac{x \cos \alpha_k + y}{x^2 + y^2 + 2xy \cos \alpha_k}, \quad \alpha_k = \alpha_l - \alpha_k, \quad s_k = \text{sign}(l-k).$$

Очевидно, что интегралы с этими функциями имеют неподвижные особенности в точках $\zeta = \pm 1$. Матрицы $R(\tau, \zeta)$ и $U(\tau, \zeta)$ состоят из функций, определяющих регулярные интегралы. Наличие интегралов с неподвижными особенностями значительно усложняет численное решение системы (5). Поэтому один из главных результатов данной работы есть численный метод решения этой системы.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА НА ДВУХ УПРУГИХ КОЛЕСАХ ПО ПЛОСКОЙ КРИВОЙ С УЧЕТОМ ПОДВЕСКИ

Русских С.В.

(Москва)

В различных отраслях транспортного машиностроения и строительных сооружениях возникают задачи о движении тел на упругих колесах или роликах, например, движение транспортных средств по неровной дороге, взлет самолетов с палубного трамплина, движение тележек по криволинейным поверхностям

(направляющим) в сооружениях типа «катальных гор» и др. Многие из этих задач рассматриваются в предположении, что радиусы кривизны траектории движения тела велики по сравнению с колесной базой, то есть расстояние по кривой между точками контакта колес практически равно колесной базе тела. В случае катальных гор и других подобных аттракционов обычно радиусы кривизны изменяются в широком диапазоне и подобный подход не применим для определения кинематических и силовых параметров движения. В этих случаях задача существенно усложняется и становится кинематически и динамически нелинейной.

В данной работе рассматривается нестационарное движение твердого тела с подвеской на двух упругих колесах по произвольной плоской кривой. Задача по определению кинематических и динамических характеристик движения решается при следующих предположениях: 1) корпус тележки является абсолютно твердым телом; 2) масса колес не учитывается; 3) колеса катятся без проскальзывания и сила трения не учитывается; 4) заднее колесо является ведущим, а переднее – ведомым.

Получены основные кинематические соотношения и уравнения движения тела. Определены нагрузки на кривую со стороны исследуемого объекта. Рассмотрен пример расчета. Проведен анализ полученных результатов.

Задача представляет интерес с точки зрения определения реакций тела на траекторию для расчета сооружения на прочность, а также для определения перегрузок тела для биомеханического анализа.

Литература

1. *Вериго М.Ф.* Динамика вагонов. Конспект лекций. – М.: ВЗИИТ, 1971. – 175 с.
2. *Горшков А.Г., Морозов В.И., Пономарев А.Т., Шклярчук Ф.Н.* Аэрогидроупругость конструкций. – М.: Физматлит, 2000. – 592 с.
3. *Лурье А.И.* Аналитическая механика. – М.: Физматгиз, 1961. – 824 с.
4. *Рашевский П.К.* Курс дифференциальной геометрии. – М.: Издательство ЛКИ, 2013. – 432 с.

ИЗГИБ ТРЕХСЛОЙНОГО СТУПЕНЧАТОГО СТЕРЖНЯ В ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ

Савицкий Д.М.

(Гомель)

Рассматривается несимметричный по толщине упругий трехслойный стержень с жестким наполнителем в температурном поле. Система координат x, y, z связывается со срединной плоскостью наполнителя. Для описания

кинematики пакета используется гипотеза «ломаной» нормали: в тонких несущих слоях 1, 2 справедливы гипотезы Кирхгофа, в несжимаемом по толщине жестком заполнителе 3 нормаль остается прямолинейной, не изменяет своей длины, но поворачивается на некоторый угол $\psi(x)$. Деформации малые. На внешний слой 1 стержня действует распределенная силовая нагрузка $q(x)$, $p(x)$. Температурное поле T_k ($k=1, 2, 3$ – номер слоя) в стержне считаем известным. Через $w(x)$ и $u(x)$ обозначены прогиб и продольное перемещение срединной плоскости заполнителя. На торцах предполагается наличие жестких диафрагм, препятствующих относительному сдвигу слоев. Через h_k обозначена толщина k -го слоя:

$$h_3 = 2c, \quad h_2 = h_{20} + h_{21}H_0(x-x_0), \quad (1)$$

где $H_0(x_0)$ – ступенчатая функция Хевисайда.

Введенные геометрические гипотезы позволяют выразить продольные перемещения в слоях $u^{(k)}$ через три искомые функции $u(x)$, $\psi(x)$, и $w(x)$:

$$u^{(1)} = u + c\psi - zw_{,x} \quad (c \leq z \leq c + h_1), \quad u^{(3)} = u + z\psi - zw_{,x} \quad (-c \leq z \leq c),$$

$$u^{(2)} = u - c\psi - zw_{,x} \quad (-c - h_2 \leq z \leq -c),$$

где запятая в нижнем индексе обозначает операцию дифференцирования по следующей за ней координате.

Для связи напряжений и деформаций в слоях используются термоупругие соотношения закона Гука (3) в девiatorно-шаровой форме

$$s_{xx}^{(k)} = 2G_k(T_k)\varepsilon_{xx}^{(k)}, \quad s_{xz}^{(3)} = 2G_3\varepsilon_{xz}^{(3)}, \quad \sigma^{(k)} = 3K_k(T_k)(\varepsilon^{(k)} - \alpha_k T_k).$$

В дальнейшем температурное поле считаем усредненным по толщине k -го слоя, в этом случае значения упругих параметров внутри каждого слоя постоянны по толщине.

Уравнения равновесия рассматриваемого стержня следуют из принципа возможных перемещений Лагранжа. В общем случае их можно записать в виде

$$(a_1 + a_{10}H_0(x-x_0))u_{,xx} + (a_6 + a_{60}H_0(x-x_0))\psi_{,xx} - (a_7 + a_{70}H_0(x-x_0))w_{,xxx} = -p,$$

$$(a_6 + a_{60}H_0(x-x_0))u_{,xx} + (a_2 + a_{20}H_0(x-x_0))\psi_{,xx} - (a_3 + a_{30}H_0(x-x_0))w_{,xxx} - a_5\psi = 0,$$

$$(a_7 + a_{70}H_0(x-x_0))u_{,xxx} + (a_3 + a_{30}H_0(x-x_0))\psi_{,xxx} - (a_4 + a_{40}H_0(x-x_0))w_{,xxxx} = -q$$

Это система обыкновенных дифференциальных уравнений с разрывными из-за функции Хевисайда $H_0(x)$ коэффициентами, постоянные составляющие которых a_i – выражаются через упругие и геометрические параметры слоев.

В связи с разрывностью функции (1), описывающей толщину 2-го слоя, решение задачи будет проводиться раздельно в обеих областях непрерывности толщины:

I – до точки присоединения накладки ($x < x_0$);

II – после нее ($x \geq x_0$).

В первой области функция Хевисайда обращается в ноль и $h_2 = h_{20}$. Искомые перемещения в этой области пометим индексом «1» внизу. Аналитическое решение известно:

$$\begin{aligned} \psi_1(x) &= C_{21} \operatorname{sh}(\beta_1 x) + C_{31} \operatorname{ch}(\beta_1 x) + \\ &+ \frac{1}{\beta_1} \left[\operatorname{sh}(\beta_1 x) \int g_1(x) \operatorname{ch}(\beta_1 x) dx - \operatorname{ch}(\beta_1 x) \int g_1(x) \operatorname{sh}(\beta_1 x) dx \right], \\ w_1(x) &= \frac{1}{\alpha_{21}} \left[\alpha_{11} \int \psi_1 dx - a_7 L_3^{-1}(p) + a_4 L_4^{-1}(q) + \frac{a_1 C_{11}}{6} x^3 \right] + \frac{C_{41}}{2} x^2 + C_{51} x + C_{61}, \\ u_1(x) &= \gamma_{31} \psi_1 + \frac{1}{\alpha_{21}} \left[-a_4 L_2^{-1}(p) + a_7 L_3^{-1}(q) + \frac{a_7}{2} C_{11} x^2 \right] + C_{71} x + C_{81}. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь C_{11}, \dots, C_{81} – константы интегрирования, определяемые из граничных условий; $L_2^{-1}, L_3^{-1}, L_4^{-1}$ – линейные интегральные операторы.

Во второй области решение $u_2(x), \psi_2(x), w_2(x)$ можно выписать в форме (2), где будут другие константы интегрирования C_{12}, \dots, C_{82} и параметры $g_2(x), \beta_2, \gamma_{12}, \gamma_{22}, \gamma_{32}$. В результате решение исходной системы будет

$$\begin{aligned} \psi(x) &= \psi_1(x) + (\psi_2(x) - \psi_1(x))H_0(x - x_0), \\ u(x) &= u_1(x) + (u_2(x) - u_1(x))H_0(x - x_0), \\ w(x) &= w_1(x) + (w_2(x) - w_1(x))H_0(x - x_0). \end{aligned} \quad (3)$$

Отметим, что температура в уравнения равновесия в явном виде не входит. Решение (3) зависит от температуры через параметры упругости и константы интегрирования.

Численные результаты получены при шарнирном опирании торцов стержня. При этом полагалось: несущие слои (1, 2) выполнены из дюралюминия; наполнитель (3) – фторопласт-4; $c = 0,09, h_1 = 0,03, h_{20} = 0,02, h_{21} = 0,01, x_0 = 0,5$. Интенсивности нагрузок $p = 0, q = -1 \text{ МПа}$.

В результате показано, что нагревание стержня на 50 К приводит к увеличению прогиба и сдвига до 70 %. При нагревании на 100 К подобное увеличение достигает 135 %. Наличие ступеньки уменьшает жесткость стержня, что ведет к росту прогиба. Относительный сдвиг изменяется слабо.

Воздействие температуры приводит к увеличению экстремумов напряжений во внешних слоях на 15–45 %, в наполнителе – на 20–60 %.

РАСЧЕТЫ ЭФФЕКТИВНОСТИ УСИЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ

Серазутдинов М.Н., Убайдуллоев М.Н.

(Казань)

Излагается методика вариационного расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов стержневых систем, усиливаемых в напряженном состоянии. Представлены различные варианты используемых теорий, для определения НДС конструкции с учетом особенностей геометрии поперечного сечения стержней.

На основе расчетов определяется эффективность усиления элементов стержневых конструкций. Результаты получены в предположении, что в исходном напряженно-деформированном состоянии деформации являются упругими, а после усиления и дополнительного нагружения могут возникать пластические деформации.

Приводятся данные для определения эффективности усиления поврежденных и неповрежденных элементов рамных систем. Представлен анализ перераспределения напряжений в стержневой системе после повреждения отдельных ее частей, а также вследствие изменения соотношения жесткостей элементов конструкции после выполненного усиления. Показано, что при допущении возникновения пластических деформаций можно восстановить первоначальную несущую способность конструкции в полной мере.

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИИ КОНСТРУКЦИИ АВИАЦИОННОГО ИЗДЕЛИЯ

Сидоренко А.С., Чухлебов Р.В.

(Москва)

В работе представлены методика и результаты экспериментального исследования и численного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкции авиационного изделия, при стационарном гармоническом нагружении.

Объектом исследования является тонкостенная конструкция отсека корпуса авиационного изделия, состоящая из конической подкрепленной оболочки с присоединенным оперением. Конструкция выполнена из алюминиевого сплава и содержит сварные соединения.

Численное моделирование проведено в программной системе конечно-элементного анализа ANSYS. Для создания конечно-элементной модели (КЭМ)

использованы оболочечные элементы и элементы «сосредоточенная масса» [1, 2]. Выбор данных типов элементов обусловлен конструктивными особенностями изделия и условиями эксплуатационного нагружения. Определены собственные частоты отсека и построены соответствующие им формы колебаний.

В качестве характеристик внешних нагрузок при моделировании напряженно-деформированного состояния использованы значения виброускорений, приложенные в месте крепления отсека к корпусу изделия, изменяющиеся по гармоническому закону на фиксированных частотах из диапазона от 0 до 300 Гц. Параметры КЭМ устанавливались по сходимости результатов вычислений при варьировании этих параметров.

В результате вычислений были определены наиболее нагруженные зоны конструкции и максимальные значения эквивалентных напряжений.

Экспериментальное исследование вибрации хвостового отсека, подверженного действию стационарного гармонического нагружения, проводилось в лабораторных условиях с использованием измерительно-вычислительного комплекса с системой управления виброиспытаниями. При установке отсека на стол вибровозбудителя использовалось специальное крепежное приспособление, обеспечивающее условия закрепления близкие к реальным и отсутствие искажения вибрационного сигнала [3, 4]. Режим вибрационного нагружения задавался и поддерживался по показаниям датчика ускорения установленного на приспособлении.

Определение амплитудно-частотных характеристик производилось с использованием метода плавного изменения частоты синусоидальных колебаний в диапазоне частот от 0 до 300 Гц [3]. В качестве отклика на возбуждение, рассматривалось значение виброускорения, действующие на оперение, в направлении входного вибрационного воздействия. Получено удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных значений собственных частот, что подтверждает адекватность разработанной КЭМ.

Вибрационные испытания проводились при воздействии синусоидальной вибрации методом фиксированных частот на диапазоне от 10 до 250 Гц [4]. Результаты расчетной оценки напряжений сопоставлены с данными тензоизмерений при лабораторных испытаниях. Тензоизмерения проводились с использованием тензодатчиков типа КФ5П1-10-200. Полученные расчетные значения напряжений в местах расположения тензодатчиков удовлетворительно соответствуют экспериментальным данным.

Разработанная методика экспериментального и численного исследования конструкции хвостового отсека, при воздействии стационарного гармонического вибрационного нагружения, может быть использована для оценки

характеристик вибропрочности элементов тонкостенных конструкций авиационных изделий.

Литература

1. Самогин Ю.Н., Хроматов В.Е., Чирков В.П. Метод конечных элементов в задачах сопротивления материалов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 200 с.
2. Гришанина Т.В., Тютюнников Н.П., Шклярчук Ф.Н. Метод отсеков в расчетах колебаний конструкций летательных аппаратов. – М: Изд-во МАИ, 2010. – 180 с.
3. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Определение динамических характеристик конструкции. ГОСТ 30630.1.1-99. М.: Изд-во стандартов, 2000. – 19 с.
4. Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие вибрации. ГОСТ 30630.1.2-99. М.: Изд-во стандартов, 2000. – 23 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗОН ПОВЫШЕННЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ИЗДЕЛИЙ ИЗ РЕЗИНОКОРДНЫХ КОМПОЗИТОВ

Соколов С.Л.

(Москва)

Изделия из резинокордных композитов - автомобильные, тракторные и авиационные шины, муфты, пневмооболочки, шланги высокого давления и другие – имеют широкое применение в различных областях. При эксплуатационных нагрузках (внутреннее давление, локальные воздействия) в таких изделиях возникают значительные напряжения и деформации, которые могут привести к преждевременным разрушениям.

