

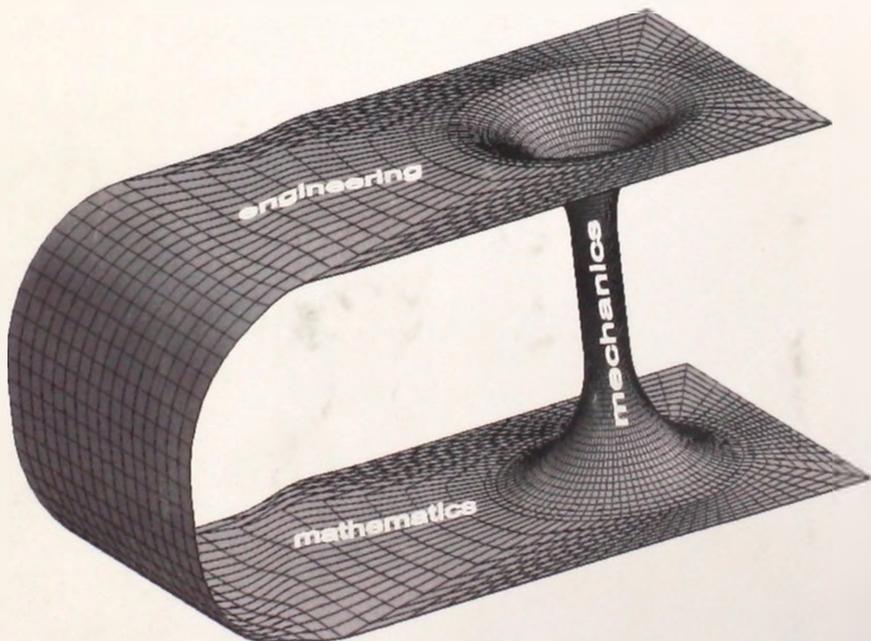
8

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

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

Посвящается 85-летию МАИ

Том 1



531
Д 466

Москва 2015

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

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

Вятичи, 16 – 20 февраля 2015 г.

Том 1

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

Vyatichi, 16 – 20 February 2015

Vol. 1

Москва 2015

© Материалы XXI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.1. – М.: ООО "ТРП", 2015. – 228 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)
Белашова И.С., д.т.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)
Окунев Ю.М., академик РАН (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)
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 15-08-20032 г).

ISBN 978-5-906099-81-5

© Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2015

Предисловие

XXI Международный симпозиум «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» проводится Московским авиационным институтом (национальным исследовательским университетом) – МАИ и Ассоциацией «Механика и технологии» при поддержке РФФИ на базе санатория «Вятичи» с 16 по 20 февраля 2015 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 Матвеев А.М., сопредседатель д.т.н., профессор Белашова И.С.).

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

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАТОРОВ НА РЕЛАКСАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИАМИДА 6 И ОРГАНОГЛИН

Айгубова А. Ч., Задорина Е. Н., Магомедов Г. М., Хаширова С. И.

(Махачкала, Москва, Нальчик)

Полимерные композиционные материалы с наноразмерными наполнителями – одни из наиболее перспективных неметаллических материалов для авиационно-космической техники.

Введение слоистых наноразмерных силикатов в полимеры позволяет реализовать комплекс ценных свойств, которые не могут быть достигнуты при введении в полимеры неорганических наполнителей с макро- или микроскопической структурой [1-3]. В частности, введение в полимерную матрицу органо-модифицированных слоистых наноразмерных силикатов приводит к изменению основных физико – механических свойств исходного полимера.

Разработка новых слоистосиликатных нанокomпозитов на основе полиамидов позволит расширить область их применения в качестве конструкционных материалов с повышенными физико-механическими свойствами (жесткость, прочность, деформационная теплостойкость, термоустойчивость) и значительно понизить их стоимость.

В качестве модификаторов нанонаполнителя использованы гуанидин содержащие соединения для обеспечения ионного обмена матрицы с межслоевыми неорганическими катионами монтмориллонита и повышения адгезии глины к неполярным молекулам полиамида. Известно, что гуанидин $(\text{H}_2\text{N})_2\text{C}=\text{NH}$ и его производные экологически безопасны и широко используются для получения биологически активных, термоустойчивых, огнестойких материалов.

Исследование динамических механических свойств нанокomпозитов на основе ПА-6 и органо-модифицированной глины проведено методом вынужденных изгибных резонансных колебаний [4], позволяющим определять динамический модуль упругости E' , скорость звука s и тангенс угла механических потерь в интервале температур от 290К до 570°К, в диапазоне частот 20-500Гц.

Для нанокomпозитов ПА6 с внедрением органо-модифицированной глины – акрилата и метакрилата гуанидина наблюдаются α , α' , λ релаксационные переходы. Известно, что α -переход связан с размораживанием сегментальной подвижности в аморфных областях полимерной матрицы при переходе из стеклообразного в высокоэластическое состояние. α' -переход, связывается нами с возникновением молекулярной подвижности в межфазных областях полимерной матрицы и нанонаполнителя, которое возникает вследствие адгезионного взаимодействия нанонаполнителя, органо-модификатора и полимерной матрицы, а также ограничением конформационного набора полимерных цепей вблизи твердой поверхности наноглины. Высокотемпературный λ -переход, по видимому,

можно отнести к релаксационным переходам в упорядоченных микрообластях на границе аморфной и кристаллических фаз ПА6 и началом плавления кристаллических областей.

Главный α -процесс релаксации для исходного ПА6 наблюдается при температуре 317К. Внедрение 3% органоглины с 10%АГ в матрицу ПА6 уменьшает механические потери во всей области температур. Интенсивность релаксационных процессов также уменьшается. α - процесс для нанокомпозитов наблюдается при температуре 317К, α' -максимум при 371К, а высокотемпературный λ -процесс вблизи 480К. Можно отметить, что органомодифицированные глины смещают λ -переход в область низких температур. Введение немодифицированной наноглины в ПА6 приводит к разрыхлению структуры матрицы нанокомпозита, о чем свидетельствует уменьшение плотности на 19% и значительное увеличение интенсивности α -процесса релаксации.

Для образцов нанокомпозитов, полученных введением в ПА6 , модифицированного метакрилатом гуанидина (МАГ) нанонаполнителя, характерно следующее поведение: введение органоглины с 10% МАГ уменьшает механические потери во всем интервале температур, интенсивность релаксационных переходов также уменьшается по сравнению с чистым ПА6; дальнейшее увеличение процентного содержания МАГ приводит к увеличению интенсивности релаксационных процессов и незначительному смещению их в область высоких температур.

Скорость звука в нанокомпозитах превосходит с в исходном ПА6 во всем интервале температур. Нанокомпозиты на основе наноглины с акрилатом гуанидина имеют скорость звука, превосходящую с ПА-6 на 25-30%. В трех областях релаксационных переходов α , α' , λ , скорость звука нанокомпозитов претерпевает скачки и им соответствуют интервалы температур: 293-303К; 356-382 К, 433-473К. В этих областях температур наблюдаются максимумы тангенса угла механических потерь. Заметное уменьшение скорости звука в области выше комнатных температур для всех образцов можно отнести к размораживанию сегментальной подвижности в аморфных областях ПА-6 и полимерных матриц нанокомпозитов на его основе.

Подводя итог, можно отметить существование ПА6 и нанокомпозитах на его основе трех α , α' , λ , процессов релаксации. Органомодификаторы монтмориллонита акрилат и метакрилат гуанидина оказывают влияние на релаксационные переходы нанокомпозитов. Более высокие скорости звука имеют нанокомпозиты при содержании 10% органомодификаторов.

Литература

1. Цурова А.Т., Бесланеева З.Л., Пахомов С.И., Шогенов В.Н., Жанситов А.А., Хаширова С.Ю. Физика-механические свойства новых слоистосиликатных

нанокомпозитов на основе полиамида-6 и гуанидинсодержащих органоглин – Материалы Международной научно-практической конференции-Нальчик-2014.

2. Alexander M., Dubois P. // Mater. Sci. - Eng. 2000 - V.28 -P. 1

3. Магомедов Г. М., Козлов Г. В. Синтез, структура и свойства сетчатых полимеров и нанокомпозитов на их основе – М.: Академия естествознания, 2010.

4. Магомедов Г. М. Практикум по физике полимеров и композитов – Махачкала, 1995. – 101с.

ОЦЕНКА КОМПРЕССИИ ТАЗОБЕДРЕННОГО СУСТАВА ПРИ РОТАЦИОННОЙ ОСТЕОТОМИИ ПРОКСИМАЛЬНОГО УЧАСТКА БЕДРЕННОЙ КОСТИ

Андреев П.С., Коноплев Ю.Г., Саченков О.А., Хасанов Р.Ф.

(Казань)

Метод лечения болезни Легга-Кальве-Пертеса 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. При ротации происходит перераспределение биомеханических нагрузок на основную группу мышц, меняется расположение крепления основных мышц, что приводит к изменению компрессии в суставе и изменению картины напряжения всего тазобедренного сустава в целом.

Были проведены исследования картины распределения усилий в мышцах при ротации, компрессии в суставе при различных тактиках остеотомии. 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.

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.

ДИНАМИКА ПЕРЕДНЕЙ КРОМКИ КРЫЛА САМОЛЕТА ПРИ ЧАСТИЧНОМ ПОВРЕЖДЕНИИ ТЕПЛОЗАЩИТНОГО СЛОЯ

Антуфьев Б.А., Коновалов А.В.

(Москва)

Неподвижную часть передней кромки крыла самолета моделируем половиной цилиндрической оболочки разрезанной вдоль оси. Нервюры крыла представляем абсолютно жесткими в своей плоскости пластинами, контактирующими с оболочкой по линиям кривизны в окружном направлении. На переднюю кромку крыла нанесено теплозащитное покрытие, которое в результате повреждения частично разрушено. Деформированное состояние оболочки описываем уравнениями, построенными на гипотезах технической теории. Защитное покрытие рассматриваем как инерционный слой, изменяющий только динамические характеристики конструкции. Его повреждение задаем с помощью функций Хевисайда. Задача сводится к системе двух дифференциальных уравнений в частных производных относительно прогиба оболочки и силовой функции, коэффициенты которой имеют разрывный характер. Для их решения используется метод Бубнова при аппроксимации прогибов оболочки в продольном направлении функциями учитывающими дискретность расположения нервюр. В поперечном направлении возможно рассмотрение как симметричных, так и антисимметричных форм деформирования оболочки. В конечном итоге задача сводится к системе дифференциальных уравнений второго порядка в обычных производных описывающих движение модели передней кромки крыла во времени. Рассмотрены примеры.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Астапов А.Н.

(Москва)

Проведен анализ научно-технической литературы в области составов, способов и технологических приемов формирования жаро- и эрозионностойких покрытий с рабочей температурой $\geq 1200^\circ\text{C}$ для тепловой и противокислительной защиты жаропрочных конструкционных материалов (сталей и никелевых сплавов). Результаты многочисленных исследований показали, что основными тенденциями совершенствования высокотемпературных покрытий являются:

– переход от однослойных к двух- и многослойным защитным покрытиям, в которых наряду с тепло- и жаростойкостью легче обеспечить требуемый

комплекс свойств (противоэрозионных, антикаталитических, износостойких, трибологических, специальных);

– создание диффузионных барьеров, поскольку основным механизмом истощения у жаростойких покрытий защитных свойств при высоких температурах являются диффузионные процессы между защищаемым сплавом, покрытием и окружающей средой.

Показано, что в связи со значительной стоимостью экспериментальных исследований и стендовых испытаний целесообразным является разработка и применение численно-аналитических методов проектирования или совершенствования структуры покрытий и прогнозирования их эксплуатационных свойств, особенно на ранних стадиях принятия конструкторских решений.

В настоящей работе покрытие будем рассматривать в составе единой с защищаемым материалом конструкционной стенки, представляющей собой многослойный пакет «жаропрочный материал – защитное покрытие». Многослойная модель позволяет варьировать набором требуемых свойств у конструкционной стенки за счет рационального выбора основного материала и изменения количества и состава наносимых слоев покрытий. Ввиду того, что ресурс работы конструкционной стенки при удовлетворительной жаростойкости определяется характеристиками ее усталостной и термоусталостной прочности (при работе в диапазоне температур, допустимых с точки зрения жаропрочности подложки), за основные критерии совершенствования архитектуры и компонентного состава многослойных покрытий были приняты – снижение уровня напряжений в структуре стенки и создание сжимающих напряжений в ее поверхностных слоях. Прогнозирование характера изменения величины упругих напряжений в слоях для выбранной архитектуры покрытия в процессе высокотемпературной эксплуатации открывает широкие возможности обоснованной корректировки геометрических параметров покрытия (толщина и количество слоев) и материалов отдельных его слоев (с учетом их механических и теплофизических характеристик).

Анализ работ в области математического моделирования многослойных систем позволил выделить два основных направления. Это модели, описывающие диффузионные процессы в конструкционной стенке, и модели, позволяющие определить напряженно-деформированное состояние рассматриваемой композиции.

Диффузионные модели используются достаточно широко для прогнозирования изменения структурно-фазового состояния системы «подложка – покрытие», особенно в условиях длительной высокотемпературной эксплуатации. Результаты моделирования позволяют выбирать рациональную структуру многослойного покрытия с позиции снижения взаимной диффузии элементов через поверхность раздела «подложка – покрытие» и, таким образом, замедлять нега-

тивные структурно-морфологические перерождения, приводящие к снижению (или даже к потере) эксплуатационных свойств всей системы. Однако на основе определяющих соотношений диффузионных моделей не представляется возможным получение напряженно-деформированного состояния конструкционной стенки, необходимого для качественной и количественной оценки возможности нарушения ее целостности (растрескивание покрытия, волнообразования с отслоением и т.д.).

Исходя из выше сказанного, в настоящей работе была поставлена цель, направленная на развитие математических моделей и методик, оценивающих уровень и локализацию термомеханических напряжений, возникающих в системе «подложка – покрытие» в процессе высокотемпературной эксплуатации. Для достижения цели был выделен ряд научно-прикладных задач, требующих последовательного решения. Среди них можно выделить следующие:

- разработка и реализация методики численно-аналитического исследования напряженно-деформированного состояния многослойных систем в приближенной постановке задачи – на основе решения односвязной задачи стационарной термоупругости с учетом влияния поля температур на напряженно-деформированное состояние через температурные коэффициенты линейного расширения слоев;

- разработка и реализация методики численно-аналитического исследования напряженно-деформированного состояния многослойных систем на основе решения связанных задач термоупругости и стационарной теплопроводности с учетом температурной зависимости механических и теплофизических свойств материалов слоев от температуры;

- получение предварительных оценок напряженно-деформированного состояния конструкционной стенки при высокотемпературном воздействии для конкретных вариантов высокотемпературных покрытий;

- численное моделирование адгезионного/когезионного разрушения многослойного покрытия с использованием технологий когезивных элементов/поверхностей и/или технологии XFEM;

- разработка и реализация методики численного исследования напряженно-деформированного состояния многослойных систем в точной постановке задачи – на основе решения связанных задач термоупругости и нестационарной теплопроводности методом конечных элементов с учетом возможного адгезионного/когезионного разрушения покрытия в процессе эксплуатации;

- получение уточненных оценок напряженно-деформированного состояния конструкционной стенки при высокотемпературном воздействии для конкретных вариантов высокотемпературных покрытий;

– обобщение результатов и создание методики совершенствования архитектуры и компонентного состава покрытий для конкретных жаропрочных материалов и условий их эксплуатации.

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-а).

ГЕОМЕТРИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫЕ И ЛИНЕАРИЗОВАННЫЕ ЗАДАЧИ О СМЕШАННЫХ ФОРМАХ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН ПРИ ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОМ ИЗГИБЕ

Бадриев И.Б., Макаров М.В., Паймушин В.Н.

(Казань)

Рассматриваются одномерные геометрически нелинейная и линеаризованная задачи о смешанных формах потери устойчивости (ФПУ) внешних слоев трехслойной пластины с трансверсально-мягким наполнителем, находящейся в условиях торцевого сжатия силой, приложенной к одному из внешних слоев. При таком нагружении пластина оказывается в условиях продольно-поперечного изгиба, одной из причин её разрушения является реализация исследуемых ФПУ [1]. В уточненной постановке [2, 3] задача о геометрически нелинейном деформировании пластины описывается системой пяти обыкновенных дифференциальных уравнений относительно поперечных касательных напряжений в наполнителе, постоянных по его толщине, неизвестных осевых перемещений и прогибов несущих слоев. Предполагаем, что края несущих слоев шарнирно оперты на абсолютно жесткие в поперечном направлении диафрагмы.