Характерной особенностью данных изделий является значительный уровень деформаций при эксплуатационных нагрузках, большие перемещения и изменения их формы, а также сложная, неоднородная внутренняя структура.

Для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) подобных объектов применяются расчетные и экспериментальные методы. Из экспериментальных методов для резинокордных композитов наиболее часто используется тензометрия [1] (для наружных и внутренних поверхностей изделий) и поляризационно-оптические методы [2] (для анализа напряжений в массиве резины). Для расчета резинокордных изделий применяются модели оболочек [3], а также различные подходы с применением метода конечных элементов (МКЭ) [4].

При определении габаритов изделий при действии внутреннего давления и их жесткости в различных направлениях достаточно применения теорий, упрощенно описывающих внутреннюю структуру таких объектов. Известна и широко применяется модель пневматической шины как кольца на упругом основании [5], которая позволяет определять прогиб шины при действии локальной нагрузки, характеристики бокового увода и т.д.

Для определения НДС внутренних областей шины целесообразно использовать МКЭ, поскольку этот метод позволяет описать сложную структуру без существенных огрублений, а также получать решения в нелинейной постановке.

В работе описаны различные способы моделирования структуры резинокордных изделий с помощью МКЭ. Используется подход с моделированием каждого резинокордного слоя и резиновой матрицы между слоями определенными группами конечных элементов (КЭ) [6]. Показано, что различная степень детализации резинокордной структуры по толщине, в самих резинокордных слоях и вдоль образующей изделия (по меридиану оболочки вращения) существенно влияют на величины максимальных деформаций в зонах вероятного разрушения и на их положение.

Описан подход к моделированию резинокордной структуры, отдельно рассматривающий нити корда и резиновую матрицу между ними в элементарном резинокордном слое с помощью определенных групп КЭ. Построены зависимости максимальных значений деформаций в изделиях от линейных размеров КЭ. Получены значения максимальных деформаций в резиновой матрице пневматических шин для реального распределения нитей корда по сечению шины.

Результаты могут быть использованы для прогнозирования циклической долговечности резинокордных изделий.

Литература

1 Черняга И. М. Экспериментальное исследование деформированного состояния радиальных шин различного назначения // Материалы Междунар. конф. по каучуку и резине «Rubber-94». - М. - 1994. - С. 214 – 221.

2 Ушаков Б. Н., Тартаковер Е. И. Анализ напряженно-деформированного состояния натуральных пневматических шин с применением фотоупругости // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2005. - № 4. - С. 33–38.

3 Григолюк Э.И., Куликов Г.М. Многослойные армированные оболочки. Расчет пневматических шин. - М.: Машиностроение. - 1988. – 288 с.

4 Rothert H., Gebbeken N., Jagusch J., Kaliske M. Recent Developments in the Numerical Tire Analysis // International Rubber Conference. – Moscow. – 1994. - pp. 246 - 252.

5 Мухин О. Н. В сб. «Расчеты на прочность». - М.: Машиностроение. - 1971. - №15. - С. 58 - 87.

6 Соколов С. Л. Расчетно-экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния и циклической долговечности пневматических шин // Дис. д-ра техн. наук. - М.: Учреждение Российской академии наук Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН. - 2011. - 264 с.

ОПЫТНЫЕ ДАННЫЕ О ЗАМЕДЛЕНИИ ИСПЫТЫВАЮЩИХ РАЗЛИЧНУЮ СТЕПЕНЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТЕЛ ПРИ ИХ ДВИЖЕНИЯХ В ИССЛЕДУЕМОЙ СРЕДЕ

Сотский М.Ю.

(Москва)

Приведены результаты анализа опытных данных экспериментального исследования кинематических характеристик движения в прочной среде цилиндрических и цилиндроконических тел: измерительных стержней с закрепленными на них пьезоэлектрическими акселерометрами.

Рассмотрены данные опытов, полученных в широком диапазоне изменения начальных условий удара металлических стержней и материалов исследуемых сред (металлов, бетонов). В качестве исходных данных рассмотрена история замедления стержня относительно среды, регистрируемая в опыте непрерывно от начала и до окончания движения стержня в среде. Измерительная технология базируется на устройстве и методике проведения испытаний по патенту 1741082 RU. Технология является частным вариантом применения акселерометрии в исследовании процессов терминальной баллистики [1].

Выделены условно для анализа некоторые характерные реализации (типы) исследуемых процессов. Процессы классифицированы по степени деформирования стержня, устанавливаемой по конечному результату из анализа каверны, и на основании преобладающего в процессе вида деформирования пары стержень-среда.

Предложена схема анализа регистрируемой истории замедления стержня в среде и способ приведения регистрируемых данных к безразмерному виду. Установлено соответствие между типом процесса по принятой классификации и обобщенной историей замедления для процессов, соответствующих этому типу.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 13-08-00274-а и 13-08-00383-а).

Литература

1. Бахтадзе Г.Э., Гальцев Ю.В. Физические модели терминальной (конечной) баллистики // Вестник Самарской гуманитарной академии. Серия: Право. - Самара: Изд-во Самар. гуманит. акад. 2005. № 2. С. 159-163.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ УПРУГИХ ТРЕХСЛОЙНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК В ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ

Старовойтов Э.И.

(Гомель)

Рассматривается деформирование несимметричной по толщине упругой трехслойной цилиндрической оболочки со сжимаемым наполнителем. Для изотропных несущих слоев приняты гипотезы Кирхгофа-Лява, в жестком сжимаемом наполнителе справедливы точные соотношения теории упругости с линейной аппроксимацией перемещений его точек от поперечной координаты. На границах контакта используются условия непрерывности перемещений. Деформации малы.

Обозначим: h_k – толщина k -го слоя ($k = 1, 2, 3$); H_α, k_α ($\alpha = 1, 2$) – коэффициенты Ламе и главные кривизны срединной поверхности наполнителя. Проводя постановку краевой задачи в перемещениях, за независимые переменные принимаем u_α^k, w^k – тангенциальные перемещения и прогибы точек срединной поверхности несущих слоев в направлении осей x_α, z правой системы координат, отнесенной к линиям главных кривизн срединной поверхности наполнителя и к внешней нормали, соответственно. В результате получим следующие перемещения в слоях оболочки ($c \leq z \leq c + h_1, -c - h_2 \leq z \leq -c$):

$$u_\alpha^{kz} = u_\alpha^k + (z \mp a_k) \psi_\alpha^k; \quad a_k = c + 0,5h_k.$$

Здесь и далее: греческие индексы принимают значения 1, 2; латинские – 1, 2, 3; нижний знак здесь и далее соответствует индексу $k = 2$; ψ_α^k – дополнительный угол поворота нормали в k -ом несущем слое; частное дифференцирование по координате обозначается координатным индексом, следующим после запятой.

Уравнения равновесия получены вариационными методами:

$$I_i^k = 0,$$

где

$$I_\alpha^k = -\left(H_\gamma T_{\alpha\alpha}^k\right)_{,\alpha} + H_\gamma k_\alpha c_{\alpha,\gamma}^k M_{\alpha\alpha}^k - \left(H_\gamma k_\alpha c_{\alpha}^k M_{\alpha\alpha}^k\right)_{,\alpha} + H_\gamma k_{\alpha,\gamma} c_{\alpha}^k M_{\alpha\alpha}^k - \\ - H_{\alpha,\gamma} T_{\alpha\gamma}^k - H_{\alpha,\gamma} k_\alpha c_{\alpha}^k M_{\alpha\gamma}^k - \left(H_\alpha T_{\gamma\alpha}^k\right)_{,\gamma} + H_\alpha k_{\alpha,\gamma} c_{\alpha,\gamma}^k M_{\gamma\alpha}^k - \left(H_\alpha k_\alpha c_{\alpha}^k M_{\gamma\alpha}^k\right)_{,\gamma} +$$

$$\begin{aligned}
& +H_{\alpha}k_{\alpha,\gamma}c_{\alpha}^kM_{\gamma\alpha}^k + H_{\gamma}T_{\gamma\alpha}^k + H_{\gamma}c_{\alpha}^kM_{\gamma\gamma}^k + H_{\gamma}B_{k\alpha,\gamma}M_{\alpha\alpha}^{3\pm} - (H_{\gamma}B_{k\alpha}M_{\alpha\alpha}^{3\pm})_{\gamma\alpha} - \\
& -H_{\alpha}B_{k\alpha}M_{\alpha\gamma}^{3\pm} + H_{\alpha}B_{k\alpha,\gamma}M_{\gamma\alpha}^{3\pm} - (H_{\alpha}B_{k\alpha}M_{\gamma\alpha}^{3\pm})_{\gamma\gamma} + H_{\gamma}B_{k\alpha}M_{\gamma\gamma}^{3\pm} \pm \\
& \pm c^{-1}H_{\alpha}H_{\gamma}B_{k\alpha}T_{\alpha\beta}^3 - H_{\alpha}H_{\gamma}k_{\alpha}B_{k\alpha}M_{\alpha\beta}^{3\pm} - (1 \pm 0,5h_k c_{\alpha}^k k_{\alpha})H_{\alpha}H_{\gamma}m_{\alpha}^k m_{\gamma}^k q_{\alpha}^k, \\
I_3^k = & (H_1^{-1}H_2c_1^k M_{11}^k)_{,1} - (H_1^{-1}H_2c_1^k M_{11}^k)_{,11} - (H_1^{-2}H_{1,1}H_2c_1^k M_{11}^k)_{,1} + \\
& + (H_{1,2}H_2^{-1}c_2^k M_{11}^k)_{,2} + H_1H_2k_1T_{11}^k + (c_2^k M_{12}^k)_{,2} - (H_2^{-1}H_{2,1}c_2^k M_{12}^k)_{,2} - \\
& - (c_2^k M_{12}^k)_{,12} - (H_1^{-1}H_{1,2}c_1^k M_{12}^k)_{,1} + (c_1^k M_{21}^k)_{,1} - (H_1^{-1}H_{1,2}c_1^k M_{21}^k)_{,1} - \\
& - (c_1^k M_{21}^k)_{,12} - (H_2^{-1}H_{2,1}c_2^k M_{21}^k)_{,2} + (H_1H_2^{-1}c_2^k M_{22}^k)_{,2} - (c_2^k H_1H_2^{-1}M_{22}^k)_{,22} - \\
& - (H_1H_2^{-2}H_{2,2}c_2^k M_{22}^k)_{,2} + (H_1^{-1}H_{2,1}c_1^k M_{22}^k)_{,1} + H_1H_2k_2T_{22}^k \mp (H_2D_{k1}M_{11}^{3\pm})_{,1} \pm \\
& \pm (H_2D_{k1}M_{11}^{3\pm})_{,11} \mp (H_{1,2}D_{k2}M_{11}^{3\pm})_{,2} + \frac{1}{2}H_1H_2k_1M_{11}^{3\pm} \mp (H_2D_{k2}M_{12}^{3\pm})_{,2} \pm \\
& \pm (H_2D_{k2}M_{12}^{3\pm})_{,12} \pm (H_{1,2}D_{k1}M_{12}^{3\pm})_{,1} \mp (H_1D_{k1}M_{21}^{3\pm})_{,1} \pm (H_1D_{k1}M_{21}^{3\pm}) \pm \\
& \pm (H_{2,1}D_{k2}M_{21}^{3\pm})_{,2} \mp (H_1D_{k2}M_{22}^{3\pm})_{,2} \pm (H_1D_{k2}M_{22}^{3\pm})_{,22} \mp (H_{2,1}D_{k1}M_{22}^{3\pm})_{,1} + \\
& + \frac{1}{2}H_1H_2k_2M_{22}^{3\pm} - c^{-1}(H_1H_2D_{k1}T_{13}^3)_{,1} \pm (H_1H_2k_1D_{k1}M_{13}^{3\pm})_{,1} - 0,5(H_2M_{13}^{3\pm})_{,1} - \\
& - c^{-1}(H_1H_2D_{k2}T_{23}^3)_{,2} \pm (H_1H_2k_2D_{k2}M_{23}^{3\pm})_{,2} - 0,5(H_1M_{23}^{3\pm})_{,2} \pm 0,5c^{-1}H_1H_2T_{33}^3 - \\
& - H_1H_2m_1^k m_2^k q_3^k \mp 0,5h_k (q_1^k c_1^k m_1^k m_2^k H_2)_{,1} \mp 0,5h_k (q_2^k c_2^k m_1^k m_2^k H_1)_{,2}, \\
I_1^k = & \int_{h_k} (1+k_1z)(1+k_2z) dz; \quad I_2 = \int_{h_k} (1 \pm z/c)^2 (1+k_1z)(1+k_2z) dz, \\
T_{\alpha\beta}^k = & \int_{h_k} \sigma_{\alpha\beta}^k (1+k_{\gamma}z) dz; \quad M_{\alpha\beta}^k = \int_{h_k} \sigma_{\alpha\beta}^k (z \mp a_k) (1+k_{\gamma}z) dz, \\
T_{i3}^{(3)} = & \int_{h_3} \sigma_{i3}^{(3)} (1+k_1z)(1+k_2z) dz; \quad M_{\alpha i}^{(3)\pm} = \int_{h_3} \sigma_{\alpha i}^{(3)} (1 \pm z/c) (1+k_{\gamma}z) dz;
\end{aligned}$$

$k \neq 3; i = 1, 2, 3; \gamma \neq \alpha, q_{\alpha}^k, q_3^k$ – компоненты нагрузки.

Основные соотношения для круговой трехслойной цилиндрической оболочки следуют из (1) после подстановки коэффициентов:

$$H_1 = 1, H_2 = R, k_1 = 0, k_2 = k = 1 \square R, c_1^k = 1, c_2^k = (1 \square a_1 \square R)^{-1},$$

$$B_{\square 1} = 0,5, B_{k2} = 0,5 \mp D_{k2}, D_{k1} = h_k \square 4, a_k = c + 0,5h_k,$$

$$D_{k2} = 0,25h_k (1 \pm a_k / R)^{-1} R^{-1}, (k = 1, 2; \square = 1, 2).$$

Примем условия свободного опирания оболочки по торцам на неподвижные в пространстве жесткие опоры. Граничные условия в сечениях $x = 0; l$ (l – длина оболочки) будут

$$u_2^k = w^k = u_{1,1}^k = w^k_{,11} = 0 \quad (k=1, 2).$$

Если оболочка находится в температурном поле, то указанные краевые условия перестают быть однородными. В этом случае нужно внести неоднородность, обусловленную тепловым воздействием, в состав внешних сил. Вид решения будет следующий:

$$u_1^k = \sum_{p,m} U_{1,pm}^k \cos \frac{\pi mx}{l} \cos p\phi; \quad u_2^k = \sum_{p,m} U_{2,pm}^k \sin \frac{\pi mx}{l} \sin p\phi;$$

$$w^k = \sum_{p,m} W_{pm}^k \sin \frac{\pi mx}{l} \cos p\phi \quad (k=1, 2).$$

Внешние и дополнительные нагрузки необходимо разложить в подобные двойные тригонометрические ряды.

После подстановки (3) в уравнения равновесия (1) получим систему шести линейных алгебраических уравнений для определения коэффициентов U_{pm}^k , W_{pm}^k , решение которой необходимо проводить численно.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ КОНЕЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ГИПЕРУПРУГИХ ТЕЛ

Султанов Л.У., Фахрутдинов Л.Р.

(Казань)

В настоящей работе рассматривается методика исследования гиперупругих тел, использующихся для определения больших деформаций нелинейных упругих материалов (полимеров, пены, биологических материалов). Напряженное состояние описывается с помощью тензора истинных напряжений. Численная реализация основана на методе конечных элементов в рамках инкрементального метода. Рассмотрен пример нахождения определяющих соотношений для тел, описываемых потенциалом упругих деформаций Муни-Ривлина.

Базовым тензором, играющим ключевую роль в кинематике конечных деформаций, является тензор градиента деформаций \mathbf{F} .

В качестве тензоров, описывающих деформацию и скорость деформации используются :

левый тензор Коши – Грина (мера деформации Фингера): $\mathbf{B} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T$;

тензор пространственного градиента скорости: $\mathbf{h} = \dot{\mathbf{F}} \cdot \mathbf{F}^{-1}$;

тензор деформации скорости: $\mathbf{d} = \frac{1}{2} [\mathbf{h} + \mathbf{h}^T]$.

Напряженное состояние описывается с помощью тензора истинных напряжений $\Sigma = \sigma_{ij}(\vec{e}_i, \vec{e}_j)$, определенного в актуальном состоянии.

В качестве аргументов функции потенциальной энергии деформации примем компоненты тензора меры деформации Фингера, т.е. : $W = W(\mathbf{B}_j)$

вводятся в рассмотрение меры деформации, которые не сопровождаются изменением объема: $\hat{\mathbf{B}} = J^{-2/3} \mathbf{B}$, здесь $J = dV/dV_0$.

Таким образом: $W = W_0(J) + W'(I_{1\hat{\mathbf{B}}}, I_{2\hat{\mathbf{B}}})$.

Тогда тензор напряжений Коши-Эйлера будет выражаться в следующем виде:

$$\Sigma = \frac{2}{J} \mathbf{F} \cdot \mathbf{F}^T \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial \mathbf{B}} \right) = \frac{2}{J} \mathbf{B} \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial \mathbf{B}} \right).$$

Скорости изменения напряжений Коши – Эйлера:

$\dot{\Sigma} = \Lambda_\Sigma \cdot \mathbf{d} + \mathbf{h} \cdot \Sigma + \Sigma \cdot \mathbf{h}^T - \Sigma \cdot I_{1d}$, где введено обозначение:

$$\Lambda_\Sigma = \frac{4}{J} \mathbf{B} \cdot \left(\frac{\partial^2 W}{\partial \mathbf{B} \partial \mathbf{B}} \right) \cdot \mathbf{B}.$$

Для решения задачи используется метод последовательных нагружений. Считается, что известно k -ое состояние, по которому нужно найти $(k+1)$ -ое состояние.

В качестве базового уравнения используется уравнение виртуальных мощностей, записанного для $(k+1)$ шага:

$$\iiint_{V_{k+1}} {}^{k+1}\Sigma \cdot \delta {}^{k+1}\mathbf{d} dV = \iiint_{V_{k+1}} {}^{k+1}\vec{\mathbf{f}} \cdot \delta \vec{\mathbf{v}} dV + \iint_{S_{k+1}^\sigma} {}^{k+1}\vec{\mathbf{t}}_n \cdot \delta \vec{\mathbf{v}} dS,$$

где V_{k+1} – текущий объем; S_{k+1}^σ – часть его поверхности, на которой заданы усилия;

$\vec{\mathbf{f}}$, $\vec{\mathbf{t}}_n$ – векторы массовых и поверхностных сил.

Переходя к приращениям: ${}^{k+1}\Sigma = {}^k\Sigma + \Delta^k\Sigma$,

получим разрешающее уравнение, решение которого дает вектор перемещений для текущего шага $\Delta^k \vec{\mathbf{u}} = \Delta^k x_i \vec{e}_i$, с помощью которого

определяется конфигурация следующего шага: ${}^{k+1}\vec{\mathbf{R}} = {}^k\vec{\mathbf{R}} + \Delta \vec{\mathbf{u}}$.

Тогда напряженное состояние находится по соотношению: ${}^{k+1}\Sigma = \frac{2}{J} {}^{k+1}\mathbf{B} \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial {}^{k+1}\mathbf{B}} \right)$.

Рассмотрен пример построения физических соотношений для потенциала упругих деформаций Муни – Ривлина: $W = U_1(I_{1\hat{B}} - 3) + U_2(I_{2\hat{B}} - 3) + \frac{K}{2}(J - 1)^2$,

Здесь U_1, U_2 – постоянные материала.

Тогда тензор напряжений Коши-Эйлера примет вид:

$$\Sigma = 2U_1 J^{-\frac{5}{3}} \left[\mathbf{B} - \frac{1}{3} I_{1B} \cdot \mathbf{I} \right] + 2U_2 J^{-\frac{7}{3}} \left[I_{1B} \mathbf{B} - \frac{1}{3} I_{1B}^2 \cdot \mathbf{I} - \frac{2}{3} \mathbf{B}^2 \right] + K(J - 1) \cdot \mathbf{I}$$

Линеаризуя полученное соотношение получим выражение для скорости изменения напряжений Коши – Эйлера:

$$\Delta \Sigma = \Lambda_{\Sigma} \cdot \mathbf{d} + \mathbf{h} \cdot \Sigma + \Sigma \cdot \mathbf{h}^T - \Sigma I_{1d}$$

Таким образом получена система уравнений, для определения НДС, которая может быть дискретизирована МКЭ для получения численных решений.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты 12-01-31212, 13-01-97059, 13-01-97058, 12-01-00955, 12-01-97026, 12-01-00955, 14-0-31291).

ВЫЯВЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ И ОЦЕНКА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЧАСОВ ВЫРАБОТКИ РЕСУРСА

Тарадай Д.В., Зиле А.З., Шуранова Ю.А.

(Москва)

Одной из характерных отличительных особенностей крутильных колебаний валопроводов энергетических турбоагрегатов является весьма низкий уровень их демпфирования, который во много раз меньше уровня демпфирования при изгибных колебаниях. Поэтому резонансные крутильные колебания весьма опасны и отстройка от возможных резонансных режимов имеет первостепенное значение [1-4].

Важность достоверного знания собственных частот и степени их отстройки от резонанса явилась основанием для их экспериментального определения, которые были проведены на турбоагрегате мощностью 300 МВт Каширской ГРЭС в режиме нормированного первичного регулирования частоты (НПРЧ). Результаты экспериментов показали, что валопровод турбоагрегата отстроен от возможных резонансных состояний на частотах 50 Гц и 100 Гц. Наибольшая

амплитуда колебаний была выявлена при колебаниях с частотой 58,6 Гц, которая идентифицирована как третья собственная частота крутильных колебаний.

Для прогнозирования возникновения крутильных колебаний важно установить источники их возбуждения. В качестве таких источников будем рассматривать три возможных: парораспределение паровой турбины, генератор вместе с электрической сетью и последние ступени роторов низкого давления (РНД). Возмущения в последних ступенях цилиндра низкого давления (ЦНД) исключим сразу, поскольку измерения крутильных колебаний проводились в регулировочном диапазоне изменения активной нагрузки 150-300 МВт, а возбуждающие крутильные колебания аэродинамические силы возникают в последних ступенях лишь при малых активных нагрузках на вентиляционных малорасходных режимах. Проведенный расчетный анализ показал, что для возбуждения крутильных колебаний по 3-й собственной форме с амплитудой порядка 50 мкм на переднем конце валопровода, к ротору генератора должен быть «мгновенно» приложен очень большой возмущающий крутящий момент. Однако, существование столь больших возмущений в штатных режимах эксплуатации практически невозможно.

Версия же о влиянии парораспределения имеет непосредственное отношение к режимам НППЧ, поскольку исходит из характера работы регулирующих клапанов. Действительно, в процессе регулирования частоты и мощности происходят перемещения регулирующих клапанов, вызывающие быстрые изменения расхода острого пара на турбину и, соответственно, быстрые изменения крутящего момента на регулирующей и других ступенях цилиндра высокого давления (ЦВД). Возмущения крутящего момента, в свою очередь, приводят к возникновению свободных затухающих крутильных колебаний.

Для объяснения причин возникновения крутильных колебаний с частотой 58,6 Гц было выполнено расчетное моделирование возникновения и протекания крутильных колебаний при быстром приложении возмущающего крутящего момента к регулирующей ступени и к генератору. Расчетный анализ показал, что при однократном возмущении от регулирующих клапанов возникают крутильные колебания преимущественно по первым трем собственным формам с частотами 21,7 Гц, 38 Гц и 58,6 Гц. Частотный состав колебаний соответствует данным измерений, а значения амплитуд существенно меньше измеренных.

Однако рассмотренный случай приложения к регулирующей ступени одиночного возбуждающего момента не отражает реальных условий воздействия на ротор парораспределения в процессе регулирования частоты и мощности. В действительности, имеют место непрерывно следующие друг за

другом последовательные возмущения РВД, которые в зависимости от временного интервала между возмущениями могут приводить к возрастанию одних частотных составляющих и уменьшению других и т.п.

Тем не менее, для экспериментального подтверждения предложенной версии о влиянии парораспределения на КК целесообразно проведение одновременных синхронных измерений мгновенных значений перемещений регулирующих клапанов и крутильных колебаний.

Кроме того, была рассмотрена процедура расчета эквивалентного времени наработки валопровода турбоагрегата с учетом всех влияющих факторов, включая крутильные колебания. Выполнена оценка возможного влияния крутильных колебаний на возможную выработку ресурса. Расчетная оценка эквивалентных часов выработки ресурса была проведена на примере роторной стали Р2МА по данным измерений крутильных колебаний.

Работа выполнялась при поддержке Гранта Президента Российской Федерации МК-6431.2013.8.

Литература

1. Зиле А. З., Тарадай Д. В., Томашевский С. Б., Шуранова Ю. А. Исследования крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов // Электрические станции, №10, 2013, с. 40-48.

2. Боршанский К.Н., Григорьев Б.Е., Григорьев С.Ю., Наумов А.В. Особенности вибрационного состояния лопаток и валопровода мощных паровых турбин при переходных режимах работы турбоагрегата // Электрические станции, №2, 2011, с. 32-37.

3. Киселев М. И., Пронякин В. И. Быстропротекающие переходные режимы функционирования валопровода мощного турбоагрегата. – Наука и образование, №5, май 2011, с.1-6.

4. Бялт М. А., Бочкарев Е. В., Кистойчев А. В., Урьев Е. В., Черненко П. Е. Актуальность и проблемы реализации мониторинга крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов на электростанциях // Электрические станции, №8, 2013, с. 50-57.

ВЫБОР ИНТЕРВАЛОВ ЛЕГИРОВАНИЯ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

Тарасенко Л.В., Титов В.И., Уткина А.Н., Шалькевич А.Б.

(Москва)

В настоящее время для увеличения ресурса работы зубчатых колёс при повышенных рабочих нагрузках возникла необходимость разработки новой стали, основное требование к которой состояло в том, что при твёрдости 60

HRC, после отпуска при 180...250 °С сталь должна иметь примерно вдвое высокую износостойкость, чем существующие цементуемые стали, в частности ЭИ415 (20Х3МВФ). При этом уровень механических свойств должен быть не ниже, чем в данной стали.

Такое существенное повышение износостойкости не могло быть достигнуто при использовании способа цементации на любых составах сталей, так как их износостойкость обеспечивается, в основном, свойствами цементита. Следовательно, необходимо было переходить к другим типам карбидов с более высокой твёрдостью и модулем упругости, т.е. создавать высокоуглеродистую легированную сталь.

При выборе композиции новой стали ориентировались на стали с объёмной термообработкой типа инструментальных Х6Ф, Х12Ф1, Х12М. В этих сталях карбидами, обеспечивающими износостойкость, являются карбид M_7C_3 на основе хрома и МС на основе ванадия.

Поскольку сталь должна быть конструкционной, то предварительно оценивали уровень необходимых механических свойств. Так, ударная вязкость может иметь требуемый уровень (более 0,2 МДж/м²) при мелкозернистой структуре, при балле зерна 8...11.

Предел выносливости, необходимый для деталей типа зубчатых колёс, зависит в значительной степени от количества, размеров и распределения карбидов. При прочих равных условиях стали с равномерно распределёнными частицами карбидов имеют предел выносливости, составляющий 30...40 % от предела прочности при статическом изгибе, а с неравномерно распределёнными крупными частицами карбидов – только 20 %.

Особенность выбора композиции новой стали состояла в том, что после закалки в стали сохраняется до 10...20 % карбидов, в которые связана значительная часть углерода и легирующих элементов. И твёрдый раствор, обеднённый всеми элементами, после закалки может иметь различный состав матрицы: мартенсит, мартенсит с остаточным аустенитом или даже феррит.

Задача первого этапа разработки стали с повышенной износостойкостью состояла в выборе типа карбида, а также в выборе интервалов легирования с учётом состава матричной фазы.

При разработке новой стали было решено получить более высокую износостойкость не столько за счёт увеличения карбидной массы, сколько за счёт изменения типа карбида, а именно – за счёт преобладания количества карбида ванадия над карбидом хрома. Так, в инструментальной стали Х6Ф4М в общей сумме карбидов (16 %) доля карбида VC составляет половину. Это обеспечивает лучшую ковкость, так как эвтектика имеет веерообразную форму и не образует сплошной сетки; более высокую износостойкость, так как карбид

VC более твёрдый, чем карбид M_7C_3 на основе хрома, а его частицы по размерам в 2-3 раза меньше, чем карбида M_7C_3 .

Исследованы 6 экспериментальных лабораторных плавок. В экспериментальных плавках содержание хрома варьировали от 5,90 до 11,7 %, ванадия – от 6,10 до 10,10 %, углерода от 1,7 до 2,0 %. Температура закалки составляла для всех плавок 1100 – 1150°C. При исследовании применён фазовый физико-химический анализ с электрохимическим изолированием фаз и рентгеноструктурный анализ монолитных образцов.

После выбора широких интервалов легирования проводили пробные закалки с различных температур, чтобы создать матрицу необходимой структуры: мартенсит + 12...15 % остаточного аустенита. Большее количество аустенита неприемлемо, потому что для стали применяют низкий, а не высокий отпуск. А меньшее количество не будет обеспечивать прирабатываемость зубчатых колёс из высокоуглеродистой стали.

То или иное фазовое превращение при закалке обеспечивается содержанием углерода и легирующих элементов в твёрдом растворе после образования карбидов – к моменту закалки. Эти количества существенного отличаются от того, что введено в сталь. Вследствие присутствия первичных и образования при нагреве под закалку вторичных карбидов в одной из плавок, например, содержание углерода в мартенсите после закалки понижено в 6 раз, хрома – 1,3 раза, ванадия – почти в 10 раз, молибдена – в 1,5 раза.