Для решения геометрически нелинейной задачи предварительно с помощью метода сумматорных тождеств [4] построена разностная схема. Для ее решения используется предложенный в [5] двухслойный итерационный процесс с опусканием нелинейности на нижний слой. Указанный алгоритм позволяет определить исследуемые поля напряжений, деформаций и перемещений только в возможных устойчивых положениях равновесия.

Для поиска неустойчивых положений равновесия нужно отыскивать точки бифуркации нелинейных решений, что приводит к необходимости поиска приближенных, упрощенных путей исследования поведения пластины под действием приложенной к ней нагрузки.

Следует отметить, что при табулировании по торцевой осевой нагрузке, участвующей в динамическом граничном условии, итерационный процесс перестаёт сходиться в окрестности некоторого значения (бифуркационного) нагрузки. Поэтому указанное граничное условие, соответствующее силовому нагружению пластины, заменяется кинематическим граничным условием, когда пара-

метром нагружения является заданное значение перемещения точек торцевых сечений соответствующего несущего слоя.

В данной работе центральное место занимает определение критических точек бифуркации и соответствующих критических нагрузок. Точки бифуркации определяются как точки ветвления решений исходной системы нелинейных уравнений. Указанные точки можно найти путем линеаризации уравнений в окрестности решения нелинейной задачи и последовательном построении решения квадратичной задачи на собственные значения, в том числе при таком значении торцевой осевой нагрузки, при котором происходит расходимость итерационного процесса.

Основная идея определения точки бифуркации с помощью однородных линеаризованных уравнений состоит в следующем. Предположим, что одна какая-то форма равновесия системы известна (в действительности такая форма была найдена в работе [5]), и нужно найти точку бифуркации этой формы равновесия. Для этого достаточно, не интересуясь поведением системы вдали от известной формы равновесия, найти условия существования другой формы, отличной от исходной, но бесконечно к ней близкой (т.е. найти точку, в окрестности которой существует такая форма равновесия, и будет точкой бифуркации). При этом возникает нелинейная (квадратичная) задача на собственные значения относительно значения торцевой нагрузки.

В среде Matlab для численной реализации итерационного метода был разработан комплекс программ. Для модельной задачи проведены численные эксперименты. Итерационный параметр подбирался эмпирически. Вычисления проводились до тех пор, пока норма невязки оставалась больше заданной точности. Путем табуляции по кинематической нагрузке отслеживалось поведение нагрузки и прогибов в центральной части первого несущего слоя.

Для решения полиномиальной задачи на собственные значения, в нашем случае - квадратичной, были использованы стандартные средства Matlab, в частности, встроенная функция `polyeig`. Также было проанализировано поведение собственного значения при различных значениях нагрузки. Установлено, что в результате решения геометрически-нелинейной задачи (табулируя по кинематической нагрузке) и линеаризованной задачи в окрестности решения нелинейной задачи (квадратичная задача на собственные значения), получаются практически равные значения нагрузки в точке бифуркации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 15-01-05686, 15-08-06018) и Российского научного фонда (проект 14-19-00667).

Литература

1. *Паймушин В.Н.* Теория устойчивости трехслойных пластин и оболочек (этапы развития, современное состояние и направления дальнейших исследова-

ний) // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2001. – № 2. – С. 148–162.

2. *Paimushin V.N.* Nonlinear theory of the central bending of three-layer shells with defects in the form of sections of bonding failure // Soviet Applied Mechanics. – 1987. – V. 23, Is. 11. – P. 1038-1043.

3. *Paimushin V.N.*, Bobrov S.N. Refined geometric nonlinear theory of sandwich shells with a transversely soft core of medium thickness for investigation of mixed buckling forms // Mechanics of composite materials. – 2000. – V. 36, № 1. – P. 59–66.

4. Карчевский М.М., Ляшко А.Д. Разностные схемы для нелинейных задач математической физики. – Казань: Изд-во Казанского университета, 1976. – 156 с.

5. *Бадриев И.Б.*, Желтухин В.С., *Макаров М.В.*, *Паймушин В.Н.* Численное решение задачи о равновесии трехслойной пластины с трансверсально-мягким наполнителем в геометрически нелинейной постановке // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т.17, № 23. – С. 393–396.

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ БОЛЬШИХ ФОРМОИЗМЕНЕНИЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЖЕСТКОЙ ОБОЙМОЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСА ПЕРЕГРУЗКИ

Баженов В.Г., Варавин Д.А., Кибец А.И., Рябов А.А., Романов В.И.

(Нижний Новгород, Саров Нижегородской области)

Рассматривается задача осевого импульсного нагружения свинцовой сферической оболочки ($h/R=0,054$), заключенной в алюминиевый скафандр. Скафандр нагружается взрывным устройством [1], состоящим из взрывчатого вещества (ВВ), пластины–ударника и демпфера, трансформирующего воздействие взрыва в трапециевидный импульс перегрузки с заданными параметрами: время нарастания перегрузки $\tau_{\text{фр}}=0,01\text{мс}$, длительность стационарной фазы $\tau_{\text{стан}}=0,3\text{мс}$, время спада перегрузки $\tau_{\text{сп}}=0,9\text{мс}$, максимальное значение перегрузки $10^4 g$ ($g=9,8\text{м/с}^2$ – ускорение свободного падения).

Динамическое деформирование оболочки описывается в переменных Лагранжа [2,3]. Уравнение движения выводится из вариационного принципа Журдена. Кинематические соотношения определяются в метрике текущего состояния. Упругопластическое деформирование конструкционных материалов описывается соотношениями теории течения с кинематическим и изотропным упрочнением. Контактное взаимодействие свинцовой оболочки и скафандра моделируется условиями непроникания по нормали и скольжения в касательной плоскости с учетом трения.

Численное решение задачи основано на моментной схеме метода конечных элементов с применением явной конечно-разностной схемы интегрирования по времени типа «крест» [2,3]. Для пространственной дискретизации конструкции применяются изопараметрические конечные элементы сплошной среды с полилинейной аппроксимацией скорости перемещений. Для конечно-элементного моделирования контакта сферической оболочки и скафандра на несогласованных сетках применяется алгоритм [4].

Конечно-элементными расчетами установлено, что до уровня перегрузки $n_{кр} \sim 4550g$ исследуемая оболочка сохраняет устойчивость. С ростом перегрузки до $n=7000g$ в течение 1,5...2,5 мс в оболочке развиваются пластические деформации и в ее верхней части образуется кольцевая складка. В зоне перегиба на внутренней поверхности оболочки интенсивность полных деформаций заметно превышает относительное удлинение материала $\delta=50\%$, но прочность оболочки сохраняется, так как рост растягивающих деформаций происходит в условиях трехосного сжатия, препятствующего развитию микродефектов.

Анализ остаточных деформаций оболочки показывает, что в результате интенсивного инерционного нагружения меняется не только форма оболочки, но и ее толщина. Диаметр оболочки в направлении перегрузки уменьшается, примерно, в 2 раза. Обнаружено существенное влияние внутреннего давления на формоизменение оболочки и устойчивость к действию импульса перегрузки. Для анализа влияния скорости деформаций на выпучивание оболочки экспериментально-расчетным методом построены диаграммы деформирования свинца в диапазоне от 100 с^{-1} до 1200 с^{-1} . Выявлена существенная зависимость деформационных характеристик свинца от скорости нагружения. Результаты численного решения задачи без учета этой зависимости становятся нефизичными. По расчетным данным скорость деформации в различных зонах оболочки в процессе ее выпучивания изменяется в диапазоне от 60 с^{-1} в верхнем полюсе оболочки до 1200 с^{-1} в зоне перегиба. Как показал конечно-элементный анализ деформируемость скафандра не влияет на формоизменение оболочки. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными [5] как по остаточной форме, так и деформациям.

Исследования проведены при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы». Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57514X0026, RFMEFI57814X0036.

Литература

1. Новиков С.А., Сеницын В.А., Погорелов А.П. Расчет взрывного нагружающего устройства для создания импульса давления заданных параметров. //Физика горения и взрыва. – 1980. – №6 – С.111-113.

2. *Баженов В.Г., Артемьева А.А., Гоник Е.Г., Кибец А.И., Шошин Д.В., Федорова Т.Г.* Конечно-элементное моделирование упругопластического выпучивания незамкнутых сферических оболочек при сжатии//Проблемы прочности и пластичности. Межвуз. сб. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. - 2012. - Вып. 74. С. 84-91.

3. *Баженов В.Г., Гоник Е.Г., Кибец А.И., Шошин Д.В.* Устойчивость и предельные состояния упругопластических сферических оболочек при статических и динамических нагружениях//Прикладная механика и техническая физика. 2014. Т.55, №1. С.13-22.

4. *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.

5. *Иванов И.Г., Новиков С.А.* Деформирование сферических свинцовых оболочек при действии интенсивных механических перегрузок. // Прочность материалов при динамическом нагружении. Сборник научных трудов под ред. С.А. Новикова. Саров. 2003.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ФОРМ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЛ, ПРОНИКАЮЩИХ В ГРУНТОВЫЕ СРЕДЫ

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

(Нижний Новгород)

Исследование процессов взаимодействия жестких тел с потоком сопротивляющейся среды представляет сложную проблему [1], для эффективного решения которой совместно применяются экспериментальные и теоретические методы [2]. Ранее на базе точных решений для описания волнового сопротивления и результатов аэродинамических испытаний построены оптимальные формы, включающие как тела вращения, так и пространственные конфигурации со звездообразным миделем [3]. Известные численно-аналитические методы определения контактных сил и глубин проникания ударников в плотные, в том числе грунтовые среды, в основном базируются на гипотезе локального взаимодействия. Модели локального взаимодействия (МЛВ) активно используются при исследовании движения тел в грунтовых средах и поиске оптимальных форм проникающих тел. Показано наличие множества пространственных конфигураций одинакового минимального сопротивления, соответствующего абсолютно оптимальному телу (АОТ). Двигающиеся в грунтовых средах АОТ могут иметь звездообразное или иное поперечное сечение, частным случаем таких тел является круговой конус. Применимость МЛВ для определения силы сопротивления внедрению в мягкий грунт острых конических тел показана экспериментально и

теоретически [4]. В то же время, в экспериментах по прониканию в глинистый и песчаный грунты преимущество звездообразных тел перед коническими экспериментально не обнаружено. Также известно, что при длине, меньшей длины абсолютно оптимального конуса, оптимальные тела вращения могут содержать передний торец. С увеличением радиуса торца растет и ошибка МЛВ, что оказывает влияние на силовые характеристики и форму оптимальных затупленных тел [5]. Таким образом, в отличие от газовой динамики [3], построение осесимметричных форм минимального сопротивления внедрению и максимальной глубины проникания в пластические грунтовые среды требует дополнительной проработки.

В данной работе приведены результаты исследования и сравнительного анализа форм осесимметричных тел минимального сопротивления внедрению и максимальной глубины проникания в пластические грунтовые среды. Оптимальные формы тел вращения заданной длины и радиуса поперечного сечения с кусочно-линейным представлением образующей получены в рамках одной из модификаций метода локальных вариаций. Применены двучленные квадратичные модели локального взаимодействия, включающие инерционное и прочностное слагаемые с кулоновским и/или постоянным трением. Проанализировано различие сил сопротивления и глубин внедрения конусов и полученных оптимальных осесимметричных форм заданной длины и миделя поперечного сечения при различных начальных скоростях удара. Отмечено сближение образующих с увеличением скорости и существенное различие форм лишь при значениях скоростей, близких к критическим, когда тело заданной длины и миделя поперечного сечения совпадает с абсолютно оптимальным конусом. Получены аналитические и численные оценки, свидетельствующие о невысоком отличии глубины проникания затупленного тела минимального сопротивления внедрению от максимальной глубины проникания.

Работа выполнена при финансировании в рамках программы Президента Российской Федерации для государственной поддержки коллективов ведущих научных школ России (НШ-593.2014.8) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 14-08-01129-а, 14-01-31113-мод_а, 13-08-00531-а).

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. Ведерников Ю.А., Щепановский В.А. Оптимизация реогазодинамических систем. - Новосибирск: Наука, 1995. – 238 с.

4. *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.

5. *Баженов В.Г., Котов В.Л., Линник Е.Ю., Тарасова А.А.* Анализ моделей и методов расчета движения тел вращения минимального сопротивления в грунтовых средах // Материалы XX Международного симпозиума “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” им. А.Г. Горшкова. Т. 1. М.: ООО «ТР-принт». 2014. С. 14-16.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРОИТЕЛЬСТВА ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ В ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНОМ ГРУНТЕ

Балафендиева И.С., 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.

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. Дискре-

тизация 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.

ПЛОСКИЕ И ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОНТАКТНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ УПРУГИХ ТЕЛ С ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ

Белашова И.С., Бобылёв А.А.

(Москва, Днепропетровск)

Повышение износостойкости инструментов и деталей машин, работающих в жестких условиях высоких контактных нагрузок, всё больше связывают с модифицированием их поверхности. Технологии поверхностного упрочнения позволяют получать модифицированные слои различного состава, с заданной структурой и новыми свойствами. Перспективным направлением является со-

здание так называемых функционально-градиентных покрытий, представляющих собой гетерогенные структуры с непрерывным изменением фазового состава. Это, в свою очередь, приводит к непрерывному изменению по глубине физико-механических и эксплуатационных характеристик. Малая толщина покрытия (менее одного микрометра) требует разработки специальных методов моделирования контактного взаимодействия.

В настоящей работе рассмотрены плоские и осесимметричные задачи об одностороннем контакте жесткого штампа и упругого тела конечных размеров с функционально-градиентным покрытием. Отметим, что задачи с условиями одностороннего контакта являются нелинейными граничными задачами.

Для решения задач использован вариационный подход. Особенность известных вариационных формулировок задач о контактом взаимодействии упругого тела со штампом [1] состоит в том, что предполагаются заданными не только форма жесткого штампа, но и его конечное положение, т. е. задается глубина внедрения штампа в упругое тело, а усилие вдавливания определяется в процессе решения контактной задачи. Во многих практических задачах, наоборот, известно усилие вдавливания, а глубина внедрения подлежит определению. В этом случае при помощи итерационных алгоритмов решение задачи можно свести к решению последовательности контактных задач с заданной глубиной внедрения штампа. Однако такой подход существенно увеличивает вычислительные затраты на решение задачи, особенно при контактом взаимодействии упругого тела с системой жестких штампов.

В настоящей работе получены вариационные формулировки задач о вдавливании в неоднородное упругое тело жесткого штампа заданным усилием. Дискретизация задач производилась на основе метода конечных элементов. В результате получены задачи квадратичного программирования с нелинейными ограничениями в виде равенств и неравенств. Для решения этих задач разработан вычислительный алгоритм на основе метода сопряженных градиентов с использованием линейного преобразования переменных.

Получены численные решения контактных задач в плоской и осесимметричной постановках. Исследовано влияние закона изменения механических свойств функционально-градиентного покрытия с глубиной на напряженно-деформированное состояние контактирующих упругих тел. В частности, установлено, что наличие функционально-градиентного покрытия, модуль Юнга которого превышает модуль Юнга основного материала, приводит к повышению максимальных значений контактного давления и уменьшению осадки штампа.

Проведенные расчеты показали, что при внедрении жесткого штампа вблизи интерфейса покрытия и основного материала упругого тела возникают области растягивающих напряжений, в которых могут инициироваться микротрещины, приводящие к разрушению покрытия. Это явление требует дальнейшего изуче-

ния с использованием экспериментальных данных о законах изменения механических свойств покрытий по глубине для различных технологий поверхностного упрочнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №13-01-00728).

Литература

1. Кравчук А. С. Вариационные и квазивариационные неравенства в механике. – М.: МГАПИ, 1997. – 340 с.

О ДЕФОРМИРОВАНИИ БЛОКОВ ВНУТРЕННЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НОСОВЫХ ОТСЕКОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

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

(Москва)

В известных методах механических испытаний блоков внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов (ЛА) при статических и динамических нагрузках не предусмотрены испытания, при которых конструкция блоков доводится до пластических деформаций и уплотнения [1-3]. Представлены результаты испытаний блоков внутреннего оборудования носовых отсеков ЛА на сжатие при пластических деформациях и уплотнении. Полученные диаграммы деформирования блоков позволяют оценить не только их механические свойства, но и амортизирующие характеристики.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08-007869-а).

Литература

1. Ленк А., Ренитц Ю. Механические испытания приборов и аппаратов. М.: Мир, 1976. 270с.

2. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г.С. Батуев, Ю.В. Голубков, А.А. Федосов. М.: Машиностроение, 1977. 240с.