В зависимости от соотношения в аустените углерода, хрома, ванадия и молибдена к моменту охлаждения при закалке возможен один из трёх вариантов фазовых превращений в матричной фазе: 1) желаемое мартенситное превращение с небольшим количеством остаточного аустенита; 2) частичное мартенситное превращение с более, чем 40 % аустенита; 3) отсутствие мартенситного превращения. Последний вариант имеет место в том случае, когда матрица при температуре нагрева под закалку представляет собой феррит. Ферритная структура появляется в тех плавках, в твёрдом растворе которых после образования карбидов остаётся менее 0,3 углерода, а хром и ванадий проявляют свою ферритообразующую способность, особенно когда величина превышает 7 % масс.

По данным ФФХА в плавках с 1,7...2 % C, 5,9 % Cr 6 % V после образования 6,7...7,4 % карбида ванадия аустенит содержит 0,32...0,55 % углерода, в среднем 5 % хрома, 0,75...0,95 % ванадия и 0,6 % молибдена. Эти стали после закалки имеют мартенситную структуру с менее 5 % остаточного аустенита (пл. 1) и 18 % (пл.2).

В плавках с более высоким содержанием хрома после образования 9,25...9,6 % карбидов аустенит содержит 0,20...0,30 % C, 5,75...6,50 % хрома,

0,5...2,4 % ванадия, 0,65 % молибдена. В такой матрице при закалке протекает мартенситное превращение, после его завершения остается до 18 % аустенита.

В аустените плавки с пониженным содержанием углерода (1, 67%) и повышенным – хрома (9 %).5 после образования 8,35 % карбидов также содержится 0,2 % С, пониженное количество ванадия (0,45 %) и повышенное – хрома 8,0 %. Поэтому аустенит такой стали имеет большую устойчивость, чем в пл. 3 и 4, и после закалки его содержание составляет 50...60 %.

Плавка, содержащая 10 % Cr и 10 % V . при температуре нагрева под закалку имеет ферритную структуру, в ней отсутствует мартенситное превращение.

Рентгеноструктурный фазовый анализ показал, что нежелательные структуры – мартенсит с 50 % аустенита и феррит образуются в тех плавках, в которых содержание углерода составляет менее 1,7 % или суммарное содержание хрома и ванадия составляет около 20 %. Мартенситное превращение с минимально возможным количеством аустенита протекает в плавках, в которых концентрация хрома, ванадия и углерода в аустените перед закалкой находится в пределах: 4,9 % Cr , 0,5...2,4 % V и 0,2...0,55 % С).

По проделанному эксперименту были рекомендованы предварительные интервалы легирования высокоуглеродистой конструкционной износостойкой стали: не более 7,7 % Cr, не более 9,2 % V, не менее 1, 7 % С [4].

Литература

1. *Тарасенко Л.В.* Фазовый физико-химический анализ. Металловедение и термическая обработка стали и чугуна: Справ. изд. В 3-х т. Т.1. Методы испытаний и исследований. – М.: Интерметинжиниринг, 2004. – 688 с.

2. *Тарасенко Л.В., Титов В.И., Уткина А.Н., Жегина И.П., Беляков Л.Н.* Применение фазового и фрактографического анализа при выборе композиции новой износостойкой стали для шестерён агрегатов авиационной техники // Авиационные материалы. - ВИАМ. – 1994. - № 1 – С. 5-13

3. *Уткина А.Н., Тарасенко Л. В, Шалькевич А.Б. , Титов В.И. –* Износостойкая теплостойкая сталь ВКС14 для мелко модульных зубчатых колёс и пар трения агрегатов // Труды н-т. конференции «Актуальные вопросы авиационного материаловедения», ФГУП ВИАМ. - 2007. С. 76

ВЛИЯНИЕ ДВОЙНОГО СТАРЕНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СТАЛИ ДЛЯ СИЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Тарасенко Л.В., Унчикова М.В.

(Москва)

Для силоизмерительных упругих элементов (СУЭ), работающих в конструкциях весов различного назначения, нами было предложено [1] использовать взамен углеродистых сталей с цинковым покрытием, коррозионно-стойкие стали, разработанные для силовых деталей авиастроения. Эти стали являются мартенситно-стареющими, и обычно режим старения находится в области перестаривания, когда наряду с выделением упрочняющих частиц ε -*Si* происходит обратное мартенситное превращение, что приводит к образованию до 25 % аустенита [2]. Такой режим обеспечивает благоприятное сочетание прочности, надежности и коррозионной стойкости. Однако аустенит снижает упругие свойства, и поэтому его присутствие в сталях для СУЭ является недопустимым. В связи с этим режимы старения коррозионно-стойких мартенситно-стареющих сталей должны соответствовать либо области максимального упрочнения, либо области недостаривания. Для достижения высокого уровня прочности, в данной работе предлагается использовать двойное старение, включающее основное старение и дополнительное, более низкотемпературное, т.к. известно, что для дисперсионно-твердеющих сплавов, например, на основе никеля, титана, алюминия, а также пружинных сплавов и сталей, использование комбинаций высоко- и низкотемпературного старения улучшает свойства материала.

В предыдущих исследованиях по изучению влияния двойного старения на твердость и ударную вязкость предложенной для СУЭ стали 06X14H6Д2МБТ было установлено, что при втором, более низкотемпературном нагреве, происходит более полный распад мартенсита, вызывающий дополнительное упрочнение. При этом упрочнение не сопровождается снижением ударной вязкости, что связано как с процессом отдыха мартенситной матрицы, так и с более однородным распределением частиц упрочняющей фазы в объеме зерна.

Однако для разработки более корректных рекомендаций по режиму двойного старения необходимо провести механические испытания, в наибольшей степени отражающие условия работы датчика. В используемой конструкции СУЭ тензорезистор прикрепляется на поверхность той части детали, которая работает в условиях изгиба, поэтому первая серия механических испытаний включала определение критериев прочности при изгибе.

В то же время известно, что основной характеристикой силоизмерительного элемента при эксплуатации является стабильность упругих свойств, т.е. отсутствие таких явлений, как ползучесть, гистерезис и обратное последствие, связанных с микропластической деформацией. К сожалению, в настоящее время на территории РФ отсутствуют испытательные установки для исследования этих процессов, поэтому вторым методом испытаний, который может характеризовать стабильность структуры и механических свойств при эксплуатации СУЭ, был выбран метод циклического деформирования при напряжениях, меньших предела пропорциональности, с последующим измерением прочностных свойств при растяжении.

Изучена сталь ЭП817, которая относится к коррозионно-стойким низкоуглеродистым мартенситно-стареющим сталям с карбидно-интерметаллидным упрочнением [4]. Химический состав исследованной плавки: 0,06 С; 13,5 % Cr; 5,2 Ni; 0,08 % Ti; 1,4 % Mo; 2,2 % Cu; 0,3 % Nb.

Упрочняющая обработка включала закалку от 1000 °С, а также основное старение при температурах 425, 450, 475, 500, 515 °С и второе, низкотемпературное старение – при 400°С. Время выдержки при старении составляло 1 ч. Механические испытания проведены по гостированным методикам.

Количественный анализ зеренной структуры выполнен на компьютеризированном микроскопе с использованием программы, разработанной на кафедре «Материаловедение» в МГТУ им. Н.Э Баумана.

Твердость стали ЭП817 изучена после закалки в зависимости от температуры основного старения. В области недостаривания, в интервале температур 400-475 °С происходит повышение твёрдости.. После достижения максимального значения при 475 °С, твердость снижается, что соответствует стадии перестаривания. Двойное старение повышает твердость во всем исследуемом диапазоне температур от 425 до 475 °С.

Испытания на изгиб проведены на стали ЭП817 после основного и двойного старения на продольных и поперечных образцах. На продольных образцах в случае основного старения предел текучести $\sigma_{0,2}$ и предел пропорциональности σ_{m1} увеличиваются особенно значительно при переходе от температуры 425 к 450°С. Двойное старение ($t_{\text{осн}} + 400^\circ\text{C}$) приводит к повышению всех характеристик прочности. Особенно значительно возрастают предел текучести и предел пропорциональности на поперечных образцах, что имеет важное практическое значение, т.к. поверхность, на которую наклеивается тензорезистор, расположена перпендикулярно направлению прокатки.

Различие свойств продольных и поперечных образцов, очевидно, является следствием неоднородности зеренной структуры, т.к. согласно проведенному количественному анализу средний размер зерна в центральной части прутка на 33...35 % больше по сравнению с периферийной зоной.

Применение двойного старения сопровождается также повышением отношения $\sigma_{\text{пл}}/\sigma_{0,2}$ до значений 0,90...0,92, что свидетельствует об уменьшении склонности к микропластической деформации и подтверждает повышение упругих свойств стали.

На основании проведенных исследований режимом двойного старения, обеспечивающим максимальное упрочнение, является $(475 + 400)^\circ\text{C}$, который позволяет получить следующие механические свойства $\sigma_{\text{пл}}^{\text{изг}}=2060$ МПа, $\sigma_{0,2} = 2310$ МПа на продольных и $\sigma_{\text{пл}} = 2160$ МПа, $\sigma_{0,2} = 2390$ МПа поперечных образцах.

Предварительное циклическое деформирование стали ЭП817 вызывает ухудшение всех прочностных свойств при незначительном изменении пластических характеристик. Если после двойного старения по режиму $(425+400)^\circ\text{C}$ снижение $\sigma_{\text{пл}}$ и $\sigma_{0,05}$ составляет 73 МПа и 95 МПа соответственно, то после двойного старения по режиму $(475+400)^\circ\text{C}$ эти свойства снижаются не более чем на 25 МПа.

Наименьшее снижение уровня прочности имеет место для режима двойного старения $(475+400)^\circ\text{C}$. Применение этого режима обеспечивает получение более высоких прочностных характеристики по сравнению как одноступенчатым старением при температуре 475°C , так и двухступенчатым старением по режиму $425^\circ\text{C}+400^\circ\text{C}$. Таким образом, сталь ЭП817 в состоянии максимального упрочнения незначительно разупрочняется при циклическом нагружении, что свидетельствует о более стабильной структуре сплава.

Для коррозионно-стойкой мартенситно-старяющейся стали ЭП817, предназначенной для изготовления силоизмерительных упругих элементов, после закалки рекомендуется проводить двойное старение по режиму $(475^\circ\text{C}+400^\circ\text{C})$, который по сравнению с одинарным основным старением обеспечивает: 1) повышение твёрдости; 2) повышение прочности при испытаниях на статический изгиб, в том числе и предела упругости; 3) наименьшую степень разупрочнения после воздействия циклических нагрузок; 4) уменьшение склонности к микропластической деформации. Установлено, что максимальные прочностные свойства достигаются на поперечных образцах, что позволяет рекомендовать разработку технологического процесса изготовления СУЭ таким образом, чтобы поверхность накладки тензорезистора была ориентирована в поперечном направлении горячекатаного прутка, что будет способствовать более надёжной работе СУЭ в условиях эксплуатации.

Литература

1. Тарасенко Л.В., Красов Т.А., Унчикова М.В. Термическая обработка коррозионно-стойкой стали для изготовления силоизмерительных упругих элементов // Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. «Машиностроение». - 2007. - №2. - С. 82-88.
2. Братухин А.Г., Гурвич Л.Я. Коррозионная стойкость высокопрочных нержавеющей сталей. М.: Авиатехинформ, 1999. - 288 с.
3. Тарасенко Л.В., Красов Т.А., Унчикова М.В. Влияние двухступенчатого старения на свойства мартенситно-старяющей стали 06X14H6Д2МБТ для силоизмерительных упругих элементов // МИТОМ. - 2004. - № 10. - С 7-11.
4. Братухин А.Г., Погосян М.А., Тарасенко Л.В. Конструкционные и функциональные материалы современного авиастроения: Учебное пособие – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 304 с.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА В НЕПОДВИЖНОМ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ АДСОРБЦИОННОМ СЛОЕ

Тарасова А.Н.

(Москва)

Работа выполнена в продолжение систематических исследований процессов в адсорберах систем очистки атмосферы, предназначенных для эксплуатации в ограниченных объемах (космические корабли, подводные лодки, герметические капсулы и т.п.). В предшествующих работах [1-3] представлено подробное описание основных физических процессов, получена замкнутая система уравнений, моделирующих процессы массопереноса в неподвижном изотермическом слое зернистого материала с фильтрующимся газом, разработаны метод решения данной задачи и алгоритм численного расчета. В настоящей работе проведен анализ результатов параметрических расчетов процессов адсорбции углекислого газа на гидроксиде железа в предположении изотермичности слоя, выполненных в среде вычислительной математики MATLAB.

В качестве базового варианта расчета процесса адсорбции углекислого газа принят вариант со следующими исходными данными: радиус сечения входа в слой $r_1 = 0,11$ м, толщина слоя сорбента $L = 0,12$ м, пористость шихты $\varepsilon = 0,4$, параметры изотермы Ленгмюра – В $B = 258$ м³/кг, $a_{\infty} = 29,3$ кг/м³, внешнедиффузионный кинетический коэффициент $\beta = 10$ 1/с; входные концентрация CO₂ и скорость потока воздуха $\rho_1 = 5,5 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, $u_1 = 0,5$ м/с. Время счета варианта с указанными входными данными на рабочей станции

(процессор – Intel(R) Core(TM) i3-3220 CPU @ 3.30 GHz, оперативная память – 16,0 ГБ) составляет ~ 14 с.

За время, равное газодинамическому времени $t = \tau_d \sim 0,15$ с, исходный разрыв в уровнях концентраций (начальной $\rho_0 = 0$ и входной $\rho_1 = 5,5 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ при $r = r_1$) выносится вместе с потоком воздуха за пределы слоя ($r > r_1 + L$). При этом происходит формирование начального профиля концентрации CO₂. После формирования фронта начинается медленное его продвижение по шихте по мере того, как происходит последовательное насыщение слоев сорбента. Скорость перемещения профиля определяется количеством вещества, подводимого к слою в единицу времени ($\rho_1 \cdot u_1$), и практически не зависит от кинетики сорбции и пористости слоя, которые играют существенную роль лишь в процессе формирования фронта. Для каждого фиксированного сечения продвижение фронта по слою означает монотонное возрастание концентрации CO₂ в воздухе до уровня входной концентрации ρ_1 . Количество поглощенного вещества увеличивается соответственно до величины равновесной концентрации $a_1^*(\rho_1)$, определяемой изотермой сорбции. В данном, базовом варианте $a_1^* = 17,2$ кг/м³. Начиная с некоторого момента времени, происходит прорыв вещества через слой, после чего концентрация CO₂ на выходе из слоя монотонно возрастает и асимптотически стремится к уровню входной концентрации $\rho = \rho_1$. При параметрах базового варианта полное насыщение слоя шихты происходит за время $t \sim 2000$ с.

Последующие параметрические расчеты проводили при варьировании следующих величин: концентрации газа на входе в слой поглотителя ρ_1 , скорости фильтрации газа u_1 , значений кинетического коэффициента адсорбции β . Строили графики поверхностей концентраций поглощаемого вещества в фильтрующемся газе $\rho(t, r)$ и поглощенного вещества в адсорбционном слое $a(t, r)$.

Анализ результатов параметрических расчетов показал, что с ростом входной концентрации уменьшается время насыщения слоя, что обусловлено увеличением плотности тока вещества ($\rho_1 \cdot u_1$), подводимого к слою сорбента. Это в свою очередь проявляется в более быстром продвижении профилей концентраций свободного $\rho(t, r)$ и поглощенного $a(t, r)$ углекислого газа и увеличением крутизны выходной кривой (изменение по времени концентрации CO₂ в потоке воздуха на выходе из слоя – при $r = r_1 + L$).

Увеличение скорости на входе в слой u_1 приводит, в целом, к тем же эффектам, что и рост входной концентрации, что также объясняется

увеличением плотности тока $\rho_1 \cdot u_1$. Однако в этом случае имеется принципиальное отличие: при фиксированной толщине слоя, начиная с определенного уровня скорости, наблюдается, так называемый, «кумулятивный проскок», когда скорость движения потока газа настолько высока, что вещество не успевает поглотиться и проходит сквозь слой ненасыщенного сорбента. Выходные кривые при этом начинаются практически сразу с некоторого конечного значения концентрации. При рассматриваемых параметрах проскок наблюдается, начиная с $u_1 = 0,5$ м/с.

С ростом кинетического коэффициента β увеличивается крутизна профилей и, соответственно, выходной кривой. При фиксированной толщине слоя малые значения коэффициента β приводят к проскоку концентрации уже при $t = \tau_0$, как и в случае достаточно высоких значений скорости потока.

Литература

1. Тарасова А.Н. Экспериментальное исследование нелинейных процессов тепло- и массообмена при различных режимах работы адсорбционного слоя // *Нелинейный мир*. – М., 2011. – Т. 9, № 7. – С. 403 – 409.
2. Рабинский Л.Н., Тарасова А.Н. Исследование физических процессов в адсорбционном слое с использованием численного моделирования // *Материалы II Всероссийской научно-практической студенческой школы-семинара «Компьютерный инжиниринг в промышленности и вузах», посвященной 80-ти летию МАИ. г. Кременки, «Вятичи», 20 – 21 ноября 2009 г.* – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. – С. 83 – 86.
3. Тарасова А.Н. Моделирование процессов массопереноса в неподвижном изотермическом адсорбционном слое // *Материалы XIX Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т. 1. Ярополец, 18 – 22 февраля 2013 г.* – М.: ООО «ТР-принт», 2013. – С. 191 – 193.

К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ВОЛН В ГРУНТОВЫХ СРЕДАХ С ЖЕСТКИМИ ПРЕГРАДАМИ

Тарлаковский Д.В., Кубенко В.Д., Мейш В.Ф., Мейш Ю.А.

(Москва, Киев)

Рассматривается процесс распространения цилиндрических волн в грунтовой среде при взаимодействии с жесткой недеформируемой преградой. Движение грунтовой среды для случая распространения цилиндрических волн описывается системой уравнений в эйлеровых координатах [1]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(\rho U^2 + P)] - \frac{1}{r} P = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r(\rho U)] = 0.$$

В уравнениях (1) - r - пространственная координата, t - временная координата, U - скорость, ρ - плотность, P - давление.

Уравнение состояния грунтовой среды принимается, согласно модели нелинейной жидкой многокомпонентной среды [2]

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \left[\frac{\gamma_i (P - P_0)}{\rho_{i0} c_{i0}^2} + 1 \right]^{-1/\gamma_i},$$

где обозначения введены согласно [2].

Принимается, что к границе цилиндрической полости $r = r_0$ прилагается нестационарная нагрузка $P(t)$. На границе $r = r_N$ (жесткая граница) полагается $U = 0$.

Для решения поставленной задачи применяется конечно – разностная схема Мак – Кормака [3].

Изучен процесс взаимодействия цилиндрических волн в грунтовой среде с недеформируемой преградой при разных характеристиках грунтовой среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №14-01-90412, №13-08-90435).

Литература

4. *Рождественский Б.Л., Яненко Н.Н.* Системы квазилинейных уравнений и их приложение к газовой динамике – М.: Наука, 1978. – 688 с.
5. *Ляхов В.М.* Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах – М.: Недра, 1982. – 288 с.
6. *Флетчер К.* Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 2 – М.: Мир, 1991. – 526 с.

СОВРЕМЕННЫЙ ФОНДОВЫЙ РЫНОК И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РАЗВИТИЕ ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТЕХНОЛОГИЙ

Теплова Л.А., Трутниева А.В.

(Москва)

Важнейшей задачей в настоящее время является обеспечение стабильного и устойчивого промышленного роста, в т. ч. в сфере транспортного машиностроения. С этой целью необходимо активно использовать возможности рынка ценных бумаг: для привлечения инвестиций в отечественную промышленность расширить доступ эмитентов на фондовый рынок, а также повысить уровень участия населения в инвестиционных процессах. Привлечение средств может осуществляться на разной основе: в форме займов, на принципах возвратности и платности, а также в форме продажи акций или долей в уставном капитале. Идея объединять скромные денежные средства одиноких инвесторов – это идея акционерного капитала, для обеспечения массовости инвестиций. Коллективные формы инвестирования в настоящее время очень важны, т. к. они обеспечивают финансирование реальных секторов экономики, давая доступ к инвестициям инвесторам с небольшим потенциалом, т. е. населению.

Можно выделить следующие актуальные проблемы развития отечественного фондового рынка, которые требуют первоочередного решения:

- целевая переориентация рынка ценных бумаг на выполнение своей главной функции – направление свободных денежных ресурсов на цели развития отечественной промышленности и обеспечение ее конкурентоспособности с экономиками ведущих индустриальных держав;
- создание государственной долгосрочной концепции в области развития и регулирования рынка ценных бумаг;
- формирование комиссии по ценным бумагам и фондовому рынку, которая сможет объединять ресурсы государства и частного сектора на цели развития рынка ценных бумаг;
- опережающее создание депозитарной и клиринговой сети, агентской сети для регистрации, движения ценных бумаг в интересах эмитентов;
- реализация принципа открытости информации через расширение объема публикаций о деятельности эмитентов ценных бумаг; введение рейтинговой оценки компаний-эмитентов, развитие сети специализированных изданий, характеризующих ключевые, имеющие большое значение для экономики страны, отдельные производства и отрасли как объекты инвестирования.

Основными перспективами развития современного рынка ценных бумаг являются:

- концентрация и централизация капиталов; централизация происходит путем слияния капиталов в более крупные структуры рынка ценных бумаг;
- интернационализация и глобализация рынка; основу глобального рынка составляют ценные бумаги транснациональных корпораций;
- повышение уровня организованности и усиление государственного контроля, т. к. надежность рынка ценных бумаг и степень доверия к нему со стороны массового инвестора напрямую связаны со степенью организованности рынка и усилением государственного контроля за ним;
- компьютеризация рынка ценных бумаг;
- нововведения на рынке: новые инструменты, системы торговли ценными бумагами, инфраструктура рынка;
- повышение уровня информатизации систем принятия решений, например тенденции перехода денежных средств из своих традиционных форм в форму ценных бумаг, тенденции перехода одних форм ценных бумаг в другие, более доступные для широких кругов инвесторов;
- взаимодействие с другими рынками капиталов, с одной стороны рынок ценных бумаг оттягивает на себя капиталы, но с другой – перемещает эти капиталы через механизм ценных бумаг на другие рынки и тем самым способствует их развитию.

В настоящее время в России насчитывается 11 фондовых бирж. Реальные торги ценными бумагами происходят на 5 биржах: Московской межбанковской валютной бирже ММВБ, Российской Торговой Системе РТС, Уральской региональной валютной бирже ММВБ-Урал, г. Екатеринбург, Санкт-Петербургской валютной бирже СПВБ, Фондовой бирже «Санкт-Петербург» ФБ СПб. Наиболее крупными фондовыми биржами в России являются ММВБ и РТС.

На фондовой бирже ММВБ ежедневно идут торги по ценным бумагам около 780 российских эмитентов, в т. ч. по акциям свыше 230 компаний, включая крупнейших эмитентов – ОАО «Газпром», ОАО «Ростелеком», ОАО «Сбербанк» России, ОАО «Лукойл», ОАО «НК»Роснефть» и другие, с общей капитализацией порядка 10 трлн. руб. В состав участников торгов фондовой биржи ММВБ входят 650 организаций профессиональных участников рынка ценных бумаг, клиентами которых являются свыше 670 тыс. частных инвесторов.

Наиболее неустойчивым участником рынка ценных бумаг являются инвестиционные фонды. При сравнении отчетности за 2011 год наиболее значительными инвестиционными фондами являются:

- Зенит – Доходный II, доходность 50,55 %, рейтинг 64,65 %, тип ОФБУ – общие фонды банковского управления;
- Зенит – Перспективный, доходность 54, 23%, рейтинг 56,69%, ОФБУ;

- Зенит – Доходный, доходность 46,48 %, рейтинг 44,36 %, ОФБУ;
- Глобал Капитал – Акции, доходность 73,85%, рейтинг 32,56 %, АО – акционерное общество;
- Арсагера – фонд акций, доходность 41,93 %, рейтинг 28,22%, АО;
- Флеминг и Партнеры – Фонд акций МиСБ – доходность 49,04 %, рейтинг 13,88 %, АО;
- АТОН – фонд акций, доходность 34,59 %, рейтинг 10,34 %, АО;
- ВТБ – фонд акций, доходность 30,85 %, рейтинг 7,82 %, АО;
- Райффайзен – сырьевой сектор, доходность 30,41 %, рейтинг 7,69 %, АО;
- Универ Базовит, доходность 26,35%, рейтинг 6,56 %, АО;

Одно из самых заметных изменений - Глобал Капитал- Акции покинул лидирующую позицию по сравнению с концом 2010 года, Зенит же – более полугодом стабильно держится на первых местах. Остальные места – на них одни и те же фонды, изменения происходят каждый месяц, но они незначительны – на 1-2 позиции то вверх, то вниз.

Для количественной оценки крупнейших участников рынка ценных бумаг банков, рассмотрим в каждом федеральном округе по пять наиболее значительных по размеру активов кредитных организаций за 2011 год.

В Центральном ФО – это Сбербанк РФ (активы – 9,7 трлн. руб.), Газпромбанк (1,9 трлн. руб.), Россельхозбанк (1,2 трлн. руб.), ВТБ-24 (1,03 трлн. руб.), Банк Москвы (882,1 млрд. руб.). Все зарегистрированы в Москве.

В Приволжском ФО – банк «Ак Барс» (Казань 275,7 млрд. руб.), Русфинанс (Самара 95,2 млрд. руб.), Татфондбанк (Казань, 70,03 млрд. руб.), Первый Объединенный Банк (Самара, 34,4 млрд. руб.), Национальный Торговый Банк (Самара, 35,4 млрд. руб.).

В Северо-Западном ФО – ВТБ (3,3 трлн. руб.), банк «Санкт-Петербург» (302,5 млрд. руб.), «Россия» (267,1 млрд. руб.), «КИТ Финанс Инвестиционный Банк» (110,7 млрд. руб.), Международный Банк Санкт-Петербурга (53,5 млрд. руб.). Все зарегистрированы в Санкт-Петербурге.

В Северо-Кавказском ФО - Ставропольпромстройбанк (Ставрополь, 6,9 млрд. руб.), Эксперс (Махачкала, 5,6 млрд. руб.), Евроситибанк (Пятигорск, 5,5 млрд. руб.), Банк Развитие Региона (Владикавказ, 3,6 млрд. руб.), Бум-Банк (Нальчик, 2,04 млрд. руб.).

В Уральском ФО-Ханты-Мансийский Банк (Ханты-Мансийск, 207,4 млрд. руб.), Уральский Банк Реконструкции и Развития (Екатеринбург, 86,1 млрд. руб.), СКБ-Банк (Екатеринбург, 85,9 млрд. руб.), Запсибкомбанк (65,4 млрд. руб.), Межкомбанк (Камёнок-Уральский, 54,5 млрд. руб.).

В Южном ФО Центр-Инвест (Ростов-на-Дону, 52,4 млрд. руб.), Кубань-Кредит (Краснодар, 26,3 млрд. руб.), Крайинвестбанк (Краснодар, 26,3 млрд.

руб.), Первомайский (Краснодар, 11,1 млрд. руб.), РусЮгБанк (Волгоград, 64 млрд. руб.).

В Сибирском ФО – МДМ Банк (Новосибирск, 380, 6млрд. руб.), Левобережный (Новосибирск, 15,4 млрд. руб.), Новокузнецкий Муниципальный Банк (Кемерово, 12,8 млрд. руб.), БКС-Инвестиционный Банк (Новосибирск, 11,7 млрд. руб.).

В Дальневосточном ФО - Восточный Экспресс-Банк (Благовещенск, 112,4 млрд. руб.), Азиатско-Тихоокеанский Банк (Благовещенск, 48,4 млрд. руб.), Дальневосточный Банк (Владивосток, 31,1 млрд. руб.), «Приморье» (Владивосток, 25,2 млрд. руб.), Примсоцбанк (Владивосток, 19,9 млрд. руб.).

По данным ЦБ РФ, суммарные активы банков выросли до 35,2 трлн. руб. Основные составляющие в активах - кредитный портфель и прочие размещенные средства, включая просроченную задолженность - 68,1% (24трлн. руб.) и ценные бумаги, приобретенные кредитными организациями, -16,5 % (5,8 трлн. руб.). В кредитном портфеле преобладают ссуды, предоставленные нефинансовым организациям, -42,9% активов (15,1 трлн. руб.). В составе портфеля ценных бумаг доминируют вложения в долговые обязательства -12,1 % активов (4,2 трлн. руб.)

В большинстве развитых стран, мелкий инвестор является базовым участником финансового рынка. Благоприятный климат для инвестирования мелкими участниками в реальный сектор экономики создается на основе платности и возвратности. В России несомненно, важную роль в развитии рынка ценных бумаг, в настоящее время, имеет:

- внедрение современных информационных технологий;
- организация торгов в интернет;
- совершенствование путей удаленного доступа, электронных торговых систем;
- мобилизация сбережений внутренних инвесторов, совершенствования методов расчета с населением – инвесторами с небольшим капиталом;
- стратегические формы инвестирования. Стратегического инвестора интересует укрепление мощности самого предприятия, всего капитала, в т. ч. интеллектуального и соответственно доли стратегического инвестора в абсолютном выражении.

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ И ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ КОРПОРАЦИЙ.

Теплова Л.А.