3. Кузьмин Э.Н. Обеспечение виброударостойкости оборудования и аппаратуры: монография. 2-е изд., испр. и доп. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2006. 320 с.

О ДИНАМИЧЕСКИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ ВЫСОКОПОРИСТЫХ СОТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

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

(Москва)

Представлены результаты испытаний цилиндрических образцов сотовых конструкций из алюминиевых сплавов В95, АМг и Д1 посредством удара о жесткую стенку (тест Тейлора – Taylor Cylinder Test) со скоростями удара до 150 м/с на основе высокоскоростной оптической съемки при прямом и обращенном ударе и пьезоэлектрической акселерометрии при обращенном ударе, что позволило получить кинограммы замедления (ускорения) образцов и непрерывную регистрацию ускорения свободного торца образцов сотовых конструкций. Путем численного моделирования с применением пакета прикладных программ LS-DYNA решалась задача моделирования теста Тейлора при прямом (геометрическом) способе задания пористости для случая как прямого, так и обращенного удара. Эквивалентная гомогенная модель физико-механического поведения высокопористой сотовой конструкции была получена путем численного моделирования сжатия и уплотнения образца при одноосном напряженном состоянии. Квазистатические диаграммы деформирования были получены при средней скорости деформации 50 1/с, а динамические диаграммы при средней скорости деформации 2000 1/с. Наилучшее количественное совпадение численных результатов с экспериментальными данными получено для наибольших значений пористости образцов сотовых конструкций, что можно объяснить недостаточной точностью аппроксимации деформационного упрочнения в пластической стадии расчетной диаграммы деформирования и уплотнения образцов высокопористых сотовых конструкций. В результате численного моделирования и на основе экспериментальных данных получены параметры динамических механических свойств сотовых конструкций из алюминиевых сплавов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08-007869-а).

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ БЛОКОВ ВНУТРЕННЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НОСОВЫХ ОТСЕКОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Белов Г.В., Гусаров А.П., Марков В.А., Обчинников А.Ф., Пусев В.И.,
Селиванов В.В.*

(Москва)

Известно [1], что радиоэлектронная аппаратура (РЭА) делится по видам на стационарную (размещается в зданиях и сооружениях), возимую (размещается на автомобилях, железнодорожном, речном и морском транспорте) и бортовую (размещается на самолетах, космических аппаратах и ракетах). Бортовая РЭА по своим компоновочным характеристикам (средняя плотность и степень заполнения блока РЭА узлами и деталями) существенно отличается в большую сторону от других видов РЭА. В работе проведен анализ конструкций блоков внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов, включающий определение габаритно-массовых характеристик блоков, приближенный анализ материалов блоков и экспериментальное определение пористости блоков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08-007869-а).

Литература

1. Варламов Р.Г. Компоновка радиоэлектронной аппаратуры. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Сов. Радио, 1975. 351 с.

ДИНАМИКА ПОЛОГОЙ ОБОЛОЧКИ ПОСТОЯННОГО КРУЧЕНИЯ В УСЛОВИЯХ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОБМЕНА ЧЕРЕЗ ОСНОВНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ ПРИ БЫСТРОПЕРЕМЕННЫХ ПО ВРЕМЕННОЙ КООРДИНАТЕ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Белосточный Г.Н., Мыльцина О.А.

(Саратов)

В рамках модели типа Лява рассматривается пологая оболочка постоянного кручения, перекрывающая в плоскости x_1Ox_2 прямоугольный план. Оболочка находится в конвективном теплообмене через основные поверхности с окружающей средой. В некоторый момент времени t_1 внешняя поверхность испытывает воздействие сосредоточенной силы, которое продолжается до момента времени t_2 и на этом же временном интервале $|t_2 - t_1| \ll 1$ происходит «скачкообразное» изменение температуры окружающей среды, что приводит к значитель-

ному перепаду температуры по толщине термоупругой системы на указанном временном отрезке.

Решение термодинамической задачи сводится к интегрированию системы дифференциальных уравнений

$$L_1(u, v, w) = 0; \quad L_2(u, v, w) = 0;$$

$$\begin{aligned} \nabla^2 \nabla^2 w + \frac{\gamma h}{gD} w_{,tt} + 2 \frac{B}{D} (1-\nu) k_{12}^2 w - \frac{B}{D} (1-\nu) k_{12} (v_{,1} + u_{,2}) = \\ = \frac{q_0}{D} a_1 b_1 \delta(x-x_1) \delta(y-y_1) [H(t-t_1) - H(t-t_2)] - \frac{1+\nu}{h} \alpha \nabla^2 \theta_1, \end{aligned}$$

где L_l ($l=1,2$) – известные дифференциальные операторы теории пологих оболочек постоянного кручения, $\theta_1(x, y, t)$ – температурная функция /1/, удовлетворяющая уравнению

$$\frac{1}{\beta} \theta_{1,t} - \nabla^2 \theta_1 + \left(6 \frac{\kappa}{\lambda h} + \frac{12}{h^2} \right) \theta_1 = 6 \frac{\kappa}{\lambda h} \left(T_0^+ + T_1^+ [H(t-t_1) - H(t-t_2)] - T^- \right)$$

и, при однородных краевых условиях, имеет вид

$$\begin{aligned} \theta_1(x, y, t) = \sum_{k,m} \left\langle \Delta T_{km} \left(1 - 6 \frac{\kappa a}{\lambda h s_{km}} \frac{1}{s_{km}} \right) e^{-\frac{\beta}{a^2} s_{km} t} + 6 \frac{\kappa a}{\lambda h s_{km}} \frac{\Delta T_{km}}{s_{km}} + 6 \frac{\kappa a}{\lambda h s_{km}} \frac{e_{km}}{s_{km}} T_{km} \right. \\ \left. \cdot \left(1 - e^{-\frac{\beta}{a^2} s_{km} (t-t_1)} \right) H(t-t_1) - \left(1 - e^{-\frac{\beta}{a^2} s_{km} (t-t_2)} \right) H(t-t_2) \right\rangle \sin \frac{k\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b}. \end{aligned}$$

Здесь $H(t-t_l)$ функции Хевисайда, неопределенные, но ограниченные в точках t_l , ($l=1,2$) на временной оси, T_1^+ – величина температурного скачка, T_0^+ , T^- – температуры сред с внешней и внутренней поверхностей оболочки.

Компоненты поля перемещений термоупругой системы при краевых условиях

$$x=0, \quad x=a \quad U=0, \quad T_{12}=0, \quad W=0, \quad M_{11}=0;$$

$$y=0, \quad y=b \quad V=0, \quad T_{12}=0, \quad W=0, \quad M_{22}=0;$$

задаются в виде сумм двойных тригонометрических рядов с переменными, по временной координате, коэффициентами

$$U(x, y, t) = \sum_{km} u_{km}(t) \sin \frac{k\pi x}{a} \cos \frac{m\pi y}{b}, \quad V(x, y, t) = \sum_{km} v_{km}(t) \cos \frac{k\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b},$$

$$W(x, y, t) = \sum_{km} w_{km}(t) \sin \frac{k\pi x}{a} \sin \frac{m\pi y}{b}.$$

Решение, после ряда стандартных процедур метода двойных тригонометрических рядов, с помощью подстановок

$$\begin{aligned}
 u_{km}(t) &= (1-\nu)k_{12}a \frac{m\pi a}{b} \left\langle \left(v(k\pi)^2 - \left(\frac{m\pi a}{b} \right)^2 \right) - \frac{\gamma ha^2}{gB} \frac{d^2}{dt^2} \right\rangle \Phi_{km}(t), \\
 v_{km}(t) &= -(1-\nu)k_{12}a k\pi \left\langle \left((k\pi)^2 - v \left(\frac{m\pi a}{b} \right)^2 \right) + \frac{\gamma ha^2}{gB} \frac{d^2}{dt^2} \right\rangle \Phi_{km}(t), \\
 w_{km}(t) &= \left\langle \left(\frac{\gamma ha^2}{gB} \right)^2 \frac{d^4}{dt^4} + \frac{3-\nu}{2} \left((k\pi)^2 + \left(\frac{m\pi a}{b} \right)^2 \right) \frac{\gamma ha^2}{gB} \frac{d^2}{dt^2} + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1-\nu}{2} \left((k\pi)^2 + \left(\frac{m\pi a}{b} \right)^2 \right)^2 \right\rangle \Phi_{km}(t),
 \end{aligned}$$

сводится к интегрированию обыкновенных неоднородных дифференциальных уравнений шестого порядка относительно функции $\Phi_{km}(t)$

$$\begin{aligned}
 G^6 \frac{d^6 \Phi_{km}}{dt^6} + G_{km}^4 G^4 \frac{d^4 \Phi_{km}}{dt^4} + G_{km}^2 G^2 \frac{d^2 \Phi_{km}}{dt^2} + G_{km}^0 \Phi_{km} &= \\
 = \frac{q_0 a}{B} \frac{2a_1}{a} \frac{2b_1}{b} \sin \frac{k\pi x_1}{a} \sin \frac{m\pi y_1}{b} [H(t-t_1) - H(t-t_2)] a + (1+\nu) \frac{a}{h} \frac{D}{Ba^2} L_{km} \alpha \vartheta_{km} a.
 \end{aligned}$$

Интегралы этих уравнений (в замкнутом виде /2/) запишутся

$$\begin{aligned}
 \Phi_{km}(t) &= C^1 \cos \frac{\lambda_{km}^1 t}{G} + C^2 \sin \frac{\lambda_{km}^1 t}{G} + C^3 \cos \frac{\lambda_{km}^2 t}{G} + C^4 \sin \frac{\lambda_{km}^2 t}{G} + C^5 \cos \frac{\lambda_{km}^1 t}{G} + \\
 &\quad + C^6 \sin \frac{\lambda_{km}^2 t}{G} + B_{km}^1 a + B_{km}^2 e^{-\frac{\beta}{a^2} s_{km} t} a + \left[\sum_{l=1}^6 D_l \Phi_{km}^l(t) + B_{km}^3(t) \right] H(t-t_1) a + \\
 &\quad + \left[\sum_{l=1}^6 \tilde{D}_l \Phi_{km}^l(t) + B_{km}^3(t) \right] H(t-t_2) a.
 \end{aligned}$$

Постоянные интегрирования C^j , ($j=1, \dots, 6$), определяются из начальных условий, которые задавались в виде $\bar{U} = 0$, $\dot{\bar{U}} = 0$ при $t = 0$.

На основании полученных решений построены трехмерные изображения поверхностей прогибов, иллюстрирующих их поведение во времени, а также графики изменения стрел прогибов во времени для различных точек срединной поверхности нагретой оболочки при заданных значениях параметров геометрического толка, числа Био, интенсивности температурных скачков и величины сосредоточенной силы.

Количественный анализ показал:

величина размахов колебаний уменьшается с увеличением параметра кручения k_{12} оболочки и, при этом, значительно возрастает частота колебаний. При отсутствии перепада температуры по толщине ($T_1^+ = 0$, $T^- = T_0^+$) колебания термоупругой системы симметричны относительно временной оси. Симметрия сохраняется в случае теплоизоляции основных поверхностей. С увеличением параметра Био, при замороженной величине температурного скачка ($T_1^+ = const$), частота колебаний растет, а сами колебания асимметричны только во временном интервале (1;1,3) сек включающем в себя временной интервал температурно-силовых нагрузок.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (14-08-00644 А).

Литература

1. Рассудов В.М., Красюков В.П., Панкратов Н.Д. Некоторые задачи термоупругости пластинок и пологих оболочек. Изд-во Саратовского университета, Саратов. 1973. 154 с.

2. Белосточный Г.Н. Аналитические методы определения замкнутых интегралов сингулярных дифференциальных уравнений термоупругости геометрически нерегулярных оболочек. Доклады академии военных наук. Поволжское межрегиональное отделение. 1999. №1. С. 14-25.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЧАСТИЦ В ЗАДАЧАХ МЕХАНИКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

Бережной Д.В., Габсаликова Н.Ф., Камилев М.Р.

(Казань)

Нарушение непрерывности (континуальности) материалов при сильном деформировании и разрушении создает серьезные сложности в описании подобных процессов. Бурное развитие вычислительной техники позволило на новом уровне вернуться к проблеме описания сред с микроструктурой. В последние десятилетия стал все чаще использоваться метод частиц. Он позволяет получать качественно новые результаты за счет количественной сложности компьютерной модели.

Метод частиц состоит в представлении тела совокупностью взаимодействующих частиц (материальных точек или твердых тел). В качестве частиц выступают атомы и молекулы. В настоящее время потенциалы межатомного взаимодействия для важнейших материалов достаточно хорошо известны, что позволяет моделировать динамику молекулярных соединений с высокой степенью точности.

Несомненное преимущество метода частиц по сравнению с методами, основанными на концепции сплошной среды, заключается в том, что он требует значительно меньше предположений о свойствах материала. Использование только простейшего потенциала взаимодействия (например, Леннарда-Джонса) позволяет моделировать такие сложнейшие эффекты, как пластичность, образование трещин, разрушение, температурное изменение свойств материала, фазовые переходы. Для описания каждого из этих эффектов в рамках сплошной среды требуется отдельная теория, в то время как при моделировании методом частиц эти эффекты получаются автоматически, в результате интегрирования уравнений движения.

Специфика метода частиц состоит в необходимости интегрирования очень большого числа уравнений. При расчетах основное время уходит на вычисление силы, действующей на данную частицу. Связано это с существенной нелинейностью силы взаимодействия и необходимостью суммирования большого числа слагаемых (прежде всего сил взаимодействия с соседними частицами). Указанное обстоятельство снижает эффективность методов, требующих на каждом шаге многократного вычисления правой части уравнения. В работе для интегрирования разрешающей системы уравнений используется алгоритм Верле.

Для ускорения расчета потенциал взаимодействия обычно обрезается на некотором заданном расстоянии, то считается, что взаимодействие между частицами пренебрежимо мало и оно не учитывается в расчетах. Поэтому для расчетов, производимых в данной работе, пространство разбивается на кубические ячейки и для частиц, находящихся в некоторой ячейке, рассматривается взаимодействие только с частицами из пограничных с ней ячеек. Таким образом удается добиться, что число операций оказывается пропорциональным числу частиц. Вся область пространства разделяется между процессорами, на каждом шаге интегрирования процессор проводит вычисление внутри отведенной ему области с захватом граничных ячеек из соседних областей, а затем происходит обмен информацией о частицах, находящихся в пограничных ячейках.

Используемый в работе потенциал Леннарда-Джонса является двухпараметрическим, поэтому он имеет очень ограниченные возможности для вариации макроскопических параметров моделируемого им материала. Фактически, он позволяет удовлетворить значению только одного макроскопического параметра – это, например, модуль упругости или предел прочности в статике, скорость распространения продольных волн в динамике. Отношение между указанными параметрами остается неизменным. С другой стороны, данный потенциал весьма точно описывает свойства ряда веществ (прежде всего, кристаллических инертных газов), а также достаточно точно описывает силы взаимодействия Ван-дер-Ваальса, играющие важную роль в твердых телах. К несомненному достоинству потенциала Леннарда-Джонса относится также его вычислительная

простота, не требующая вычисления иррациональных и трансцендентных функций. Потенциал Леннарда-Джонса широко применяется как классический модельный потенциал, особенно в работах, в которых основной задачей является исследование общих физических закономерностей, а не получение точных количественных результатов. На основании реализованного алгоритма был решен ряд модельных задач.

РАСЧЕТ УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ МАХОВИЧНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

Бережной Д.В., Гайнуллина Л.Р., Федорова И.А.

(Казань)

В связи с развитием современных технологий в промышленности и на транспорте появляется множество мобильных устройств, поэтому большое значение приобретает проблема аккумуляирования энергии. Создание новых материалов позволяет не только совершенствовать уже имеющиеся традиционные электрохимические батареи, а искать новые методы накопления и хранения энергии, в том числе и механические [1, 2]. К ним можно отнести так называемые статические и динамические механические накопители энергии.

У статических аккумуляторов механической энергии упругий элемент работает либо на растяжение (сжатие) – что предпочтительнее, либо на кручение (сдвиг), либо на изгиб, но такие аккумуляторы характеризует сравнительно небольшая накапливаемая удельная энергия. Однако, обладая достаточно ценными свойствами – стабильностью накопления энергии, высоким КПД, долговечностью, они обеспечили себе прочное место во многих машинах и механизмах.