(Москва)

Рассмотрены современные виды корпораций, закрытые и открытые АО. В зарубежной практике кроме ЗАО и ОАО действуют S-корпорации – объединения капиталов физических лиц, имеющих налоговые льготы. В основе этой классификации – организационно-правовые формы. По содержанию деятельности выявляются инвестиционные и производственные корпорации. Инвестиционные ИБГ – многопрофильные финансовые холдинги, которые не производят товар или услуги для внешних покупателей, а лишь покупают и продают активы, контролируют движение и доходность капиталов, управляют финансовыми расходами, организуют эмиссию и оборот ценных бумаг. ИБГ представляют собой конгломераты – объединения компаний самых различных отраслей, связанные единством собственности и финансового управления. Например, ИБГ «Ренова» владеет активами в металлургии, нефтяной, химической, горнодобывающей промышленности, в энергетике, ЖКХ. ОАО «Интеррос», наряду с Норильским комплексом, включает холдинг «Профмедиа» (телеканал, радиостанции, издательства, электронная информация). К АФК «Система», наряду с телекоммуникациями, разработкой и производством электронной техники, принадлежат нефтяные, строительные, туристические компании, Пермский машиностроительный холдинг. Производственные корпорации (в «Базовом» элементе – ОАО «Русский Алюминий», ОАО «Автопром», ОАО «Главмосстрой», ОАО «Кабельные сети» и др.) организуют разработку, производство, меркетинг, сбыт товаров и услуг. На определенном сегменте рынка, самостоятельно выходят на фондовый рынок. В их составе нередко создаются дочерние корпорации базового уровня, например, Красноярский и Саянский алюминиевые комбинаты, которые осуществляют оперативное управление производством в рамках общей стратегии.

По форме собственности выделяются государственные, публичные и семейные корпорации. Причины создания государственных корпораций – усиление дисбаланса между составом приоритетных задач: диверсификация экономики, переход к инновационному развитию и инструментам их решения, экономический спад производства. Объединенная авиастроительная корпорация ОАО «ОАК» представляет собой холдинг с доминирующим пакетом у государства – 84,33 % в 2013 году, который определяет стратегию развития производственных корпораций «Сухой», «Миг» и др. Холдинг направлен против фрагментации отрасли, построен как горизонтально, а не вертикально интегрированная компания, т.е. объединяет предприятия, КБ, лизинговые

компаний, учебные центры и т.д. Ближайшая цель ОАО «ОАК» - занять 50% российского и 10% мирового рынка гражданских самолетов, рост капитализации со 100 до 400 млрд. руб. к 2015 году и до 1 трлн. руб к 2025 году, достичь уровень продаж до 20-25 млн. долл. к 2025 году (годовой отчет за 2011 год на базе Консолированной финансовой отчетности МСФО). В 2013 году уставной капитал ОАО «ОАК» составляет 188,903 млрд. руб в соответствии с общим объемом выпущенных акций по их номинальной стоимости. В 2013 году корпорация ОАО «ОАК» - победитель конкурса на научно-технических работ молодых специалистов в области авиастроения.

По горизонтальному принципу построена и Объединенная судостроительная корпорация ОАО «ОСК», включающая три группы верфей – на Севере-Западе, Севере и на Дальнем Востоке. Гражданское судостроение, загруженное на 20-25%, удовлетворяет около 10% российских потребностей. Стратегическая линия ОАО «ОСК» направлена на освоение, с высокой рентабельностью, отраслевых научно-исследовательских работ. В гражданском судостроении - это заказы торгового флота, энергетических компаний, суда для работ на внутренних водных путях, буровые и добыточные платформы, специализированные суда ледового класса, для освоения Арктики, в военном судостроении – это строительство флота XXI века. Значительная доля продукции военного назначения ОАО «ОСК» идет на экспорт (основные финансовые показатели ОАО «ОСК» и обществ, входящих в ОАО «ОСК», 14.09.2010 г.). В настоящем времени ОАО «ОСК» - это 80% всех судостроительных проектов в России.

Первоначально, некоторые государственные корпорации создаются на базе федеральных ГУП со 100% государственный участием (РАО «Железные дороги», «Пулково»), затем часть акций продается, в том числе широкому кругу мелких инвесторов. В стратегических отраслях, контрольный пакет акций не может принадлежать нерезидентам, например, производства вооружений, военной техники, специальных сталей и сплавов, авиакосмическая индустрия, атомная энергетика, естественные монополии, местонахождения на шельфе, с запасами нефти более 70 млн. т. и газа более 50 млрд. куб. м., производства возбудителей инфекционных заболеваний и средств активного воздействия на геофизические и гидрометеорологические процессы. Государственные корпорации должны функционировать на конкурентных основах, содействовать развитию частного бизнеса: среднего и малого. Этому способствует новый порядок конкурсного распределения госзаказа.

Публичные корпорации принадлежат большому числу акционеров, ни один из которых не имеет контрольного пакета акций. Для этих компаний особую роль играет общественная оценка их социальной ответственности (ОАО «СбербанкРФ», ОАО «Внешторбанк», ОАО «Татнефть» и др.). В целом доля

публичных корпораций в их общей выручке составляет в России примерно 1/4, а в США и ряде других стран – 4/5.

Семейные корпорации сыграли особую роль в создании конкуртнспособной экономики Германии, Италии, Японии, Франции, США. Однако за рубежом, почти не осталось компаний, которые практически на 100%, принадлежали бы одному человеку, как АФК «Система» В. Евтушенко, ГТК «Норильский никель» - В.Потанину, «Северсталь-группа» - А. Мордашову, группа «Новолипецкий металлургический комбинат» - В.Лисину, «Ренова» - В.Вексельбургу и др.

По характеру специализации корпорации делятся на горизонтально и вертикально интегрированные. В России преобладают вертикально интегрированные компании, которые включили в свой состав поставщиков сырья, материалов, комплектующих изделий, торговые, транспортные, финансовые предприятия и фирмы. Вертикальная интеграция позволяет снизить риск срыва поставок и нарушения контрактов. Вертикально интегрированные нефтяные корпорации, которым принадлежат нефтеперегонные заводы НПЗ, АЗС и трубопроводы, стали монополистами во многих регионах России. Многие корпорации владеют непрофильными активами: морскими портами, телестанциями, футбольными командами, газетами и т.д. Нефтяные корпорации иногда продают НПЗ, АЗС, танкерный флот, буровые подразделения и пользуются услугами специализированных фирм, например, ОАО «Лукойл», владеющая 17,8% рынка общероссийской добычи газа и нефтепродуктов и 18,2% общероссийской переработки.

По масштабу деятельности выделяются локальные, национальные и транснациональные корпорации -ТНК, например, ОАО «Газпром», объединенная компания «РУСАЛ», ОАО «Северсталь», «Вымпелком», «МТС» и др. На долю ОАО «Газпром» приходится 85% российской и 15% мировой добычи природного газа. В последние годы российские корпорации все более активно приобретают активы в ближнем и дальнем зарубежье, что способствует выходу на новые рынки и освоению новых технологий.

Также особое значение имеет создание стратегических альянсов- это новая форма корпоративных отношений на базе совместных инновационно-инвестиционных проектов, не требующих объединения основных активов и создания значительных управленческих структур, например, соглашение о стратегическом партнерстве группы «ГАЗ», корпорации «Русские машины» и «Magna International Europe AG», предусматривающие совместную разработку, дизайн, производство и логистику автокомпонентов или альянсы для прорыва в технологиях (двигатели на водородном и альтернативном топливе и др.).

Основные преимущества корпорации как рыночного субъекта:

- возможность привлечения дополнительного капитала в результате выпуска ценных бумаг и их реализации на фондовом рынке;
- создание дочерних, внучатых и зависимых компаний, совместно обслуживающих определенный сегмент рынка;
- корпорация планирует и организует весь технологический цикл, включая производство и реализацию конечного продукта, послепродажное обслуживание его потребителей. Например, три корпорации на российском рынке сотовой связи «МТС» (35% абонентов), «Вымпелком» (34%), «Мегафон» (19%) – новая форма планомерного сотрудничества в освоении перспективных рынков, разработке новых технологий, создании производств в различных странах и регионах;
- отчетность по стандарту CRI C3, создаваемая в процессе консультации с акционерами, сотрудниками и общественностью, характеризует стратегию корпорации и ее воздействие на социально-экономическую стабильность региона. Первой в России такую отчетность предоставила компания ОАО «Уралсиб»;
- демократическое разделение власти между законодательными органами: общее собрание акционеров, совет директоров и правления – и контрольно-ревизионными органами: ревизионная комиссия и обязательный внешний аудит.

Выделяется три основных группы факторов, влияющих на инвестиционное поведение крупного российского бизнеса: непропорциональная структура цен на товары и услуги разных отраслей национальной экономики; специфическое распределение прибыли и функций управления; снижение регулирующего воздействия государства на крупный бизнес приведет к подчинению сырьевых секторов современной экономики транснациональному капиталу и процессам стагнации – в обрабатывающей промышленности. В настоящее время в России наибольшее количество корпораций приходится на непроизводственную коммерческую сферу.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НЕСУЩИХ И УПРАВЛЯЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Тлеулинов М.К.

(Казань)

В большинстве случаев для расчета несущих и управляющих поверхностей используются балочная или пластинная аналогии, когда несущая или управляющая поверхности представляются в виде балки или пластины. Как правило, полагают, что для поверхности малого удлинения в качестве модели

следует использовать пластину, а для поверхности большого удлинения – балку. Предполагается также, что это справедливо как в линейной, так и в геометрически нелинейной постановке. Исследования показывают, что на самом деле картина более сложная, особенно если используется модель пластины с учетом сдвига (модель Тимошенко). При учете геометрической нелинейности, в ряде случаев, гибкие пластины дают решения, заметно отличающиеся от балочных даже при больших удлинениях.

Приводятся результаты расчетов несущих и управляющих поверхностей с различными удлинениями и относительными толщинами, дается сравнительный анализ полученных решений.

О РЕАКЦИЯХ В УЗЛАХ НАВЕСКИ УПРАВЛЯЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Тлеулинов М.К.

(Казань)

Если управляющая поверхность прикреплена к несущей статически неопределимым образом, то есть в трех и более точках, то реакции в узлах навески управляющей поверхности будут зависеть не только (и не столько) от внешней нагрузки, но и от таких факторов, как соотношение жесткостей управляющей и несущей поверхностей и угла отклонения управляющей поверхности. Одна и та же нагрузка приводит к совершенно разным реакциям при разных углах отклонения управляющей поверхности. Более того, при наличии только горизонтальной внешней нагрузки при отклонении руля появляются горизонтальные реакции, которые могут превосходить вертикальные в несколько раз.

Для исследования указанных явлений были созданы соответствующие матмодели, реализованные в пакеты прикладных программ. Составные несущие и управляющие поверхности моделировались балками и пластинами. Решения получены с помощью метода конечных элементов и метода интегрирующих матриц.

Приведены результаты численных исследований зависимости реакций от угла отклонения управляющей поверхности и ряда других параметров.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ С БОЛЬШИМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ ГИБКОЙ ЛОПАСТИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ НЕСУЩЕГО ВИНТА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ДВИЖЕНИИ ВЕРТОЛЕТА

Шклярчук Ф.Н.

(Москва)

Рассматриваются нелинейные пространственные колебания с большими перемещениями гибкой лопасти в составе вращающегося несущего винта при нестационарном движении вертолета. Лопасть рассматривается как тонкая балка со связанными деформациями изгиба-сдвига в двух плоскостях, кручения и растяжения. Используется метод конечных элементов (МКЭ) с балочными конечными элементами (КЭ). Деформации КЭ считаются малыми и определяются в местной системе координат, которая жестко соединена с торцом предыдущего КЭ и совершает большие пространственные перемещения и повороты. Уравнения движения составляются как уравнения Эйлера-Лагранжа для квазискоростей, перемещений и углов поворота сечений, разделяющих КЭ.

Выполнены оценки нелинейных членов, рассмотрены различные частные случаи, получены линеаризованные уравнения движения.

КЛАССИФИКАЦИЯ И НЕЛИНЕЙНЫЙ АНАЛИЗ ОТКРЫТЫХ И ЗАКРЫТЫХ ОТСЛОЕНИЙ

Щугорев В.Н., Касьянов К.Г.

(Москва)

Многие изделия из композитов, широко применяемые на практике, имеют слоисто – волокнистую структуру. Низкая межслойная прочность композитов делает такие конструкции чувствительными к дефектам типа расслоений

В процессе эксплуатации возможны взаимодействия деталей и внешних элементов конструкций со сторонними объектами - ударное нагружение, статическое нагружение выше предельного состояния трещиностойкости а также царапины и надрезы внешнего слоя. Отслоение у внешнего слоя конструктивного элемента меняет свое начальное положение, что приводит к изменению функциональности детали.

Расчетные модели конструктивных элементов с отслоениями классифицировались по типу геометрической схематизации, характеру изменения параметров нагрузки во времени и виду нагружения.

Геометрическая схематизация элемента конструкции с отслоением представлена следующими объектами: стержень с отслоением (один из размеров

объекта на порядок и более превышает два других размера, направление приложения внешних усилий – вдоль оси); балка с отслоением (конструктивная схема - стержень, работает на изгиб); пластина с отслоением (один из размеров мал по сравнению с двумя другими, срединная поверхность является плоскостью); оболочка с отслоением.

По характеру изменения параметров нагрузки во времени рассматривалось квазистатическое и циклическое нагружение, а также нагружение падающим грузом в предположении, что влияние скорости приложения усилий на свойства материала отсутствует.

Вид нагружения классифицировался как нагружение приложенными усилиями (мягкое); нагружение перемещениями (жёсткое).

Для каждого из случаев формулировались критерии потери несущей способности. Для стержневого элемента с отслоением внешнего слоя это подрастание стрелы прогиба до критического значения, которое может быть назначено из эксплуатационных требований. Для балочных и оболочечных элементов, работающих на изгиб, принимались следующие критерии: величина стрелы прогиба балки превышает критическое значение (для случая мягкого (силового) нагружения); неограниченный рост дефектов, при котором балка разделится на две части (для случая, когда технические условия не предусматривают эксплуатацию элемента с таким типом нарушения целостности); значение эквивалентных напряжений превышает критическое.

Разработаны базовые алгоритмы оценки несущей способности конструктивных элементов с расслоениями. Базовые алгоритмы в числе прочих операций включают в себя решение частных задач механики разрушения об определении параметров системы, определяющих продвижение дефектов. Рассмотрены варианты решения данных задач на основе подхода аналитической механики разрушения, предложенного В.В. Болотиным. Аналитическая механика разрушения предполагает вычисление обобщённых сил, стремящихся увеличить размеры дефекта, а также сил сопротивления их росту.



Рис. 2.1. Классификация рассматриваемых расчётных моделей конструктивных элементов с отслоениями

Помимо аналитических решений для обобщенных сил основные характеристики роста дефектов определялись с применением Метода конечных элементов. Для решения одинаковых задач аналитическим и численным методами получено соответствие результатов.

Литература

1. *Щугорев В.Н.* Устойчивость и взаимодействие эллипсоидальных отслоений // Материалы XVIII международного симпозиума “Динамические и технологические проблемы механики сплошных сред” им. А.Г. Горшкова. М. МАИ 2012. С.188.

2. *Щугорев В.Н.* Трещиностойкость конструктивных элементов с расслоениями. «X Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики.» Избранные тезисы докладов. (Нижн. Новг. 24-30 августа 2011). Нижний новгород. Издательство Нижегородского государственного университета 2011. С.218-219

Именной указатель

- Абросимов Ю.А.*, 4
Аксенов А.В., 151
Аменицкий А.В., 6
Андрюшин С.Г., 7
Антуфьев Б.А., 9
Артёмьева А. А., 13
Астапов А.Н., 7, 10
Африди А.Р., 10
Баженов В.Г., 12, 13, 14, 16
Балафендиева И.С., 18
Балашова А.В., 145, 146
Баранова М.С., 12
Белашова И.С., 20
Белов А.А., 6
Белов Г.В., 21, 23, 24
Белосточный Г.Н., 149
Бережной Д.В., 18, 24
Березовский А.В., 158
Беспалова В.О., 27
Болдырев В.В., 28
Болтунова М.А., 73
Борисов М.В., 31
Бугаев Н.М., 33
Будник Г. Д., 34
Бухтояров И.И., 28, 36
Быков А.В., 38
Вайсфельд Н.Д., 40
Велданов В.А., 41, 42
Воробьев С.А., 44
Ву Ба Зуи, 45, 151, 152
Вышедкевич И.У., 34
Габиева А.Р., 46
Гаврюшин С.С., 48, 50, 52, 53
Галимов А.Ф., 4
Ганьши С.М., 48
Гарматий Г.Ю., 130
Гнездилов В.А., 54
Говоров А.А., 56
Голубева Т.Н., 57
Гончарук К.О., 59
Горохов В.А., 61
Горшков А.А., 20, 33
Горячева И.Г., 63
Горячко Т.В., 65
Грибков В.А., 67
Григорьев В.Г., 54
Гришанина Т.В., 68
Гурьянов С.А., 70
Гусаров А.П., 21, 23
Давыдов С.А., 72
Даурских А.Ю., 42
Дмитриев В.Г., 73, 75, 76
Дудик Д.Е., 42
Евтух Е.С., 78
Еранов А.П., 4
Еремина А.И., 7
Ермаков А.В., 79
Ершова А.Ю., 80
Жаворонок С.И., 75
Жамакочян К.А., 81
Жестков Б.Е., 10
Жестков М.Н., 12, 13
Зайкина Ж.В., 83
Захаров М.К., 27, 85
Земсков А.В., 72
Зиле А.З., 178
Зорин В.А., 36
Иванов В.А., 87
Игумнов Л.А., 6, 89, 90, 91
Ипатов А.А., 6
Капустин С.А., 61
Карамов А.В., 18
Карпов В.В., 92
Касаткин А.В., 7, 93
Касьянов К.Г., 200
Каюмов Р.А., 96, 97, 98
Кейли Белкасем, 40
Кибец А.И., 13, 87
Кибец Ю.И., 87
Кириллова Э.Р., 101
Коганов С.А., 102
Комичина А.В., 103
Кондрашев Г.В., 38
Коновалов А.В., 9
Коноплев Ю.Г., 106, 108, 109, 110
Коровайцева Е.А., 111
Королевич В.В., 112
Короткая О.В., 50
Котлов В.Л., 14
Коцур О.С., 115
Красковский Н.В., 31
Крупенин А.М., 116
Крутова К.А., 117
Крыжневич Г.Б., 119

- Крылов Н.В., 31
Кубенко В.Д., 121, 189
Кузнецов Е.Б., 123
Кузьмичева А.А., 125
Кузьмичева Т.В., 12, 13
Куликов Г.М., 127
Куреннов С.С., 129
Курников И.С., 54
Кушнир Р.М., 130
Кушнир Р.М., 133
Лалабеков В.И., 31, 135
Лебедев А.И., 72
Лебедева Е.А., 6
Леоненко Д.В., 137
Леонов С.С., 123
Лесневский Л.Н., 139
Линник Е.Ю., 14
Литвинчук С.Ю., 89, 90
Ломовской В.А., 20, 33, 111
Ляховецкий М.А., 139
Мазуренко А.В., 106
Макаревский Д.И., 34
Макарин М.А., 140
Максимов М.А., 42
Мангушева А.Р., 96
Марков В.А., 21, 23, 24, 41
Марков И.П., 89
Мартыросов М.И., 56, 80, 116, 142
Марчук М.В., 65, 133
Мейш В.Ф., 121, 189
Мейш Ю.А., 121, 189
Меньшиков А.А., 54
Миронова Л.И., 143
Митряйкин В.И., 106
Мокшин Е.В., 24
Морозов А.А., 28, 36
Морозов Р.В., 85
Москвитин Г.В., 75, 145, 146
Мотова Е.А., 147
Мустакимова Р.Ф., 108
Мухамедова И.З., 97
Мыльцина О.А., 149
Нагорных Е.В., 13
Неклюдова Г.А., 78
Нерубайло Б.В., 151, 152
Нестеров В.А., 153
Нетребко А.В., 155
Никитина Н.Е., 147, 156
Норьков Е.С., 119
Нуждин А.С., 52
Оболенский Ю.Г., 140
Овчинников А.Ф., 21, 23, 24
Овольцов И.И., 31
Огрызков С.Г., 158
Осетров Д.Л., 16
Осетров С.Л., 16
Осипов М.Н., 109, 160
Паймушин В.М., 133
Пакош В.С., 65
Парафесь С.Г., 38
Петров А.Н., 90
Плотникова С.В., 127
Помельникова А.С., 103, 162
Пономарев А.Т., 28, 36
Попов В.Г., 163
Попович В.С., 130
Пусев В.И., 21, 23, 24, 41
Пишеничнов С.Г., 155
Радин В.П., 83
Ратушко Я.Ю., 91
Ретин А.О., 10
Реут В.В., 40
Рожнин Н.Б., 31
Роффе А.И., 73
Роштин М.Н., 146
Русских С.В., 165
Савицкий Д.М., 166
Сакало В.И., 78
Салеева Г.Т., 108
Самсонович С.Л., 31, 135, 140
Сатко А.И., 53
Саркисян С.О., 81
Саченков А.А., 109
Саченков О.А., 101, 106, 108, 110
Секаева Л.Р., 18
Селиванов В.В., 21, 23, 24
Семенов А.А., 92
Семченко М.С., 85
Серазутдинов М.Н., 169
Сергичева Е.В., 142
Сибгатуллин Р.Г., 4
Сидоренко А.С., 34, 169
Соколов С.Л., 171
Сотский М.Ю., 21, 23, 41, 42, 173
Сотский Ю.М., 41
Стирин С.В., 117
Старовойтов Э.И., 174
Степанов В.С., 31
Судьин А.А., 73, 76
Султанов Л.У., 176
Талагаев А.В., 67
Тарадай Д.В., 178

- Таран А.В., 27, 85
Таран А.Л., 27, 85
Таран Ю.А., 27, 85
Тарасенко Л.В., 180, 184
Тарасенко Ю.П., 147
Тарасова А.А., 14
Тарасова А.Н., 187
Тарлаковский Д.В., 72, 121, 189
Теплова Л.А., 191, 195
Терентьева В.С., 7, 10, 93
Тисов В.А., 152
Титов В.И., 180
Тлеушинов М.К., 198, 199
Трутнева А.В., 191
Туркин И.К., 38
Тюрин В.Н., 139
Убайдуллоев М.Н., 169
Унчикова М.В., 184
Уткина А.Н., 180
Фахрутдинов Л.Р., 176
Филатов В.Н., 70
Фирстов Д.В., 24
Харсиламова Л. У., 101
Хасанов Р.Ф., 110
Храматов В.Е., 57
Чекмарев Д.Т., 117
Чекменев А.Н., 160
Чурилов Ю.А., 61
Чухлебов Р.В., 169
Щавловская О.Г., 137
Шакирзянов Ф.Р., 98
Шалькевич А.Б., 180
Шамим М.Р., 46
Шамсутдинова Н.Г., 101
Шклярчук Ф.Н., 68, 102, 200
Шошин Д.В., 87
Шуранова Ю.А., 178
Щеглов Г.А., 115
Щеглов Ю.Д., 160
Щугорев А.В., 83
Щугорев В.Н., 200
Яшина И.В., 110

Содержание

Предисловие	3
<i>Абросимов Ю.А., Галимов А.Ф., Еранов А.П., Сибгатуллин Р.Г.</i> Расчет термоупругопластического деформирования заготовки рабочего колеса центробежного компрессора.....	4
<i>Аменицкий А.В., Белов А.А., Игумнов Л.А., Ипатов А.А., Лебедева Е.А.</i> Численное моделирование динамики вязко- и пороупругих тел.....	6
<i>Андрюшин С.Г., Астапов А.Н., Еремина А.И., Касаткин А.В., Терентьева В.С.</i> Формирование жаростойких защитных покрытий.....	7
<i>Антуфьев Б.А., Коновалов А.В.</i> Упрощенная динамическая модель удлиненной тонкостенной конструкции с теплозащитным покрытием.....	9
<i>Астапов А.Н., Африди А.Р., Жестков Б.Е., Репин А.О., Терентьева В.С.</i> Выявление механизма разрушения покрытий системы SI-TiSi ₂ -MOSi ₂ -B-Y-SiC на укм в гиперзвуковых потоках плазмы.....	10
<i>Баженов В.Г., Баранова М.С., Жестков М.Н., Кузьмичева Т.В.</i> Математическая модель и численное решение задачи устойчивости густо перфорированной цилиндрической оболочки под действием внешнего давления.....	12
<i>Баженов В.Г., Кибец А.И., Артемьева А. А., Назорных Е.В., Жестков М.Н., Кузьмичева Т.В.</i> Численное исследование упругопластического деформирования и потери устойчивости оболочек вращения при комбинированных осесимметричных нагружениях.....	13
<i>Баженов В.Г., Котов В.Л., Линник Е.Ю., Тарасова А.А.</i> Анализ моделей и методов расчета движения тел вращения минимального сопротивления в грунтовых средах.....	14
<i>Баженов В.Г., Осетров С.Л., Осетров Д.Л.</i> Экспериментально-расчетный метод исследования процессов деформирования и разрушения упругопластических элементов конструкций при монотонных нагружениях.....	16
<i>Балафендиева И.С., Бережной Д.В., Карамов А.В., Секаева Л.Р.</i> Исследование деформирования элементов подземных сооружений с учетом их контактного взаимодействия с грунтом.....	18
<i>Белашова И.С., Горшков А.А., Ломовской В.А.</i> Влияние микрон неоднородности поверхности на контактную прочность металлических покрытий.....	20
<i>Белов Г.В., Гусаров А.П., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В., Сотский М.Ю.</i> О реализации теста тейлора при прямом и обратном ударе.....	21

<i>Белов Г.В., Гусаров А.П., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В., Сотский М.Ю.</i> О динамических механических свойствах сотовой конструкции из алюминиевого сплава на основе теста тейлора.....	23
<i>Белов Г.В., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В.</i> О механических и амортизирующих свойствах блоков внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов.....	24
<i>Бережной Д.В., Мокишин Е.В., Фирстов Д.В.</i> Исследование распространения микросейсм в сложной геологической среде.....	24
<i>Беспалова В.О., Захаров М.К., Таран А.В., Таран А.Л., Таран Ю.А.</i> Инженерные решения и расчёт процесса гранулирования кристаллизацией капель расплава в восходящем потоке с замкнутым по охлаждающему воздуху циклом и использованием гидродутья.....	27
<i>Болдырев В.Б., Бухтояров И.И., Морозов А.А., Пономарев А.Т.</i> К вопросу повышения эффективности функционирования амортизирующих посадочных систем парашютно-десантной техники.....	28
<i>Борисов М.В., Красковский Н.В., Крылов Н.В., Лалабеков В.И., Огольцов И.И., Рожнин Н.Б., Самсонович С.Л., Степанов В.С.</i> О выборе кинематической схемы электромеханического силового минипривода, проектируемого под сложную форму рулевого отсека бпла.....	31
<i>Бугаев Н.М., Горшиков А.А., Ломовской В.А.</i> Структурное обоснование гистерезисного механизма внутреннего трения в оксид-оксидных керамиках.....	33
<i>Будник Г. Д., Вышедкевич И.У., Макаревский Д.И., Сидоренко А.С.</i> Экспериментальное исследование динамического состояния авиационного изделия при случайной вибрации.....	34
<i>Бухтояров И.И., Зорин В.А., Морозов А.А., Пономарев А.Т.</i> О проблеме воздушного десантирования крупногабаритных моногрузов массой до 50 тонн.....	36
<i>Быков А.В., Кондрашев Г.В., Парафесь С.Г., Туркин И.К.</i> Стенд электромеханического моделирования аэродинамических сил для исследования аэроупругого поведения беспилотного летательного аппарата.....	38
<i>Вайсфельд Н.Д., Кебли Белкасем, Реут В.В.</i> Точное решение задачи о вынужденных колебаниях бесконечной упругой клиновидной плиты.....	40
<i>Велданов В.А., Марков В.А., Пусев В.И., Сотский М.Ю., Сотский Ю.М.</i> Определение динамических механических свойств бетона и подобных ему материалов с использованием электрической	

регистрации замедления недеформируемого ударника при его движении в бетонной мишени.....	41
<i>Велданов В.А., Сотский М.Ю., Максимов М.А., Даурских А.Ю., Дудик Д.Е.</i> Определение динамических характеристик горных пород и бетонных сред на основе высокоскоростной оптической регистрации движения ударника.....	42
<i>Воробьев С.А.</i> Динамическое деформирование цилиндрической сэндвич-оболочки при учете демпфирующих свойств материалов слов.....	44
<i>Ву Ба Зуи</i> Исследование напряженного состояния физически ортотропных цилиндрических оболочек при действии продольных нагрузок с различной изменяемостью.....	45
<i>Габитова А.Р., Шамим М.Р.</i> Конечно-элементный расчет изотропных, ортотропных и многослойных пластин и оболочек.....	46
<i>Гаврюшин С.С., Ганыш С.М.</i> Простейшая математическая модель пространственного стержня, выполненного из сплава с эффектом памяти формы.....	48
<i>Гаврюшин С.С., Короткая О.В.</i> Расчет камеры сгорания перспективного жрд на основе метода подконструкций.....	50
<i>Гаврюшин С.С., Нурждин А.С.</i> Численное моделирование процесса приварки патрубка на действующем магистральном трубопроводе.....	52
<i>Гаврюшин С.С., Сапко А.И.</i> Расчет упругого элемента весоизмерительного датчика мембранного типа.....	53
<i>Гнездилов В.А., Григорьев В.Г., Курников И.С., Меньшиков А.А.</i> Разработка эффективных методов и алгоритмов исследования устойчивости крупногабаритных пространственных конструкций.....	54
<i>Говоров А.А., Мартиросов М.И.</i> Оценка критерия возникновения флаттера рабочего колеса компрессора газотурбинного двигателя.....	56
<i>Голубева Т.Н., Хроматов В.Е.</i> Программное обеспечение для расчета спектров частот и форм колебаний пластин и оболочек в магнитных полях.....	57
<i>Гончарук К.О.</i> Применение натуральных масштабов при моделировании сплошных сред.....	59
<i>Горохов В.А., Капустин С.А., Чурилов Ю.А.</i> Моделирование мкэ коррозийного растрескивания конструкций на основе соотношений механики поврежденной среды.....	61
<i>Горячева И.Г.</i> Моделирование изнашивания неоднородных материалов с периодической структурой.....	63