Одной из относительно простых и, в то же время, крайне перспективных является технология накопления энергии при помощи маховика. Маховик сохраняет переданную ему энергию в виде кинетической энергии вращения. Другими словами, это некое массивное тело вращения, использующееся в качестве накопителя (инерционный аккумулятор) кинетической энергии. Однако даже современные технологии не исчерпывают всех возможностей маховика. При достаточно быстром вращении он может накапливать кинетическую энергию, которую легко не только наращивать, но и использовать, превратив маховик в электромеханический аккумулятор.

Обычно такие маховики изготавливаются намоткой в виде цилиндров из лент или синтетических волокон на основе стекла или углепластика. При этом для уменьшения аэродинамических потерь, маховик помещается в прочный корпус, являющийся вакуумной камерой с большим весом, который в свою очередь заметно ухудшает весовую удельную энергоемкость всего накопителя. Данная статья посвящена исследованию возможности использования собствен-

ной прочности вакуумного корпуса для увеличения энергоемкости кинетического накопителя энергии с использованием потенциального поля в системе маховик-кожух.

Из потенциальных полей, применяемых в технике, а именно гравитационном, электростатическом и магнитном, в системе маховик-корпус можно применить два последних. Применение потенциальной связи в режиме взаимного отталкивания позволяет разгрузить наружные слои маховика за счет передачи нагрузки на корпус и таким образом увеличить скорость вращения маховика и запасаемую энергию. Также за счет включения в работу корпуса кинетического накопителя энергии, находящегося в сжатом состоянии из-за разности внутреннего и внешнего атмосферного давления, можно уменьшить его вес за счет снятия нагрузки на величину, создаваемую потенциальным полем, и изменить знак нагрузки с сжатия на растяжение, что более предпочтительно для современных синтетических материалов.

В работе проведен анализ энергоемкости маховиков различной формы. Ранее подобные исследования уже проводились, но в них давалась оценка только накопленной кинетической энергии вращения, а в данном случае рассчитывалась и накопленная упругая потенциальная энергия деформации. Расчеты проводились для некоторых канонических форм маховиков, для которых можно получить точное значение энергоемкости. Подобный расчет для сложных форм маховиков, в том числе комбинированных и композитных, можно проводить в известных численных пакетах прочностного анализа, в частности, в ППП ANSYS.

Расчет маховиков по удельной кинетической энергоемкости определяется удельной прочностью материала маховика и коэффициентом формы. При оценке упругой потенциальной энергии деформации используется такой параметр, как отношение временного сопротивления материала на разрыв к его модулю Юнга. Этот фактор дает более широкие возможности при конструировании маховичных накопителей энергии, т.к. в ряде случаев накопленная потенциальная энергия деформации может в разы превышать кинетическую энергию вращения, а влияние формы маховика на его энергоемкость (энергоемкость от потенциальной энергии деформации) может быть совершенно противоположным. Кроме того, если маховик будет накапливать больше потенциальной энергии деформации (чем кинетической), можно будет снизить скорость вращения и ее ускорение, что благоприятно скажется на безопасности эксплуатации и сроке службы конструкции и позволит отказаться от герметичного кожуха, создающего вакуум в зоне вращения маховика (или, по крайней мере, обойтись вакуумом меньшего порядка).

В работе также излагаются основы методики численного исследования удельной энергоемкости кинетических накопителей энергии, реализованных по

схеме маховик-кожух. В дополнение к традиционной оценке энергоемкости по кинетической энергии маховика добавляется оценка удельной энергоемкости системы маховик-кожух, находящейся в потенциальном поле. Анализируются возможности использования различных конструкционных материалов при изготовлении собственно маховика и кожуха. Отмечается, что наличие потенциального поля в системе маховик-кожух позволяет повысить удельную энергоемкость кинетического накопителя энергии.

Литература

1. Гулиа Н.В. Накопители энергии. – М.: Наука, 1980. – 152с.
2. Белых К.В., Филькин Н.М. К вопросу расчета маховичных накопителей кинетической энергии // Материалы международной научно-практической конференции «Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе», г. Пермь, 26–28 апреля 2012 г. Т.1. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2012. – 281-289с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТА АВИАЦИОННОЙ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ШИНЫ С ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСОЙ

Богословский С.Е., Жаворонок С.И., Курдюмов Н.Н.

(Москва)

За последние 50 лет были развиты различные типы математических моделей пневматических шин. Каждая из моделей предназначалась для особой узко специфической задачи. В зависимости от области применения и целей работ, модели различаются по уровню сложности и точности. При составлении моделей, для снижения сложности задач, всегда использовались различные приближения, аппроксимации. [1] Наиболее полный анализ моделей диагональных шин на базе классических теорий оболочек был проведен в работе Э.И. Григолоука и Г.М. Куликова [2]. Дальнейшее уточнение моделей шин связано с описанием контактного взаимодействия и динамического напряженно-деформированного состояния.

Ряд авторов предприняли попытки решения в трехмерной постановке задачи нелинейной теории упругости. Так, радиальная шина рассматривалась в работе [3], причем беговая часть шины описана трехмерной КЭ моделью, а боковина на основе теории слоистых анизотропных оболочек Тимошенко [4]. Из последних исследований в данной области, проводимых с использованием МКЭ, можно выделить работы [5, 6].

В предлагаемой работе рассматривается авиационная шина основной опоры шасси. В двумерной постановке задачи проведено конечно-элементное моделирование авиационной пневматической шины основной опоры шасси самолета в ППП MSC/Nastran [7] и Simulia/Abaqus [8]. Моделирование гиперупругих (ре-

зиноподобных) материалов в рамках модели Муни – Ривлина, проводится через физические константы, отвечающие за формоизменения гиперупругой резиноподобной среды, и соответствующие энергии изменения объема (коэффициент объемного деформирования). Произведен анализ для случаев нагружения шины внутренним давлением (наддув) и для последующего её обжатия от веса самолета. В результате получены эпюры распределения контактного давления по радиальной координате пятна контакта для разных величин обжатий пневматической шины. При допущении кругового пятна контакта, пересчет нормальной (вертикальной компоненты) нагрузки, действующей через пятно контакта на стойку основной опоры шасси производился по формуле:

$$N = \int_F p(r, \theta) dF = \int_0^{2\pi} \int_0^R p(r) r dr d\theta = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^R p(r) r dr = 2\pi \int_0^R p(r) r dr$$

где: r , θ - полярные координаты, радиус и угол соответственно; F – площадь круга пятна контакта в полярной с.к.; $p(r, \theta)$ - контактное давление по узлам КЭ сетки сечения шины, в нашем случае, $p(r), p \neq p(\theta)$ т.е. давление изменяется только по радиусу; R – радиус пятна контакта в полярной с.к., соответствует величине $D_{cont}/2$. Проведено сравнение усилий на стойку авиационного пневматика по величине обжатия, полученных конечно-элементным моделированием, с результатами натурных испытаний.

Для различных значений обжатий пневматика, для нескольких вариантов давления наддува, определен диаметр пятна контакта шины; определено деформированное состояние шины, определен радиус пятна контакта в зависимости от увеличения обжатия пневматика; построены эпюры контактного давления по радиальной координате пятна контакта, для всех рассмотренных вариантов обжатий пневматика; на основе собранных данных об уровне контактных давлений и диаметрах пятна контакта для различных обжатий пневматика, получены значения вертикальных нагрузок N [кг] на стойку шасси; по данным о нормальных усилиях на стойку колеса, с учетом коэффициентов подобия, связывающих исследованную КЭ модель с экспериментальными данными, составлены графики зависимостей нормального усилия на стойку колеса.

Литература

1. Pacejka H.B. Tyre and Vehicle Dynamics, Oxford, Butterworth-Heinemann, 2006, ch.2.5, pp.84-89 (642 p.).
2. Григолюк Э.И., Куликов Г.М. Многослойные армированные оболочки. Расчет пневматических шин, Москва, Машиностроение, 1988, 287 с.
3. Григолюк Э.И., Носатенко П.Я. Расчет радиальных шин методом конечных элементов, // Москва, МАМИ, 1984, 25 с. Деп. в ВИНТИ 11.03.84, №1527-84.

4. Григолюк Э.И., Куликов Г.М. Численное решение задач статики геометрически нелинейных анизотропных многослойных оболочек вращения, // Механика композитных материалов, 1981, № 3, с.443-452.

5. Ghoreishy M.H.R. Finite Element Modelling of the Steady Rolling of a Radial Tyre with Detailed Tread Pattern, Iranian Polymer Journal / Volume 18 Number 8 (2009), pp. 641-650.

6. Moiescu R., Fratila G. Finite Element Model of Radial Truck Tyre for Analysis of Tyre-Road Contact Stress, U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 73, Iss. 3, 2011 ISSN 1454-2358

7. MSC. Nastran. Numerical Methods User's Guide.

8. Simulia/Abaqus. User's guide. Dassault systemes simulia corp.

УСТОЙЧИВОСТЬ НЕКРУГОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ ОБОЛОЧЕК, СОДЕРЖАЩИХ ЖИДКОСТЬ

Бочкарёв С.А., Лекомцев С.В.

(Пермь)

Разнообразие технических приложений, где находят применение выполненные из функционально-градиентных (ФГ) материалов тонкостенные конструкции, потребовало проведения интенсивного анализа их элементов. Как правило, эти исследования направлены на изучение собственных колебаний и устойчивости пустых круговых оболочек. В меньшей степени изучены ФГ-оболочки, содержащие неподвижную [1] или текущую жидкость [2]. Наличие изделий имеющих либо незначительное отклонение от кругового профиля, либо полностью некруговой профиль, определяет необходимость разработки численных алгоритмов, предназначенных для их анализа. В данной работе представлена трёхмерная постановка и конечно-элементный алгоритм её численной реализации, предназначенные для исследования предварительно нагруженных некруговых ФГ-оболочек, взаимодействующих с неподвижной или текущей сжимаемой жидкостью.

Потенциальное движение жидкой среды описывается волновым уравнением, которое совместно с условием непроницаемости и соответствующими граничными условиями преобразуются с помощью метода Бубнова-Галёркина. Выражения для деформаций упругой конструкции определяются с помощью соотношений нелинейной теории тонких оболочек, основанной на гипотезах Кирхгофа-Лява. При моделировании оболочек произвольного поперечного сечения предполагается, что криволинейная поверхность достаточно точно аппроксимируется совокупностью плоских элементов [3]. Для математической постановки задачи динамики оболочки используется вариационный принцип возможных перемещений, включающий работу сил инерции, гидродинамиче-

ское давление, действующее на смоченной поверхности S_σ и работу статических сил, создающих предварительное напряжённое недеформированное состояние

$$\int_{S_s} \delta \varepsilon^T \mathbf{D} \varepsilon dS + \int_{V_s} \rho_s \delta d^T \dot{d} dV - \int_{S_\sigma} \delta d^T P dS + \int_{S_s} \delta \varepsilon^T \sigma_0 \varepsilon dS = 0,$$

$$\mathbf{P} = \{0 \quad 0 \quad -\rho_f (\partial \varphi / \partial t + U \partial \varphi / \partial x) \quad 0 \quad 0 \quad 0\}^T,$$

$$\mathbf{e} = \left\{ \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial w}{\partial y}, \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right\}^T, \quad \varepsilon = \left\{ \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, 2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right\}^T.$$

Здесь: u, v, w — компоненты вектора перемещений оболочки; \mathbf{d}, \mathbf{P} — вектора обобщённых перемещений и гидродинамической нагрузки на поверхности S_σ ; ρ_s и ρ_f — удельные плотности материала оболочки и жидкости; \mathbf{D} — матрица эффективных констант ФГ-материала; (x, y, z) — система координат, связанная с боковой поверхностью оболочки; φ — потенциал возмущения скорости; U — скорость течения жидкости. Элементы матрицы σ_0 находятся из условия $\mathbf{E}^T \mathbf{D} \varepsilon_0 = \sigma_0 \varepsilon$, где \mathbf{E} — матрица линейных множителей, а вектор ε_0 определяется из решения соответствующей задачи $\mathbf{K}_s \mathbf{d} = \mathbf{P}_0$, где \mathbf{P}_0 — вектор статических нагрузок, в том числе температурных.

Выполнение стандартных процедур МКЭ сводит задачу исследования нагруженных ФГ-оболочек, содержащих жидкость, к решению связанной системы двух уравнений, которая может быть приведена к стандартной проблеме на собственные значения:

$$\begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{K} + \mathbf{A}) & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix} \mathbf{x} = \omega \mathbf{x}, \quad \mathbf{x} = \{q, \mathbf{f}, \dot{q}, \dot{\mathbf{f}}\}^T,$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s + \mathbf{K}_g & 0 \\ 0 & \mathbf{K}_f \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & 0 \\ 0 & \mathbf{M}_f \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & \rho_f \mathbf{C}_s \\ -\mathbf{C}_f & -\mathbf{C}_f^c \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \rho_f \mathbf{A}_s \\ -\mathbf{A}_f & \mathbf{A}_f^c \end{bmatrix}.$$

Здесь \mathbf{K} — матрица жёсткости, \mathbf{M} — матрица масс, \mathbf{C} — матрица демпфирования и \mathbf{A} — матрица гидродинамической жёсткости, соответственно; q, \mathbf{f} — векторные функции координат, $\omega = \lambda_r + i^* \lambda_{im}$ — характеристический показатель.

Более подробное описание подматриц, входящих в (1), представлено в [4].

В численных примерах выполнено исследование влияния линейных размеров, уровня заполнения и граничных условий на собственные частоты, формы колебаний и границу гидроупругой устойчивости тонкостенных круговых и эллиптических цилиндрических оболочек, взаимодействующих с неподвижным или текущим потоком жидкости, и находящихся под действием статической ме-

ханической и температурной нагрузок. Оценено влияние гидростатического давления и температуры нагрева боковой поверхности на динамические характеристики эллиптических цилиндрических ФГ-оболочек. Показано, что граница механической и гидроупругой устойчивости таких конструкций может быть откорректирована за счёт изменения показателя объёмной доли любого составляющего материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-01-96049) и Совета по грантам Президента РФ для ведущих научных школ (грант НШ-2590.2014.1).

Литература

1. Iqbal Z., Naeem M.N., Sultana N. et al. Vibration characteristics of FGM circular cylindrical shells filled with fluid using wave propagation approach / Iqbal Z., Naeem M.N., Sultana N., Arshad S.H., Shah A.G. // *Appl. Math. Mech.* — 2009. — Vol. 30. — P. 1393–1404.
2. Sheng G.G., Wang X. Thermomechanical vibration analysis of a functionally graded shell with flowing fluid // *Eur. J. Mech. A-Solid.* — 2008. — V. 27, N. 6. — P. 1075–1087.
3. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. — М.: Мир, 1975. — 256 с.
4. *Bochkarev S.A., Lekomtsev S.V., Matveenko V.P.* Natural vibrations and stability of shells with arbitrary cross-section, containing flowing fluid / *Proc. of the 11th International Conference on Vibration Problems.* — Lisbon, Portugal, 2013. — 8 pp.

КОГНИТИВНЫЙ ОПЫТ УЧЕБНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ У СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ

Булавкина Т.А., Неклюдова Г.А.

(Брянск)

Высшее образование является одной из самых мощных систем культурного формирования. У студентов происходит переосмысление системы личностных отношений к различным сторонам жизни, в том числе и к будущей профессии, и к учебной деятельности в вузе. С точки зрения формирования личности профессионала в технической области важно то, насколько система личностных смыслов соответствует и способствует развитию и становлению студента, какая информация проходит через осмысление личностью и превращает ее (личность) из пассивного потребителя сообщаемых знаний в творца, открывает наибольшие возможности ее развития.

С помощью метода репертуарных решеток был обследован 151 студент Брянской государственной инженерно-технологической академии (БГИТА),

получено 3020 высказываний (конструктов), которые подверглись математико-статистической обработке. Для анализа полученных данных был использован разведочный статистический метод: анализ соответствий (correspondence analysis). Анализ соответствий позволяет сгруппировать категории студентов и категории восприятия ими действительности. Личностная система смыслов наиболее сложна для изучения, поэтому основным методом исследования являлся метод репертуарных решеток. При этом, акцентировалось внимание на определении когнитивного компонента социокультурного опыта личности в области учебной деятельности и будущей профессиональной. Специально ориентированная когнитивная карта студента является основанием для анализа и оценки учебно-профессиональной ориентации личности.

Студенты, имеющие в своей когнитивной структуре конструкты, отражающие безразличие к учебе или не имеющие каких-либо конструктов, связанных с учебной или профессиональной деятельностью, представляют собой группу «риска», с большой вероятностью прогноза на отчисление. В ходе анализа выяснилось, что учебно-профессиональные конструкты полностью отсутствуют у 3,7% студентов 1 курса, которые впоследствии (на 2, 3, 4 курсах) были отчислены за неуспеваемость. Безразличие к учебе проявляется у 10,3% студентов.