<i>Горячко Т.В., Марчук М.В., Пакош В.С.</i> Свободные колебания композитных удлиненных цилиндрических панелей при геометрически нелинейном деформировании.....	65
<i>Грибков В.А., Талагаев А.В.</i> К проектированию амортизатора удара с эластомерными упруго-диссипативными элементами.....	67
<i>Гришанина Т.В., Шклярчук Ф.Н.</i> Аэродинамические характеристики тонкого деформируемого профиля крыла при дозвуковом и сверхзвуковом обтекании.....	68
<i>Гурьянов С.А., Филатов В.Н.</i> Граничная задача термоупругости для гибких пологих оболочек при учете поперечных сдвигов.....	70
<i>Давыдов С.А., Земсков А.В., Лебедев А.И., Тарлаковский Д.В.</i> Решение одномерной задачи упругой диффузии для двухкомпонентного полупространства.....	72
<i>Дмитриев В.Г., Болтунова М.А., Роффе А.И., Судьин А.А.</i> Особенности математического моделирования переходных процессов в железобетонных строительных конструкциях купольного икаркасного типа при сейсмических воздействиях.....	73
<i>Дмитриев В.Г., Жаворонок С.И., Москвитин Г.В.</i> Численно-экспериментальное моделирование нелинейного деформирования массивных слабосжимаемых тел при изменении геометрических и физических параметров.....	75
<i>Дмитриев В.Г., Салатов Е.К.</i> Особенности деформирования металлических изгибаемых конструкций, усиленных композитными элементами.....	76
<i>Евтух Е.С., Неклюдова Г.А. Сакало В.И.</i> Оценка влияния рельсовых стыков на накопление контактно-усталостных повреждений в колесах подвижного состава.....	78
<i>Ермаков А.В.</i> Исследование колебаний цилиндрической оболочки в пространственном потоке.....	79
<i>Ершова А.Ю., Мартиросов М.И.</i> Сравнительный анализ механических характеристик образцов из мелкозернистых композитов с различным содержанием связующего.....	80
<i>Жамакобян К.А., Саркисян С.О.</i> Расчет микрополярных упругих балок на колебания по методу конечного элемента.....	81
<i>Зайкина Ж.В., Радин В.П., Щугорев А.В.</i> О выборе расчетных схем при исследовании устойчивости неконсервативных систем.....	83
<i>Захаров М.К., Морозов Р.В., Семченко М.С., Таран А.В., Таран А.Л. Таран Ю.А.</i> Расчет динамики гранулообразования в процессах догранулирования расплавами, растворами, суспензиями и порошками.....	85

<i>Иванов В.А., Кибец А.И., Кибец Ю.И., Шошин Д.В.</i> Численное моделирование продольного удара о жесткую преграду цилиндра из пористого металла.....	87
<i>Игумнов Л.А., Литвинчук С.Ю., Марков И.П.</i> Применение метода граничных элементов для решения трехмерных задач равновесия анизотропной теории упругости с сопряженными полями.....	89
<i>Игумнов Л.А., Литвинчук С.Ю., Петров А.Н.</i> Гранично-элементное моделирование динамики слоистого пороупругого полупространства.....	90
<i>Игумнов Л.А., Ратаушко Я.Ю.</i> Метод гранично-временных элементов на основе шаговой схемы рунге-кутты.....	91
<i>Карпов В.В., Семенов А.А.</i> Прочность и устойчивость ортотропных оболочек.....	92
<i>Касаткин А.В., Терентьева В.С.</i> Разработка и исследование жаростойких самоорганизующихся покрытий типа me ₁ -me ₂ -si на особотугоплавких подложках.....	93
<i>Каюмов Р.А., Мангушева А.Р.</i> Оценка длительной прочности пленочно-тканевого композиционного материала с учетом изменения температурного поля в течение года.....	96
<i>Каюмов Р.А., Мухамедова И.З.</i> разработка методики оценки долговечности пленочно-тканевых материалов с учетом влияния силовых факторов и солнечной радиации.....	97
<i>Каюмов Р.А., Шакирзянов Ф.Р.</i> Оценка осадки и несущей способности гофрированной полиэтиленовой трубы в грунте.....	98
<i>Кириллова Э.Р., Саченков О.А., Харсиламова Л. У., Шамсутдинова Н.Г.</i> Экспериментальное исследование механических характеристик костей с дефицитом си.....	101
<i>Коганов С.А., Шклярчук Ф.Н.</i> Статическая аэроупругость прямого крыла при отклонении поверхностей управления по крену.....	102
<i>Комишина А.В., Помельникова А.С.</i> Расчет температуры на поверхности металла при магнитно-импульсной обработке.....	103
<i>Коноплев Ю.Г., Мазуренко А.В., Митряйкин В.И., Саченков О.А.</i> Экспериментальное исследование вывиха вертлужного компонента имплантата при дисплазии вертлужной впадин.....	106
<i>Коноплев Ю.Г., Мустакимова Р.Ф., Салеева Г.Т., Саченков О.А.</i> Моделирование челюсти при гипертонусе жевательных мышц.....	108
<i>Коноплев Ю.Г., Осипов М.Н., Саченков А.А.</i> Численно-экспериментальное исследование устойчивости цилиндрических оболочек эллиптического сечения с вырезом.....	109

<i>Коноплев Ю.Г., Саченков О.А., Хасанов Р.Ф., Яшина И.В.</i> Моделирование ротационной флекссионной остеотомии проксимального участка бедренной кости.....	110
<i>Коровайцева Е.А., Ломовской В.А.</i> Моделирование гистерезисного механизма внутреннего трения при различных воздействиях.....	111
<i>Королевич В.В.</i> Анализ резонансных осесимметричных колебаний полярно-ортоотропных дисков переменной толщины методом интегральных уравнений вольтерра 2-го рода.....	112
<i>Коцур О.С., Щеглов Г.А.</i> Анализ результатов экспериментального и численного моделирования колебаний маятника в жидкости.....	115
<i>Крупенин А.М., Мартиросов М.И.</i> Анализ поведения круговой слоистой пластины при ударе о жидкость.....	116
<i>Крутова К.А., Спирин С.В., Чекмарев Д.Т.</i> О параметрических семействах численных схем мкэ решения двумерных и трехмерных задач теории упругости.....	117
<i>Крыжевич Г.Б., Норьков Е.С.</i> Расчет сил гидродинамического сопротивления общей вибрации скоростного судна и гидросамолета, движущегося в режимах взлета и посадки.....	119
<i>Кубенко В.Д., Тарлаковский Д.В., Мейли В.Ф., Мейли Ю.А.</i> Численное моделирование процессов взаимодействия цилиндрических оболочек с грунтовыми средами при нестационарных нагрузках.....	121
<i>Кузнецов Е.Б., Леонов С.С.</i> Моделирование процесса ползучести и разрушения конструкций с учетом стадии упрочнения материала.....	123
<i>Кузьмичева А.А.</i> Исследование опыта внедрения принципов “всеобщего менеджмента качества” в высшем образовании.....	125
<i>Куликов Г.М., Плотникова С.В.</i> Решение пространственных задач термоупругости для многослойных композитных оболочек на основе метода отсчетных поверхностей.....	127
<i>Куреннов С.С.</i> Напряжения в клеевом соединении при мгновенно приложенной нагрузке.....	129
<i>Кушнир Р.М., Попович В.С., Гарматий Г.Ю.</i> Неустановившиеся температурные напряжения в термочувствительной двухслойной пластине.....	130
<i>Кушнир Р.М., Марчук М.В., Паймушин В.М.</i> Колебания прямоугольных трехслойных пластин симметричного строения по толщине при воздействии акустической нагрузки.....	133
<i>Лалабеков В.И., Самсонович С.Л.</i> Математическая модель расчёта объёма рабочей жидкости в газогидравлическом приводе с вытеснительным источником энергии.....	135

<i>Леоненко Д.В., Шавловская О.Г.</i> Постановка задачи об изгибе трехслойной цилиндрической оболочки в упругой среде.....	137
<i>Лесневский Л.Н., Ляховецкий М.А., Тюрин В.Н.</i> Износ - и фреттингостойкость элементов двигателей и энергоустановок летательных аппаратов.....	139
<i>Макарин М.А., Оболенский Ю.Г., Самсонович С.Л.</i> О построении кинематических схем боковых ручек управления самолетом.....	140
<i>Мартыросов М.И., Сертичева Е.В.</i> Исследование критериев разрушения элементов конструкций из полимерных композиционных материалов.....	142
<i>Миронова Л.И.</i> Особенности термонапряженного состояния сварной конструкции сосуда высокого давления.....	143
<i>Москвитин Г.В., Балашова А.В.</i> Численные исследования динамики стабилизаторов волновых процессов.....	145
<i>Москвитин Г.В., Роцин М.Н., Балашова А.В.</i> Численные исследования прочности и сейсмостойкости реактора ивв.10м.....	146
<i>Мотова Е.А., Никитина Н.Е., Тарасенко Ю.П.</i> Ультразвуковое исследование структурного состояния рабочих лопаток турбокомпрессора высокого давления.....	147
<i>Мыльцина О.А., Белосточный Г.Н.</i> Пологие оболочки и геометрически нерегулярные пластинки под действием быстропрямых по пространственным координатам температурных и силовых воздействий в зонах закрепления краев.....	149
<i>Нерубайло Б.В., Аксенов А.В., Ву Ба Зуи</i> Напряжения в многослойной анизотропной панели с отверстиями различной конфигурации.....	151
<i>Нерубайло Б.В., Ву Ба Зуи, Тисов В.А.</i> Напряженное состояние конических и конусоидальных -эллиптических и гиперболических - оболочек при локальной нормальной нагрузке.....	152
<i>Нестеров В.А.</i> Колебания податливой при трансверсальном сдвиге пластины с неклассическим защемлением контура.....	153
<i>Нетребко А.В., Пшеничных С.Г.</i> О влиянии наследственных свойств материала на нестационарные волновые процессы в цилиндрических оболочках.....	155
<i>Никитина Н.Е.</i> Влияние циклического нагружения конструкционного материала на его акустические и прочностные свойства.....	156
<i>Огрызков С.Г. (иеродиакон Роман), Березовский А.В.</i> Исследование влияния механических дефектов и усталостных трещин на прочностные характеристики несущих элементов больших русских колоколов.....	158

<i>Осипов М.Н., Чекменев А.Н., Щеглов Ю.Д.</i> Применение цифровой спекл-интерферометрии для измерения частотных характеристик механических конструкций.....	160
<i>Помельникова А.С.</i> Низкоэнергетическая обработка сталей и сплавов.....	162
<i>Попов В.Г.</i> Трещина в виде трехзвенной ломанной под действием волны продольного сдвига.....	163
<i>Русских С.В.</i> Исследование параметров движения твердого тела на двух упругих колесах по плоской кривой с учетом подвески.....	165
<i>Савицкий Д.М.</i> Изгиб трехслойного ступенчатого стержня в температурном поле.....	166
<i>Серазутдинов М.Н., Убайдуллоев М.Н.</i> Расчеты эффективности усиления напряженных элементов стержневых систем.....	169
<i>Сидоренко А.С., Чухлебов Р.В.</i> Расчетно-экспериментальное исследование вибрации конструкции авиационного изделия.....	169
<i>Соколов С.Л.</i> Моделирование зон повышенных деформаций изделий из резинокордных композитов.....	171
<i>Сотский М.Ю.</i> Опытные данные о замедлении испытывающих различную степень деформирования тел при их движении в исследуемой среде.....	173
<i>Старовойтов Э.И.</i> Деформирование упругих трехслойных цилиндрических оболочек в температурном поле.....	174
<i>Султанов Л.У., Фахрудинов Л.Р.</i> Методика исследования конечных деформаций гиперупругих тел.....	176
<i>Тарадай Д.В., Зиле А.З., Шуранова Ю.А.</i> Выявление источников возбуждения крутильных колебаний и оценка эквивалентных часов выработки ресурса.....	178
<i>Тарасенко Л.В., Титов В.И., Уткина А.Н., Шалькевич А.Б.</i> Выбор интервалов легирования высокоуглеродистой конструкционной стали.....	180
<i>Тарасенко Л.В., Унчикова М.В.</i> Влияние двойного старения на эксплуатационные свойства стали для силоизмерительных упругих элементов.....	184
<i>Тарасова А.Н.</i> Параметрические расчеты процессов массопереноса в неподвижном изотермическом адсорбционном слое.....	187
<i>Тарлаковский Д.В., Кубенко В.Д., Мейш В.Ф., Мейш Ю.А.</i> К решению задач о взаимодействии цилиндрических волн в грунтовых средах с жесткими преградами.....	189
<i>Теплова Л.А., Трутниева А.В.</i> Современный фондовый рынок и его влияние на развитие промышленности и технологий.....	191

<i>Теплова Л.А.</i> Основные виды и особенности развития отечественных корпораций.....	195
<i>Тлеулинов М.К.</i> Исследование геометрически нелинейного деформирования несущих и управляющих поверхностей.....	198
<i>Тлеулинов М.К.</i> О реакциях в узлах навески управляющих поверхностей.....	199
<i>Шклярчук Ф.Н.</i> Нелинейные пространственные колебания с большими перемещениями гибкой лопасти вращающегося несущего винта при нестационарном движении вертолета.....	200
<i>Щугорев В.Н., Касьянов К.Г.</i> Классификация и нелинейный анализ открытых и закрытых отслюений.....	200
Именной указатель.....	203

**МАТЕРИАЛЫ XX МЕЖДУНАРОДНОГО СИМПОЗИУМА
«ДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
МЕХАНИКИ КОНСТРУКЦИЙ И СПЛОШНЫХ СРЕД»**

им. А.Г. Горшкова

Ярополец, 17 – 21 февраля 2014 г.

Подписано в печать 25.01.2014 г.

Формат 60 × 84 1/16. Бум. офсетная. Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 12,75. Зак. № 644. Тираж 150 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета в ООО "ТР-принт"
127055, Москва. Приютский пер., д.3.