Выявлена тенденция роста ценности высшего образования, так, в 1998г. конструкты, отражающие ценность высшего образования встречались у 7,5%, в 2011г. у 25,6%, в 2013г. у 23,4% студентов. Студенческая жизнь привлекала 33,6% студентов в 1998г., а в 2013г. это число возросло до 68,8%.

Значительно возросло число студентов, увлекающихся конкретными предметами в процессе обучения в вузе: от 14,0% студентов в 1998г., до 30,2% в 2011г. и 37,7% студентов в 2013г. По мнению Н.Б. Нестеровой (1987), это может оказывать прямое влияние на учебную активность и возможность самореализации студентов. Полученные частотные характеристики выявляемых конструктов свидетельствуют о том, что в настоящее время для студентов, наиболее значимым является все-таки интерес к получению знаний, а не просто к процессу учения.

К сожалению, практически не претерпела изменений система отношений к научной деятельности у студентов технических вузов. Конструкты, отражающие отношение к научной деятельности встречаются у студентов технического вуза достаточно редко. В 1998г. — это 1,9% студентов, в 2011 г. таких конструктов не встречалось, а, в 2013г. 2,6% студентов использовали подобный конструкт.

Для современных студентов имеет значение наличие интеллекта 29,9% (2013г.), стремление к получению знаний (19,5%), трудолюбие (23,4%) как характеристика личности. в 2013г. впервые появилось у 7,8% студентов конструкты, отражающие отношение к общественной деятельности в вузе (например, профком).

В целом, конструкты будущей профессиональной деятельности в структуре личности студентов 1 курса представлены в меньшем объеме, нежели учебные.

Только пятая часть студентов в 1998г. использует конструкт «быть профессионалом — не быть специалистом», а в 2013г. профессионализм имеет значение уже для 39% студентов. В 2011г. профессионализм имел значение для гораздо большего числа студентов (83,7%). Среди конструктов, отнесенных к данному блоку, чаще встречались конструкты общего характера, такие, как «быть хорошим специалистом—не быть хорошим специалистом». Создание таких конструктов отражает реальное, довольно расплывчатое, представление студентов о получаемой будущей профессии. Конкретные конструкты, относящиеся к профессиональной деятельности, например, «быть хорошим механиком—не быть», встречались только в единичных случаях, и, как правило, у студентов, имевших практический опыт работы в избранной области.

В 1998г. чаще всего (у 35,5% студентов) встречался конструкт «иметь работу — не иметь работы (или профессию)», примерно то же число студентов (36,4%) используют этот конструкт и в 2013г., в 2011г. значимость этого конструкта была в значительно ниже (встречалось всего у 18,6% студентов).

Наблюдается явная тенденция к снижению важности занятий собственным бизнесом для студентов. Занятие бизнесом было важно в 1998г. для 15,9% студентов, в 2011 это число снизилось до 6,9%, а в 2013г. снижение произошло до 3,9%.

Добиться успехов в 1998 г. хотели 33,6% студентов, а в 2011г. об успехе в жизни задумывались 2,9%, но в 2013 г. число таких студентов возросло до 15,5%. А конструкт: «любить свою работу (профессию) — не любить», создает десятая часть студентов в 1998г., в 2011 это также 10,4 % студентов, в 2013-14%, достоверных отличий не выявлено.

Не было выявлено конструктов, в той или иной форме отображающих престижность профессии инженера, что может служить индикатором престижности профессии инженера в современном Российском обществе.

АППРОКСИМАЦИЯ СТРОПНОЙ СИСТЕМЫ ПЛАНИРУЮЩЕГО ПАРАШЮТА УПРУГОЙ СРЕДОЙ

Васильченко А.Г.

(Москва)

Парашютная система (ПС) является инженерной конструкцией, состоящей в основном (за исключением немногочисленных металлических элементов) из мягкой оболочки-ткани и лент. Для того, чтобы понять специфику мягкой оболочки (МО) как конструкционного материала, описываемого уравнениями [1], можно представить МО как кусок тонкой резины, на которую в недеформиро-

ванном состоянии наносят прямоугольную сетку координат α^1, α^2 . Под действием внешних сил МО может занять самую причудливую форму – парашют, парус, воздушный шар, мягкие емкости для нефтепродуктов. И сетка координат α^1, α^2 тоже деформируется так, что в некоторых случаях (сетчатый материал МО) она перестает быть прямоугольной. МО не воспринимают ни моментов, ни сжимающих усилий (тогда образуются складки так, что отдельные ее участки как бы теряют устойчивость [2]) и наиболее полно описываются теорией больших деформаций, учитывающей нелинейность связи напряженного и деформированного состояния и справедливой при неограниченных деформациях и перемещениях [3, 4]. Одномерные гибкие элементы парашютов – нити, ленты и шнуры, хорошо описаны в [5]. Инженерная конструкция из МО без нагрузки представляет собой бесформенную груду ткани и лент; но под действием нагрузки она приобретает утерянную жесткость твердого тела. Это видно на видеосъемках функционирования ПС, на которых наполненные воздухом парашюты движутся как единые жесткие конструкции, а после приземления и снятия весовой нагрузки – это опять бесформенные медузы. Пространственные колебания парашюты в связке осуществляют как жесткие тела до тех пор, пока не коснутся один другого (возникают контактные задачи), и давление на купол будет «изнутри», а угол атаки не превысит критический уровень складывания.

Следовательно, на этапе работы ПС, когда инженерная конструкция из МО надута воздухом, к ней можно относиться, как к твердому телу. Одно из аналитических решений для твердого тела используется в настоящей работе. Представим, что надутый купол ПП является жесткой балкой, удерживаемой множеством строп. Аналог в строительной механике – это шпала, лежащая на винклеровском основании [6]. Аналитический аппарат решения уравнений шпалы, лежащей на земле, хорошо изучен и готов к нестандартному применению в смежных областях математической физики. Среда Винклера сжимается при вдавливании шпалы, а среда строп растягивается, чтобы создать силы, удерживающие купол. Однако свойства среды Винклера недостаточно полно описывают физические свойства строп, поэтому возникает аппроксимация строп средой Коссера. Преимущества среды Коссера состоят в том, что [7]:

- это микрополярная вязкоупругая среда;
- деформированное состояние среды Коссера описывается как тензором деформаций (для среды строп это растяжение, такое же, как в среде Винклера), так и тензором изгиба-кручения (для среды строп изгиб может быть под действием набегающего потока, а кручение очень актуально вследствие возможной начальной угловой скорости вращения спасаемого груза [8], передаваемой на стропы.
- учет диссипации энергии в среде Коссера, что актуально для моделирования трения в ПС.

В целом, переход от материальных точек механики Ньютона к сплошным средам механики Эйлера (примером которой является среда Коссера) обещает значительные вычислительные преимущества.

При применении описанной вычислительной процедуры важно ее строгое математическое обоснование. Аналогичная проблема уже была решена в методе дискретных особенностей (МДО). При развитии МДО сначала с помощью эвристических соображений и численных экспериментов С.М.Белоцерковский создал метод дискретных вихрей в аэродинамике и лишь потом И.К.Лифанов его строго обосновал и распространил в теорию упругости, дифракцию волн, электродинамику и электростатику. «Решающее значение для успеха при этом имеет создание такого метода, который учитывал бы три основные стороны проблемы [моделирования физических процессов] — физическую, математическую и машинную. Подчеркнем: роль математики не ограничивается обоснованием и даже обобщением метода. Она и только она делает его универсальным, не связанным рамками только одной прикладной проблемы» [9]. Физическая разнородность задач не мешает их математической однородности – они удовлетворяют уравнению Лапласа. И решения из одной области математической физики можно подставлять в другие.

Литература

1. Алексеев С.А. Основы общей теории мягких оболочек// Расчет пространственных конструкций.М:1967- вып II. с.31-52.
2. Балабух Л.И., Алфутов Н.А., Усюкин В.И. Строительная механика ракет. М.: Высшая школа, 1984. -с.166
3. Общая нелинейная теория упругих оболочек/Под ред. К.Ф.Черных, С.А.Кабрица.-СПб.: Изд-во С.-Петербур.ун-та, 2002, с.151-176
4. Машиностроение Энциклопедия Т. I-3 Кн 2 «Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин», - М.: Машиностроение 1995, с.180
5. Светлицкий В.А. Механика гибких стержней и нитей. М.: Машиностроение, 1978. - 224 с.
6. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. М.: Машиностроение, 1978. - 312 с.
7. Ерофеев В.И., Кажаяев В.В., Семерикова Н.П. Макромеханическое моделирование упругой и вязкоупругой сред Коссера // Вычислительная механика сплошных сред. – 2009. – Т. 2, № 2. – С. 40-47
8. Лялин В.В., Морозов В.И., Пономарев А.Т. Парашютные системы. Проблемы и методы их решения. М.: Физматлит, 2009.-576с.
9. Белоцерковский С.М., Лифанов И.К. Численные методы в сингулярных интегральных уравнениях. – М.: Наука. 1985. – 256с.

ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ТРЕХКУПОЛЬНОЙ ПАРАШЮТНОЙ СИСТЕМЫ

Васильченко А.Г., Погорелов М.В.

(Москва)

Существующий транспортный корабль «Союз» является основой российской космической программы. Парашютная система (ПС) «Союз» для спускаемого аппарата массой 3,1 тонн, созданная традиционными инженерными методами [1] на заре развития космонавтики, состоит из основной однокупольной ПС с парашютом площадью 1000 м² и запасной ПС с парашютом площадью 574 м². При разработке парашютной системы Пилотируемого Транспортного Корабля нового поколения (массой 9 тонн) было принято решение делать ее трехкупольной (3кПС) с возможностью безопасного приземления и на двух куполах (при отказе одного из основных парашютов).

Выбор в пользу многокупольной парашютной системы (МКС) перед однокупольной был сделан по ряду причин. Преимущества МКС в целом состоят в том, что:

- 1) динамический удар при раскрытии ПС «размазывается» по времени, что уменьшает перегрузки, что показано в [2] экспериментальным путем;
- 2) МКС при движении более устойчива, чем однокупольная ПС;
- 3) вероятность безотказной работы МКС не меньше, чем однокупольной (в том числе и с запасным куполом);
- 4) меньшие по размеру ПС технологически проще изготавливать.

Эти преимущества сформулированы на интуитивном понятийном уровне, нужно подтвердить их данными математического моделирования и модельными экспериментами.

Особая трудность проектирования ПС состоит в большом статистическом разбросе свойств конструкционных материалов (тканей и лент), из которых будет изготавливаться ПС. Большое число случайных факторов имеется и в процессе применения ПС – условиями начала ее работы являются интервалы по высоте H , по скорости V и траекторному углу θ (внутри которых конкретная реализация (H , V , θ) случайна). Наличие случайных факторов объясняет, почему характеристики работы ПС меняются от одного применения до другого [3].

Чтобы учесть случайные факторы, моделируется не одна наиболее вероятная траектория функционирования ПС, а множество возможных траекторий. Например, при создании в НИИ Парашютостроения ПС Ариан-5 по математическим моделям движения с применением метода Монте-Карло анализировались 500 возможных траекторий движения груза с ПС для выявления статистических тенденций характера посадки. В [3] для создания математической модели (ММ) раскрытия планирующего парашюта (ПП) анализировались данные 2000 чис-

ленных экспериментов с людскими ПП, на основании множества численных экспериментов выявляются детерминированные законы и статистические разбросы около них.

Для создания специфической ММ взаимодействия куполов в 3кПС и описания колебаний используется представление их в качестве обращенных маятников [4] с точкой опоры на возвращаемый аппарат (ВА); центры тяжести таких маятников расположены близко к куполу; все купола находятся в некотором балансировочном положении (при угле атаки не равно нулю) под действием аэродинамических сил и силы тяжести. В силу конфигурации 3кПС на этапе спуска и взаимного расположения куполов задача предполагает пространственную постановку.

На основании экспериментальных данных, полученных в ходе спуска тормозного блока ПС Ариан-5, показано, что угол отклонения отдельного парашюта от вертикальной оси 3кПС может достигать 32° , что подтверждает данные [2, 5] по устойчивому балансировочному углу атаки купола $\alpha_{\text{бал}}=25\div 30^\circ$ формы плоский круг в раскрое. Это означает, что в связке трехкупольной ПС каждый из парашютов займет такое положение, что все вместе они составят фигуру пирамиды, с углом грани относительно осевой порядка $\alpha_{\text{бал}}=30^\circ$.

Получение зависимостей аэродинамических характеристик каждого из парашютов относительно угла атаки происходит на современных программных комплексах [6]. В отличие от обращенного маятника в классической постановке [4], который стабилизируется в вертикальном положении колебаниями точки подвеса, в случае описания колебаний отдельного купола 3кПС его наклонное положение по ребру пирамиды и так устойчиво под действием аэродинамической силы, однако важно определение реакции на опору маятника – ВА, полученное суперпозицией сил от всех трех куполов. Колебания этих трех сил могут компенсироваться (получается динамический гаситель колебаний [4]), а могут и входить в резонанс. В теоретическом плане берется аналитический аппарат ММ нелинейных колебаний обращенного маятника и «запускается» в обратную сторону – от расчета колебаний к расчету реакции опоры.

В случае с ВА около устойчивого положения с углом атаки $\alpha_{\text{бал}}=25\div 30^\circ$ каждый парашют в связке совершает колебательные движения с некоторой амплитудой $\Delta\alpha$. В общем случае она подлежит определению, так как угол атаки $\alpha = \alpha_{\text{бал}} \pm \Delta\alpha$ может достигнуть 40° , на котором отдельный купол формы плоский круг в раскрое складывается.

Литература

1. Лобанов Н.А. Основы расчета и конструирования парашютов. М.: Машиностроение, 1965.- 364с.

2. Носарев И.М. Экспериментальное исследование аэродинамических характеристик трехкупольной парашютной системы//Парашюты и проницаемые тела: Сборник статей/ – М.: Изд-во МГУ, 1980. - с.106-114

3. Potvin J. and Peek G. Three-Stage Model for Slider-Reeefed Parafoil Inflation; paper AIAA-2007-2501; 19th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference, Williamsburg, VA, 21 - 24 May 2007.

4. Прочность. Устойчивость. Колебания. М.: Машиностроение, т.3, 1968.

5. Knacke T. W. Parachute Recovery Systems Design Manual // Para Publishing, Santa Barbara, CA 1992.

6. Лялин В.В., Морозов В.И., Пономарев А.Т. Парашютные системы. Проблемы и методы их решения. М.: Физматлит, 2009. -576с.

ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАСКРЫТИЯ ПЛАНИРУЮЩЕГО ПАРАШЮТА, ЗАРИФОВАННОГО СЛАЙДЕРОМ

Васильченко А.Г., Яковлев Р.В.

(Москва)

Посвящается светлой памяти В.И.Морозова

Данный доклад основан на идеях, высказанных в дискуссиях д.т.н., проф. В.И.Морозова с одним из авторов настоящей работы Васильченко А.Г.

Новым типом технических изделий, которые находят широкое применение в современной инженерной практике, являются мягкооболочечные конструкции, изготавливаемые из тканей, ламинатов, лент и шнуров, приблизившихся по прочности к металлам, но оставшихся при этом существенно легче традиционных конструкционных материалов. Значительный опыт инженерного расчета и математического моделирования мягкооболочечных конструкций накоплен в парашютостроении, где такие разработки проводятся с 50-х годов прошлого века и готовы к распространению в другие области применения мягких оболочек (МО).

Нерешенными в теоретическом плане остается еще ряд актуальных задач, среди которых центральное место занимает процесс раскрытия (наполнения) парашюта. Этот процесс является важнейшим этапом работы парашютной системы (ПС). Именно на нем реализуются максимальные аэродинамические нагрузки, по которым ведется расчет прочностных характеристик конструктивных элементов (мягких – строп, ткани, лент подкрепляющего силового каркаса и соединительных металлических) ПС; может произойти отказ по наполнению, а значит авиационное происшествие, связанное в одном случае с потерей груза, а в другом – с гибелью людей.

Раскрытием (наполнением) парашюта называется переходный процесс, происходящий под действием набегающего воздушного потока и сопровождающийся резким изменением формы парашюта от сильно вытянутой по потоку в конце момента вытягивания его из ранца (камеры, контейнера) до момента принятия поверхностью купола окончательной устойчивой равновесной наполненной формы. Иногда разделяют процессы *наполнения* (английские аббревиатуры *inflation, filling*) воздухом замкнутого объема внутри купола (особенно это подходит для планирующего парашюта - ПП, где есть этот внутренний объем) и *раскрытия* (английские аббревиатуры *opening, deployment*) в смысле механического процесса развертывания МО.

Из [1, 2] следует, что ни одного практически удовлетворительного теоретического решения физической задачи по определению времени раскрытия парашюта и силы при раскрытии парашюта, то есть того, что и нужно конструктору, не было получено. То есть и американцы, и мы как были, так и остались на экспериментальном пути решения проблем раскрытия мягкооболочечных конструкций. Вместе с тем способы рифления продолжают развиваться: есть рифление шнуром, слайдером, гармошкой.

Современная информационная технология научных разработок и исследований сложных технических систем по своей сути заключается в создании математических моделей (ММ - своеобразных математических «дублеров») будущего изделия и проведение с их помощью широкомасштабных вычислительных экспериментов. Эти эксперименты проводятся еще до создания реального изделия. Они значительно оперативнее, информативнее и дешевле наземных и летных экспериментов. Исключительная сложность исследования процесса функционирования парашюта с грузом в потоке, особенно на этапе его раскрытия, состоит в том, что в теоретическом плане эта проблема является нелинейной в целом. Для ее решения надо осуществить совместное интегрирование двух групп нелинейных дифференциальных уравнений из разных областей механики, одна из которых описывает аэродинамический аспект задачи (реализуются в основном отрывные режимы обтекания), а другая – упругий либо вязкоупругий аспект задачи – динамику деформирования МО. Другое направление, появившееся еще на ранних стадиях разработки парашютной техники и продолжающее развиваться в нашей стране и за рубежом и ныне, базируется на осмыслении и обобщении материалов физического эксперимента и летно-экспериментальной отработки изделий. Результатом такого обобщения стало создание упрощенных ММ нагружения и формообразования раскрывающегося парашюта. Первой задачей по математическому моделированию было разделение процесса раскрытия на этапы и фазы, которые можно было описать простыми математическими формулами и проверить их на хорошо достоверной компьютерной модели, построенной на основе множества данных экспериментов (причем как физических,

так и численных). В статье [3] для создания ММ раскрытия ПП со слайдером анализировались данные экспертной оценки, реальных применений и 2000 численных экспериментов с людскими ПП («jump-to-jump basis» - множество прыжков), на основании которых был выявлен ряд детерминированных законов и статистических разбросов около этих законов. Детерминированные законы оказываются разными для различных применений ПП и различного положения слайдера: slider-up, slider-descent или slider-down.

В настоящей работе этот подход распространен на грузовые ПП. Преимущество грузовых ПП по сравнению с людскими состоит в том, что при проверке теоретических построений в них рискуют только грузом, а не человеческими жизнями. На грузовых ПП, особенно в режиме численного эксперимента, можно сравнить и различные способы рифления.

Литература

1. Лялин В.В., Морозов В.И., Пономарев А.Т. Парашютные системы. Проблемы и методы их решения. – М.: Физматлит, 2009. -576с.
2. T.W. Knacke Parachute Recovery Systems. Design Manual. – Santa Barbara: Para Publishing, 1992 by Para Publishing
3. Potvin J. and Peek G. Three-Stage Model for Slider-Reefed Parafoil Inflation; paper AIAA-2007-2501; 19th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference, Williamsburg, VA, 21 - 24 May 2007.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНСТАНТ В ЗАКОНЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ БЕТОНА ПРОНИКАНИЮ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ УДАРНИКОВ

Велданов В.А., Исаев А.Л., Перфильев А.Ю., Шлятина С.А.

Сотский М.Ю.

(Москва)

Доклад посвящен уточнению коэффициентов закона сопротивления для случая внедрения жестких ударников в бетон и обоснованию применяемого для этого метода обработки экспериментальных данных, основанного на применении аппарата статистики и многокритериальной оптимизации.

Процесс взаимодействия ударников с преградами из бетона характерен многообразием определяющих его факторов: габаритно-массовых характеристик ударника, физико-механических свойств преграды, диапазонами скоростей и углов встречи с преградой. Для получения информации об их влиянии на сопротивление прониканию используются экспериментальные и теоретические методы.

Одним из методов является метод расчета проникания недеформируемых ударников в плотные и прочные преграды, основанный на известной гипотезе

[1] о полиномиальной зависимости давления в точке контакта тела со средой от нормальной составляющей скорости V_n : $\sigma_n = aV_n^2 + bV_n + c$, или $\sigma_n = aV_n^2 + c$ для внедрения в прочные преграды. Полагается, что в любой точке контакта тела со средой действует сопротивление трения τ_n , определяемое коэффициентом трения μ и нормальным удельным сопротивлением σ_n : $\tau_n = \mu\sigma_n$. Под a подразумевается некий аналог плотности среды, а под c - некая величина, обобщенно характеризующая прочность среды, при этом значения a , c , μ выбираются из условий сходимости с имеющимися экспериментальными данными.

Данный подход и его вариации достаточно широко используются для расчета проникания в различные среды и при решении других прикладных задач [2], и показал удовлетворительную сходимость с экспериментом по глубине проникания. Для использования в качестве инструмента выбора конструктивных параметров ударников рассматриваемый подход, который нуждается в доработке в части повышения точности описания самого процесса проникания, а не только таких его интегральных характеристик, как глубина проникания или толщина пробиваемой преграды.

В исходной гипотезе о законе сопротивления считается, что a , c , μ не зависят от скорости. Поскольку прочность бетона, характер и степень его фрагментации при разрушении зависят от скорости, времени и предьстории нагружения, данное положение некорректно в применении к случаю, когда диапазон скоростей ударника достаточно широк и скорость ударника в процессе внедрения значительно меняется. Из этого следует, что каждой групп результатов для разных скоростей взаимодействия будет соответствовать свой наилучший набор a , c , μ , поскольку начальные скорости ударника в группах значительно различаются. Таким образом, значения a , c , μ в законе сопротивления должны быть такими, чтобы отклонения расчетных значений от экспериментальных в различных группах результатов одновременно были минимально возможными.

Для экспериментальных данных это означает, что критериями правильности выбора a , c , μ могут служить отклонения расчетных зависимостей скорости от времени для каждой начальной скорости от экспериментальных точек, а также отклонения расчетных кривых зависимости глубины внедрения ударников от скорости. Данные критерии являются противоречивыми, так как удовлетворение их для разных скоростей внедрения трудно реализуемо. Поэтому, основываясь на идее равномерного компромисса [3], необходимо искать такие их значения, при которых нормированные значения всех частных критериев становятся равными между собой.

На основании анализа экспериментальных данных определен порядок их обработки для определения констант полиномиальной модели сопротивления, проведен выбор констант модели сопротивления при внедрении ударников в

бетон, определены стадии процесса проникания, для описания которых необходима доработка модели сопротивления.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 15-08-08319-а).

Литература

1. Велданов В.А. Исаев А.Л., Маринчев Д.В. и др. Программа расчета на ПЭВМ параметров процесса взаимодействия ударника с преградой // Материалы XXII Всесоюзной конференции «Численные методы решения задач теории упругости и пластичности». – Новосибирск: ИТПМ АН СССР. 1992. С.23-25.

2. Велданов В.А. Численная оценка проникания модулей космических аппаратов в астероиды // Тезисы Международной конференции «Космическая защита Земли. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ. 1996. С. 173-178.

3. Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР //М.: Энергоатомиздат, 1987, 354 с.

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ПРОНИКАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛОСКИХ УДАРНИКОВ

Велданов В.А., Федоров С.В., Даурских А.Ю., Максимов М.А., Сотский М.Ю., Козлов В.С.

(Москва)

Рассмотрению высокоскоростного проникания удлинённых ударников в металлические преграды по нормали, под углом и с углами атаки посвящено значительное число работ, в том числе выполненных авторами доклада [1-4].

Показано [4], что группа ударников обладает лучшей проникающей способностью, чем одиночные ударники. Это явление отмечено как для группы ударников, расположенных пространственно вокруг центрального ударника, так и для группы ударников, расположенных в одной плоскости. При уменьшении зазора между ударниками отмечено увеличение глубины проникания в мишени. Предельным случаем для схемы метания ударников, находящихся в одной плоскости и расположенных вплотную друг к другу, является метание плоских (пластинчатых) ударников. В докладе рассмотрены экспериментальные и расчетные результаты высокоскоростного ударного взаимодействия таких плоских ударников с массивными (полубесконечными) мишенями.

Экспериментальные исследования особенностей проникания металлических плоских ударников в металлические преграды проводились с использованием гладкоствольной баллистической установки калибром 23,5мм. Ударники и мишень изготавливались из дюралюминия твердостью HRB 40 мишени и HRB 47 ударников. Для метания плоского ударника с минимальным углом атаки при встрече с преградой были

изготовлены метаемы сборки, включающие ударник толщиной 3 мм и 1,5 мм шириной 23 мм и длиной 42 мм, разрезное ведущее устройство из полиэтилена, диск из дюралюминия Д16 и поддон из полиэтилена. Мишени опирались на массивную стальную плиту для имитации полубесконечности преграды.

Основная группа исследований проводилась на ударниках толщиной 3 мм. Масса плоского ударника 8,1 г, масса ударника вместе с ведущим устройством и диском составляла 18 г, а поддона - 7 г. Исследование проводилось при скоростях встречи в диапазоне от 820 м/с до 1470 м/с.

Для оценки размеров и формы плоских ударников на характеристики кратера были проведены эксперименты по прониканию пластин с теми же размерами (шириной 23 мм и длиной 42 мм), но толщиной 1,5 мм, а также толщиной 3 мм с одним продольным вырезом шириной 13 мм, с двумя продольными вырезами шириной 4,6 мм. Образованные продольными вырезами выступы имели ширину 4,6 мм.

В результате воздействия плоских ударников в мишени образовывался кратер овальной формы. Глубина кратера замерялась относительно лицевой поверхности мишени. В соответствии с полученными размерами определялся объем кратеров.

Показано, что поперечные размеры кратера составляют $5 \dots 9h$, при этом продольные размеры кратера могут составлять $1.35 \dots 2.0$ ширины плоского ударника. При увеличении скорости встречи от 820 до 1470 м/с ширина кратера в поперечном сечении увеличивается в большей степени (в 1,8 раза), чем его продольные размеры (в 1,5 раза), динамика роста объема кратера W с увеличением скорости встречи выше, чем динамика роста глубины кратера H .

С уменьшением толщины ударника в два раза глубина кратера практически не меняется, однако при этом существенно в 1,9 раза уменьшается его объем, главным образом за счет уменьшения ширины кратера в поперечном сечении.

С помощью численных методов рассмотрено влияние поддона и металлического диска, используемых при метании сборок с ударниками. Показано, что наличие поддона и диска обеспечивает полное срабатывание плоского и цилиндрического ударника в мишени, это обеспечивает более длительное воздействие ударника на мишень и приводит к увеличению глубины проникания в 1,4 раза по сравнению с ударниками при отсутствии поддона и диска. Проведено сравнение результатов взаимодействия пластинчатых ударников и осесимметричных стержневых ударников при одинаковых условиях встречи с мишенью. Расчеты показывают, что плоские ударники как при наличии, так и при отсутствии поддона и диска обеспечивают большую в 2 раза глубину проникания по сравнению с цилиндрическими ударниками.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант 15-08-08319-а).

Литература

1. *Veldanov V.A., Kozlov V.S.* 2007. "Penetration model taking in mind viscosity properties of the impacted body materials", 23st International Symposium on Ballistics, Tarragona, Spain, V.2, pp. 1429-1436.
2. *Veldanov V.A., Maximov M.A., Kozlov V.S.* 2011. "Oblique Impact of Elongated Projectiles on Massive Targets", 26st International Symposium on Ballistics, Miami, Florida, V.2, pp. 1401-1409.
3. *Veldanov V.A., Fedorov S.V., Maximov M.A., Dudik D.E., Kozlov V.S.* 2010. "Influence of yaw angle on the penetration capability of elongated rod projectiles", 27st International Symposium on Ballistics, Freiburg, Germany, V.2, pp. 1568-1576.
4. *Veldanov V.A., Fedorov S.V., Maximov M.A., Dauriskikh A.Yu., Kozlov V.S.* 2010. "High-velocity Penetration of a Group of Extended Projectiles into Metal Targets", 25st International Symposium on Ballistics, Beijing, China, V.2, pp. 1020-1027.

НЕСТАЦИОНАРНОЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ДВИЖУЩИХСЯ ТЕЛАХ СО СФЕРИЧЕСКИМИ ГРАНИЦАМИ

Вестяк А.В., Тарлаковский Д.В.

(Москва)

Рассматривается нестационарная осесимметричная задача об определении компонент электромагнитного поля в подвижных телах со сферическими границами, заполненными однородным изотропным проводником. Поле перемещений считается заданным.

Осесимметричное изменение электромагнитного поля описывается безразмерными уравнениями Максвелла и линеаризованным обобщенным закон Ома в сферической системе координат r, θ, ϑ ($r \geq 0, 0 \leq \theta \leq \pi, -\pi < \vartheta \leq \pi$):

$$-r^{-1} (rH)_{,r} = \eta_e^2 (\dot{\gamma}_\theta + \dot{E}_\theta), \quad r^{-1} (H \sin \theta)_{,\theta} \sin^{-1} \theta = \eta_e^2 (\dot{\gamma}_r + \dot{E}_r), \quad (1)$$

$$r^{-1} [(rE_\theta)_{,r} - E_{r,\theta}] = -\dot{H}, \quad E_{r,r} + r^{-1} (E_{\theta,\theta} + E_\theta \operatorname{ctg} \theta + 2E_r) = \rho_e;$$

$$j_r = E_r + \rho_{e0} \dot{u} / \gamma, \quad j_\theta = E_\theta + \rho_{e0} \dot{v} / \gamma. \quad (2)$$

Здесь точки обозначают производные по времени τ ; u и v , E_r и E_θ , j_r и j_θ - радиальные и тангенциальные перемещения, компоненты векторов напряженности электрического поля и плотности тока; H - ненулевая компонента вектора напряженности магнитного поля; ρ_e - плотность поверхностных зарядов; γ и η_e - безразмерные физические характеристики среды.

В частном случае пространства со сферической полостью радиуса r_0 предполагается, что на границе полости задана напряженность электрического поля:

$$E_\theta|_{r=r_0} = e_0(\tau, \theta). \quad (3)$$

Все искомые функции ограничены, а начальные условия однородные:

$$E_r|_{\tau=0} = \dot{E}_r|_{\tau=0} = E_\theta|_{\tau=0} = \dot{E}_\theta|_{\tau=0} = H|_{\tau=0} = \dot{H}|_{\tau=0} = 0. \quad (4)$$

Для решения начально-краевой задачи (1) – (4) искомые функции раскладываются в ряды по полиномам Лежандра и Гегенбауэра (коэффициентам соответствует нижний индекс « n ») и применяется преобразование Лапласа по времени τ (на изображение указывает индекс « L »; s - параметр преобразования).

Получено интегральные представления изображений коэффициентов вида

$$H_n^L(r, s) = -\eta_e^2 s \int_{r_0}^{\infty} G_{Hn}^L(r, \xi, s) l_H [u_n^L(\xi, s), v_n^L(\xi, s)] d\xi - \\ - \eta_e^2 G_{Hn0}^L(r, s) h_0^L [v_n^L(r_0, s), e_{0n}^L(s)], \quad h_0^L(v, e) = sv + (s + \gamma)e,$$

где G_{Hn}^L и G_{Hn0}^L - объемная и поверхностная функции Грина.

Показано, что функции Грина имеют удобную для аналитического преобразования форму в виде суммы произведений рациональных функций на экспоненты. Однако при этом возникают значительные трудности, связанные с наличием малого параметра η_e . Поэтому построены их квазистатические (при $\eta_e = 0$) аналоги

$$G_{Hn}^L(r, \xi, s) = G_{Hn}^c(r, \xi) = \xi^2 \left[\tilde{G}_{Hn}^c(r, \xi) h(\xi - r) + \tilde{G}_{Hn}^c(\xi, r) h(r - \xi) \right], \\ \tilde{G}_{Hn}^c(r, \xi) = -\frac{(n+1)r_0^{2n+1} + nr^{2n+1}}{n(2n+1)r^{n+1}\xi^{n+1}}, \quad G_{Hn0}^L(r, s) = G_{Hn0}^c(r) = -\frac{r_0^{n+2}}{nr^{n+1}}.$$

В качестве примеров получены явные формулы для параметров электромагнитного поля при различных законах движения $u(r, \tau)$ и $v(r, \tau)$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 15-08-00788) и гранта Президента РФ НШ-2029.2014.8.

ДЕМПФИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СЭНДВИЧ-ОБОЛОЧКИ ПРИ ЕЁ СВОБОДНЫХ И ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЯХ

Воробьев С.А.

(Гомель)

Внутреннее трение (сопротивление) в материалах элементов конструкций в большинстве случаев играет положительную роль при эксплуатации различных машин, механизмов под действием динамических нагрузок. Главным образом благодаря внутреннему сопротивлению происходит затухание свободных колебаний, весьма заметное ограничение амплитуд резонансных колебаний конструкций, наблюдается снижение уровня напряжений от импульсных воздействий и ударов. Указанные причины обуславливают необходимость учета сил внутреннего демпфирования в динамических расчетах, что позволяет их уточнить, а в конечном итоге повысить эксплуатационные характеристики и экономические показатели проектируемого оборудования.

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.

Демпфирующие 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,

$$a_k = (4 - \gamma_k^2) / (4 + \gamma_k^2), \quad b_k = 4\gamma_k^2 / (4 + \gamma_k^2),$$

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) $x_1 \equiv \phi$ и $x_2 \equiv x$ соответственно; $w(x_1, x_2, t)$ – прогиб; $\Psi_1^{(k)}(x_1, x_2, t) = -w_{,\phi} + \gamma_{\phi z}^{(k)}$ и $\Psi_2^{(k)}(x_1, x_2, t) = -w_{,x} + \gamma_{xz}^{(k)}$ – полные углы поворота прямолинейного элемента k -го слоя в координатных плоскостях ϕOz и xOz ; $\gamma_{\phi z}^{(k)}$, $\gamma_{xz}^{(k)}$ – углы поперечного сдвига в k -ом слое; $[\tilde{L}] = [\tilde{l}_{ij}]$ ($i, j = 1, \dots, 9$) – матрица, элементами которой являются линейные дифференциальные операторы по переменным x_1 и x_2 с постоянными комплексными коэффициентами; Запятая в нижнем индексе обозначает операцию дифференцирования по следующей за ней координате; $\{F\}$ – вектор нагрузок.

Рассмотрены следующие модельные задачи: воздействие мгновенного импульса $q_z(x_1, x_2, t) = \delta(t)\delta(x_1 - x_{1p})\delta(x_2 - x_{2p})$; стационарные вынужденные колебания оболочки от вибрационной нагрузки $q_n(x_1, x_2, t) = \delta(x_1 - x_{1p})\delta(x_2 - x_{2p})e^{i\omega t}$. Здесь $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака, x_{1p} и x_{2p} – координаты точки воздействия нагрузки. Решение начально-краевой задачи о свободных колебаниях оболочки построено на основе методов Фурье и преобразования Лапласа по времени. Стационарные вынужденные колебания исследовались на основе методов Фурье и комплексных амплитуд. Специальный выбор координатных функций у компонентов вектора перемещений $\{U\}$ в следующем виде:

$$u = \sum_{m,n} \tilde{U}_{mn}(t) \cos(m\phi) \sin(\hat{n}x), \quad v = \sum_{m,n} \tilde{V}_{mn}(t) \sin(m\phi) \cos(\hat{n}x),$$

$$w = \sum_{m,n} \tilde{W}_{mn}(t) \sin(m\phi) \sin(\hat{n}x), \quad \Psi_1^{(k)} = \sum_{m,n} \tilde{\Psi}_{1mn}^{(k)}(t) \cos(m\phi) \sin(\hat{n}x),$$

$$\Psi_2^{(k)} = \sum_{m,n} \tilde{\Psi}_{2mn}^{(k)}(t) \sin(m\phi) \cos(\hat{n}x), \quad \hat{n} = n\pi / L \quad (k = 1, 2, 3).$$

обеспечивает автоматическое удовлетворение однородных граничных условий свободного опирания кромок на жесткие неподвижные опоры, которые можно представить в перемещениях:

$$u_{,\phi} = v_{,x} = w = \Psi_1^{(k)}_{,\phi} = \Psi_2^{(k)}_{,x} = 0 \quad (k = 1, 2, 3),$$

Здесь $\tilde{U}_{mn}(t)$, $\tilde{V}_{mn}(t)$, $\tilde{W}_{mn}(t)$, $\tilde{\Psi}_{mn}^{(k)}(t)$, $\tilde{\Psi}_{2mn}^{(k)}(t)$ – комплексные функции действительной переменной t , L – длина оболочки.

На основе аналитических решений получены численные результаты изменения во времени прогибов, скоростей и ускорений точек поверхности оболочки, построены амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики. Сделана оценка влияния демпфирующих свойств материалов слоев на кинематические

параметры вынужденных колебаний оболочки. В качестве материала несущих слоев принимался алюминиевый сплав, а для заполнителя – полимер.

АНАЛИЗ ЛЕСОПИЛЬНОГО СТАНКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИРТУАЛЬНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Гаврюшин С.С., Блохин М.А., Фунг Ван Бинь

(Москва)

В докладе излагается методика виртуального моделирования нового типа лесопильного оборудования - станка с круговым поступательным движением пильных полотен, так называемого, «коленчатого» станка [1,2].

Обсуждаемое оборудование характеризуется малой металлоёмкостью, простотой обслуживания, низкими энергозатратами и предназначено для процесса распиловки, роспуска пиловочника на доски, изготовления паркетных досок и ламелей, а также для распиловки ценных и редких пород деревьев. Рассматривается задача динамической балансировки пильного блока (пильной рамки) и отстройки резонансных частот пильных полотен. В рамках концепции жизненного цикла продукции реализованы этапы проектирования, расчета и изготовления лесопильного станка с использованием 3D-виртуальной параметрической модели в средах программных комплексов NX Unigraphics [3] и ANSYS [4]. Основные детали лесопильного станка моделируются параметрическим образом по заданным размерам с учетом свойств реальных материалов и имеют точные массовые характеристики. Параметризация основных конструктивных размеров позволила рассчитать по единой методике на прочность и жесткость однотипные конструктивные исполнения станка, и оценить влияние смещения величины эксцентриситета растяжения полотна на спектр собственных частот, что, в свою очередь, позволило решить задачу отстройки резонансных колебаний пильных полотен за пределы рабочей зоны. С помощью кинематической симуляции 3D-виртуальной модели наглядно проиллюстрирован принцип работы пильного станка. Результаты численного моделирования использовались при подготовке программ изготовления деталей на станках с числовым программным управлением.

Литература

1. *Гаврюшин С. С., Прокопов В. С., Блохин М. А.* «Разработка методики численного анализа динамических характеристик многопильного станка с круговым поступательным движением дереворежущих полотен». Вестник МГТУ «Машиностроение» - М.: 2010, №4(81), с. 108-118.

2. *Гаврюшин С.С., Прокопов В. С.* «Исследование динамического поведения многопильного станка с круговым поступательным движением дереворежущих полотен». Известия ВУЗов. Машиностроение. М.: 2011, №1, с. 14-17.

3. *Гончаров П.С. и др.* NX для конструктора-машиностроителя. М.: ДКМ Пресс, 2010. 504с.

4. *Гаврюшин С.С., Барышникова О.О., Борискин О.Ф.* Численный анализ элементов конструкций машин и приборов. – 2-е изд., испр. – М.: Издательство МГТУ им Н.Э. Баумана, 2014. – 479с.

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТАХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Гетманов А.Г., Мартыросов М.И., Рабинский Л.Н.

(Москва)

В настоящее время на большинство металлических деталей машиностроительных конструкций наносятся различные типы покрытий. Это обусловлено хорошими защитными антикоррозионными характеристиками многих покрытий, а также их декоративными свойствами. Такое сочетание металлической основы и самого покрытия обеспечивает конструкции необходимые эксплуатационные характеристики. Однако при расчетах на прочность не учитываются прочностные свойства самого покрытия. Это обусловлено недостатком сведений о механических характеристиках используемых покрытий, в том числе и полимерных покрытий порошкового типа. Состав порошковых покрытий определяется следующими основными видами сырьевого материала: смолой, отвердителем, пигментами и добавками. Смолы придают краске основные свойства, отвердители используются для полимеризации смолы при заданной температуре, пигменты предназначены для получения цвета и декоративного эффекта (например, для регулирования степени глянца), целевые модифицированные добавки служат для придания специальных свойств (например, для снижения температуры сушки, увеличения твердости поверхности и др.).

В работе проводятся экспериментальные и теоретические исследования по определению механических характеристик образцов из листовой прокатной стали 08ПС (нелегированная конструкционная сталь с малым содержанием углерода) и алюминиевого сплава (лист) 1163РДТВ системы Al-Cu-Mg, на которые наносятся различные защитные покрытия полимерного типа. Образцы для испытаний представляют собой прямоугольные пластины (полосы) 12 мм x 120 мм различной толщины (0,8 мм, 1,0 мм, 1,5 мм и 2,0 мм). Перед нанесением лакокрасочных покрытий на исследуемые образцы проводилась предварительная подготовка поверхностей: обезжиривание, а затем фосфатирование (для стали) и

хроматирование (для алюминиевого сплава). После этой операции наносилась полимерная порошковая краска на эпоксидно-полиэфирной основе электростатическим способом. Использовались краски фирм AKZO NOBEL (Голландия) и EUROPOLVERI (Италия). Далее для повышения механических свойств и придания поверхности дополнительной износостойкости, долговечности и ударопрочности на окрашенную поверхность наносился керамический лак CeramiClear Deltron D8105 фирмы PPG Industries (США). Этот лак содержит керамические наночастицы, которые после нанесения лака на поверхность, затвердевая в печи полимеризации, образуют густую сетчатую структуру, которая выступает в качестве защитного слоя окрашенной металлической поверхности, улучшает ее эксплуатационные свойства. Толщина покрытия контролировалась электронным толщиномером QuaNix (Германия). Нанесение покрытий проводилось в покрасочной камере фирмы Gema (Швейцария).

Проводились эксперименты на центральное растяжение и четырехточечный изгиб, сравнивались механические характеристики исследуемых образцов с аналогичными образцами без покрытия, а также с образцами, на которые на полимерную порошковую краску наносились различные упрочняющие полиуретановые лаки или декоративные лаки, не являющиеся наноструктурированными. Эти эксперименты проводились на универсальной испытательной машине INSTRON (Великобритания), модель 5960 (при комнатной температуре). Дается сравнение полученных экспериментальных результатов с данными численного моделирования методом конечных элементов с помощью программного комплекса MSC.PATRAN/MSC.NASTRAN.

С помощью измерительного комплекса NanoTest 600 (Великобритания) проводилось наноиндентирование изучаемых покрытий. Использовались различные инденторы, входящие в комплект измерительного комплекса. Определялись твердость покрытия по Бринеллю, приведенный модуль упругости, модуль упругости краски и лака, податливость контакта и ряд других характеристик. Теоретические расчеты выполнялись с помощью программного обеспечения на основе модели Оливера-Фарра.

На основании проведенных исследований на макро- и микроуровнях выявлена корреляция полученных данных, подтверждена работоспособность применяемой теоретической модели, выработаны практические рекомендации по использованию порошковых лакокрасочных покрытий для нанесения на металлические поверхности элементов машиностроительных конструкций с целью придания им повышенной прочности, износостойкости и долговечности.

На образцах демонстрируются различные порошковые покрытия: глянцевое, шагренё, матовое, антик, муар, металлик, молотковое. Цвет соответствует международному каталогу RAL.

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), а также гранта Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 11-01-00540_а).

ЧАСТОТНО-МОДАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ МНОГОФАКТОРНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

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

(Москва)

При многофакторном нагружении сложных конструкций возникают сложности с определением влияния отдельных действующих силовых факторов на устойчивость конструкции в целом. Стандартные методы анализа устойчивости, основанные на эйлеровой теории смежных равновесных состояний, сводят задачу к решению проблемы собственных значений для множителя, масштабирующего сразу всю совокупность приложенных к конструкции нагрузок. Тем самым предмет исследования ограничивается однопараметрическим нагружением и исключается возможность получить коэффициенты запаса по устойчивости для отдельных компонент нагружения.

В работах [1], [2] и [3] предложен динамический, частотно-модальный метод оценки запаса по устойчивости крупногабаритных пространственных конструкций в условиях действия многокомпонентного нагружения. При этом ставится задача оценки несущей способности конструкции в отношении каждого из указанных факторов в отдельности при условии действия остальных компонент. В основе методики лежит подход, основанный на теории динамической устойчивости, в котором для определения критической нагрузки рассматривается задача о собственных малых колебаниях предварительно нагруженной конструкции. При таком подходе величина статической критической нагрузки соответствует 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. Варьирование масштабирующего множителя одной из компонент нагружения 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 как при наличии, так и в отсутствие остальных компонент.

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 пре-процессором 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.

Исследовано влияния возмущающих факторов (таких как: начальный прогиб стержней, эксцентриситет приложения нагрузки, перерезывающая сила) на устойчивость простых стержневых конструкций. Рассмотрено поведение отдельных стержней и в составе конструкции при воздействии критических и за-критических нагрузок.

Проведенные исследования конструкций в условиях многофакторного нагружения показывают возможность увеличения запаса устойчивости более чем на 15% по сравнению с данными расчетов по эйлеровой теории. Показано, что благодаря начальным возмущениям неустойчивость может сниматься, трансформируясь в снижение несущей способности склонных к потере устойчивости стержней.

С помощью предложенной методики выполнена оценка запасов по устойчивости для отдельных факторов нагружения конструкций высотной радиобашни и наземного стартового комплекса для РН «Союз».

Выявленные эффекты потери устойчивости в сложных конструкциях подтверждают актуальность предложенной методики и перспективность ее применения при проектировании сооружений.

Литература

1. *Меньшиков А.А., Гнездилов В.А., Григорьев В.Г., Курников И.С.* «Методика покомпонентного анализа запасов устойчивости крупногабаритных пространственных конструкций при действии многофакторных нагрузок» // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.* – 2014. - № 5 – С. 51-60.

2. *Гнездилов В.А., Григорьев В.Г., Курников И.С., Меньшиков А.А.* Разработка эффективных методов и алгоритмов исследования устойчивости крупногабаритных пространственных конструкций. - *Материалы XX Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.1.* – М.: ООО «ТР-принт», 2014. - С. 54-55.

3. Гнездилов В.А., Григорьев В.Г., Курников И.С., Меньшиков А.А. Методика покомпонентного анализа запасов устойчивости крупногабаритных пространственных конструкций при действии многофакторных нагрузок. Системный анализ, управление и навигация: Тезисы докладов. Сборник.- М.: Изд-во МАИ, 2014. – С. 42-45.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАЗДУВА ПОДКРЕПЛЕННОЙ КОЛЬЦАМИ ЭЛАСТОМЕРНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Гимадиев Р.Ш., Гимадиева Т.З., Паймушин В.Н.

(Казань)

Приложениями теории конечных деформаций тонких оболочек при больших перемещениях являются, в частности, задачи механики эластомеров (несжимаемых резиноподобных материалов). Одной из характерных из них является задача о надувании тонкого резинового шарика цилиндрической формы внутренним давлением. Такой процесс нагружения шариков следует разделить на два этапа. На первом из них увеличение диаметра и длины шарика возможно только при нарастающем давлении, а на втором этапе дальнейшее увеличение размеров происходит путем накачивания в шарик воздуха при уменьшающемся давлении. Механическим объяснением этому процессу является наступление статической неустойчивости шарика в условиях двухстороннего несимметричного растяжения, математическому моделированию которого в статической постановке была посвящена работа [1], а в динамической постановке – работа [2].

В данной работе в динамической постановке исследуется процесс раздува цилиндрической оболочки, изготовленной из эластомера и имеющей подкрепляющие кольца (рис.1). Для оболочки используются основные уравнения, приведенные в работе [2].

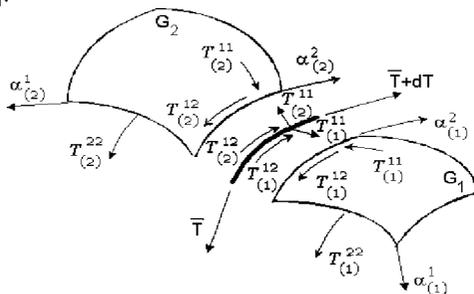


Рис.1

Численный алгоритм решения сформулированной пространственной задачи динамики раздува реализуется на основе метода конечных разностей по явной схеме. В примерах расчета рассматривается случай, когда торцы оболочки при деформации остаются в своих плоскостях и свободно могут изменяться по радиусу (рис.2, показан режим потери устойчивости оболочки с двумя кольцами усиления при внутреннем давлении $P=0,3$).

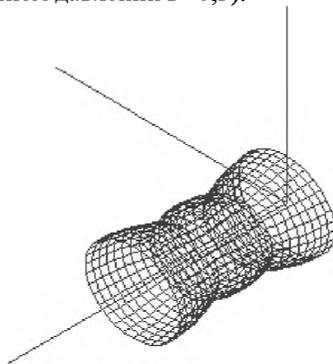


Рис. 2

Выявлены режимы динамического неустойчивого раздува оболочки, которые хорошо согласуются с полученными ранее [1] результатами по исследованию статической неустойчивости оболочки.

При составлении уравнений движения элементов оболочки и подкрепляющих колец используются построенные К.Ф. Черныхом [3] физические соотношения, связывающие истинные напряжения по В.В. Новожилову [4] с истинными деформациями. Для построения их решений методом конечных разностей по явной схеме используется алгоритм, изложенный в работе [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 15-48-02316, 15-38-21099, 15-41-02569)

Литература

1. *Паймушин В.Н.* Теория тонких оболочек при конечных перемещениях и деформациях, основанная на модифицированной модели Кирхгофа-Лява // Прикладная математика и механика. 2011. Т. 75. Вып. 5. С. 813-829
2. *Гимадиев Р. Ш., Гимадиева Т. З., Паймушин В. Н.* О динамическом процессе раздувания тонких оболочек из эластомеров под действием избыточного давления. // Прикладная математика и механика. 2014. Т. 78. Вып. 2. С. 236-248.
3. Черных К.Ф. Нелинейная теория упругости в машиностроительных расчетах. Л.: Машиностроение, 1986, 336с.

4. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории упругости. М.; Л.: Гостехиздат, 1948. 212 с.

5. *Гимадиев Р.Ш.* Динамика мягких оболочек парашютного типа. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2006. – 208.

ДИСЛОКАЦИОННЫЙ ВКЛАД В ФОН ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ

Горшков А.А., Коровайцева Е.А., Ломовской В.А.

(Москва)

Анализ диссипативных процессов по спектрам внутреннего трения в различных по химической природе материалах показывает, что на температурной зависимости тангенса угла сдвига фазы $\operatorname{tg} \delta = f(T)$ может наблюдаться как фон внутреннего трения, слабо и монотонно возрастающий при гомологических температурах $\theta < 0,2 \div 0,4$ и экспоненциально возрастающий при $\theta > 0,4$, так и пики потерь, накладываемые на общий фон внутреннего трения. Такие пики свидетельствуют о том, что кристаллическая система не может быть представлена как одна структурно-кинематическая подсистема, из которой состоит вся система в целом. При температурах $\theta < 0,2$ общий фон внутреннего трения определяется диссипацией энергии в той или иной степени от всех подвижных структурно-кинетических элементов различных подсистем: дислокаций, примесей, границ зерен и т.п.

В данной работе рассмотрен механизм гистерезисного дислокационного внутреннего трения при колебательных движениях сегментов дислокаций в рельефе потенциала Пайерлса, т.е. взаимодействия дислокаций с полем внутренних напряжений. При этом проанализированы следующие модели дислокационных механизмов внутреннего трения:

- 1) модель незакрепленных дислокаций (Эшелби);
- 2) модель закрепленных по границам дислокаций (Кёлера);
- 3) модель закрепленных по всей длине дислокаций (модель Кёлера-Гранато-Люке).

Сопоставление результатов расчета фона внутреннего трения, возникающего за счет гистерезисного механизма подвижности дислокаций в металлических системах, показало, что вклад данного механизма в спектр внутреннего трения значительно меньше, чем наблюдаемый.

Таким образом, если учитывать, что исследуемая кристаллическая система состоит из совокупности квазинеzáвисимых по реакции на внешнее воздействие структурно-кинетических подсистем, то общий фон внутреннего трения будет включать не только потери от гистерезисного механизма колебательных движе-

ний дислокаций, но и потери от других механизмов внутреннего трения, в частности релаксационного от подвижности других дефектов структуры.

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

ВЛИЯНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССЫ ПЭ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ГИСТЕРЕЗИСНЫХ И РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПОТЕРЬ

Горшков А.А., Ломовской В.А., Мазурина С.А.

(Москва)

Проведенные исследования физико-механических характеристик промышленных полиэтиленов с различной степенью кристалличности и молекулярной массы в статических и динамических режимах внешнего деформирующего воздействия позволили определить как области упругой реакции этих материалов, так и области локальной неупругости. Исследование областей локальной неупругости проводилось по изменению локальных диссипативных потерь на спектрах внутреннего трения в области амплитудной независимости реакции исследуемых систем на внешнее деформирующее воздействие. Границы амплитуд внешнего деформирующего усилия, соответствующие упругой реакции, определялись квазистатическим методом. Степень кристалличности ПЭ определялась методами ДСК, что позволило выявить интервал температур эндотермического процесса, связанного с плавлением кристаллической фазы. Динамические методы исследования проведены как в режиме свободно затухающих крутильных колебаний при частоте порядка 1 Гц, так и в режиме вынужденных изгибных нерезонансных колебаний в диапазоне частот от 0,1 Гц до 50 Гц. Полученные спектры внутреннего трения выявили два локальных диссипативных процесса, примерно равной интенсивности, но наблюдаемых в различных температурных интервалах. Следует отметить, что эти процессы имеют различную природу внутреннего трения. Один процесс связан с плавлением кристаллической фазы ПЭ, а второй процесс связан со стеклованием аморфной фазы и имеет релаксационный механизм своего проявления. Оба процесса диссипативных потерь накладываются на фон внутреннего трения, имеющий относительно высокую интенсивность и гистерезисный механизм внутреннего трения до температур порядка 20 градусов. Проведен расчет релаксационных характеристик процесса стеклования аморфной фазы и их зависимость от степени кристалличности и молекулярной массы. Кроме того было показано, что технологический режим получения ПЭ в сложных напряженно-деформирующих условиях внешнего воздействия (сжатие и сдвиг по различным направлениям в пространстве и больших давлениях) приводит к резкому изменению физико-механических характеристик ПЭ.

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

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ КРИСТАЛЛИЧНОСТИ НА ОБЛАСТИ ЛОКАЛЬНОЙ НЕУПРУГОСТИ В ПОЛИКАРБОНАТЕ

Горбатенко К.И., Горшков А.А., Ломовской В.А.

(Москва)

Исследование температурных зависимостей модуля сдвига при постоянной частоте колебательных процессов в поликарбонатах показало, что в определенных температурных интервалах наблюдается резкое и немонотонное изменение величины модуля сдвига. Сопоставление данных локальных температурных областей изменения модуля со спектрами внутреннего трения показывает, что данные немонотонного изменения модуля сдвига проявляются в той области температур, в которой на спектре внутреннего трения наблюдается пик диссипативных потерь. Интенсивность диссипативных потерь на спектре внутреннего трения в области проявления максимума влияет на характер изменения модуля сдвига; чем выше интенсивность потерь в пике внутреннего трения, тем больше дефект модуля. При этом следует отметить, что дефект модуля наблюдается не для всех интервалов температур, где проявляются пики диссипативных потерь на спектре внутреннего трения. Это позволяет классифицировать механизмы внутреннего трения. В тех интервалах температур, где дефектов модуля потерь не наблюдается, механизм внутреннего трения не является релаксационным. Экспериментально изучено и теоретически проанализировано влияние распада локальных кристаллических образований в структуре поликарбоната на спектре внутреннего трения и на температурной зависимости модуля сдвига. Предполагается, что распад локальных кристаллических образований ведет к возникновению пика потерь на спектре внутреннего трения, но не дает интенсивного дефекта модуля. Данный механизм внутреннего трения может быть отнесен не к релаксационному, а к гистерезисному. Это подтверждается незначительным увеличением общей интенсивности фона внутреннего трения в амплитудно-зависимой области. Проанализирована зависимость дефектов модуля для релаксационных процессов и интенсивности фона диссипативных потерь на спектре внутреннего трения от степени кристалличности поликарбоната и его молекулярной массы.

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

К ВОПРОСУ ВЫЧИСЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ДАРСИ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМ РЕЖИМЕ МЕТОДОМ РЕГРЕССИОННОГО АНАЛИЗА

Горшков-Кантакузен В.А.

(Москва)

В гидродинамике [1-3], расчет трубопровода осложнен вычислением потерь напора по длине, который для труб круглого сечения определяется по формуле, предложенной Ю. Вейсбахом (L. J. Weisbah, 1845) и А. Дарси (H. Darcy, 1857).

В случае ламинарного течения жидкости ($Re < 2320$), коэффициент Дарси выражается формулой Стокса и в зависимости от критерия Рейнольдса подчиняется линейному закону.

В случае турбулентного течения жидкости ($Re > 10^4$) наблюдаются хаотические колебания мгновенных значений давления, скорости, температуры и плотности относительно некоторых средних значений, вследствие зарождения, взаимодействия и исчезновения вихревых движений различных масштабов, что значительно затрудняет вычисление коэффициента Дарси и моделирование турбулентности, что и по сей день остается достаточно актуальной и неразрешимой проблемой гидродинамики и механики сплошных сред.

Впервые наиболее исчерпывающие данные по определению коэффициента Дарси были представлены И. И. Никурадзе в виде графиков зависимости λ_r от Re . Каждая зона турбулентного режима описывается степенными функциями: зона гладкостенного трения – формулой Блазиуса ($10^4 < Re < 10^5$), формулой Никурадзе ($10^5 < Re < 3,4 \cdot 10^6$), формулой Женеро ($10^4 < Re < 2 \cdot 10^7$); зона квадратического трения – формулой Альтшуля и формулой Конакова; зона гидравлически шероховатых труб (квадратического трения) – формулой Никурадзе, формулой Шифринсона и другими, что значительно затрудняет вычисления и уменьшает точность как на границах зон, так и на границах действия формул в пределах зоны (10^4 ; 10^5 и проч.). Так, при $Re = 10^4$ коэффициент Дарси принимает следующие значения: 0,03164 (по Блазиусу); 0,030779 (по Конакову); 0,031588 (по Альтшулю); 0,036654 (по Женеро). Поэтому, возникла необходимость в создании одной универсальной формулы, описывающей зависимость λ_r от Re на всех зонах при достаточной точности. Для этого был использован метод регрессионного анализа [4, 5].

В общем случае, метод регрессионного анализа используется для математического описания полученных экспериментальных данных, за которые, в данном случае, были взяты значения λ_r для гладких труб при соответствующих значениях Re , т.к. $\lambda_r = f(Re)$, потому что в случае гладких труб эквивалентная относительная шероховатость Δ_s равна нулю. Полученный график представляет степенную функцию. Степенное уравнение регрессии имеет вид: $y = a \cdot x^b$; или в

данном случае: $\lambda_r = a \cdot \text{Re}^b$. Тогда система нормальных уравнений принимает вид:

$$\begin{cases} n \lg a + b \sum_{i=1}^n \lg \text{Re}_i = \sum_{i=1}^n \lg \lambda_i \\ \lg a \sum_{i=1}^n \lg \text{Re}_i + b \sum_{i=1}^n (\lg \text{Re}_i)^2 = \sum_{i=1}^n \lg \text{Re}_i \lg \lambda_i \end{cases}$$

Подставив соответствующие значения λ_r и Re получим: $a = 0,2579$; $b = -0,231$. Тогда формула будет иметь вид: $\lambda_r = 0,2579 \text{Re}^{-0,231}$ (для гидравлически гладких труб). В случае шероховатых труб ($\Delta_s > 0$), примет вид:

$$\lambda_r = 0,2579(\text{Re} + \Delta_s)^{-0,231}$$

Таким образом, выведенная формула хорошо описывает зависимость $\lambda_r = f(\text{Re}; \Delta_s)$ при турбулентном режиме и, в отличие от большинства аналогичных формул (Блазиуса, Никурадзе и др.) работает на всех зонах турбулентного режима, исключая при этом неточность, что позволяет быстрее и проще вычислять потери напора. Она также может служить обобщенной моделью турбулентного режима, в рамках зависимости критерия Рейнольдса (сил скорости и вязкости) и эквивалентной относительной шероховатости, и стать началом решения задачи моделирования турбулентности.

Литература

1. Reynolds O., An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. Phil. Trans. Roy. Soc., London, 1883, v.174
2. Ландау Л.Д, Лифшиц Е. М. Гидродинамика, — М.: Наука, 1986. — 736 с.
3. Башта Т. М., Руднев С. С., Некрасов Б. Б. и др. Гидравлика, гидромашинны и гидроприводы: Учебник для машиностроительных вузов. — 2-е изд., перераб. — М.: Машиностроение, 1982.
4. Draper N., Smith H. Applied Regression Analysis = Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. — 3-е изд. — М.: «Диалектика», 2007. — 912 с.
5. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений, - М.: Наука, 1968. - 288 с.
6. Чугаев Р. Р. Гидравлика. Л.: «Энергия», 1975. - 599 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛАСТОМЕРОВ

Горячева И.Г.

(Москва)

Эластомеры, такие как резины, высокоэластичные полимеры, а также композиционные материалы на их основе широко используются как элементы трибосопряжений (колесные пары, уплотнения и т.д.). Эти материалы при фрикционном взаимодействии характеризуются диссипацией энергии за счет их несовершенной упругости. Возникающая при этом сила трения, а также контактные характеристики существенно зависят от механических и релаксационных свойств поверхностных слоев взаимодействующих тел. Другим фактором, в значительной степени влияющим на функциональные характеристики таких трибосопряжений, является микрогеометрия поверхностей их элементов. Именно она определяет частоту взаимодействия материала и время его нахождения в контакте с контртелом. Исследование совместного действия этих факторов является важным при разработке способов управления силами трения и функциональными характеристиками трибосопряжений, элементы которых обладают несовершенной упругостью их поверхностных слоев.

В докладе представлены некоторые математические модели, позволяющие изучить влияние параметров микрогеометрии поверхности на контактные характеристики и силу трения при скольжении жесткого тела, поверхность которого имеет регулярный рельеф, по тонкому вязкоупругому слою, сцепленному с жестким или упругим основанием. Поскольку условия взаимодействия также оказывают существенное влияние на силу трения, то рассмотрены отдельно случаи граничного и сухого трения, для которого существенными становятся силы молекулярного взаимодействия поверхностей.

С целью изучения фрикционного взаимодействия эластомеров в условиях граничного трения построено решение плоской контактной задачи о скольжении с постоянной скоростью упругого индентора, форма контактирующей поверхности которого описывается периодической функцией, по поверхности тонкого вязкоупругого слоя, сцепленного с упругим основанием [1,2]. Рассмотрены две различные модели вязкоупругого слоя – модель Максвелла и модель Кельвина, обладающая ограниченной ползучестью, для которой соотношение между перемещениями верхней границы слоя v_3 в направлении, перпендикулярном к поверхности трения, и нормальным давлением $p(x)$ имеет следующий вид:

$$v_3 + T_e \frac{dv_3}{dt} = \frac{h}{E_L} \left(p + T_\sigma \frac{dp}{dt} \right) \quad (1)$$

где T_e и T_σ - времена последействия и релаксации, E_L - длительный модуль упругости, h - толщина слоя. Полученные решения использованы для анализа влияния свойств тонкого поверхностного слоя и параметров рельефа поверхности контртела на распределение контактных и внутренних напряжений, а также на размер и смещение единичных зон контакта. Показано, что область контакта и контактные давления на ней распределены несимметрично относительно оси симметрии отдельного выступа, при этом сближение выступов приводит к уменьшению этой несимметрии.

Пространственная контактная задача о скольжении штампа с периодическим рельефом по вязкоупругому основанию, описываемому одномерной моделью (1) со спектром времен релаксации исследована в [3]. Проведенный расчет контактных давлений и деформационной составляющей силы трения для различных скоростей скольжения и различных форм поверхности (со сферическими выступами и двоякопериодической синусоидальной) позволил установить характер зависимости контактных характеристик и коэффициента трения от скорости скольжения и геометрии выступов.

С целью изучения фрикционного взаимодействия эластомеров в условиях несмазанных поверхностей построено решение контактной задачи (в плоской и пространственной постановках) о скольжении жесткого тела с регулярным рельефом по границе вязкоупругого основания с учетом молекулярного притяжения поверхностей в зазоре между ними. Проведен анализ влияния параметров микрогеометрии поверхности на характер взаимодействия поверхностей (насыщенный или дискретный контакт), на контактные характеристики (распределение контактных давлений, область фактического контакта) и силу трения при разных скоростях скольжения взаимодействующих тел. В частности, показано, что наличие адгезионного взаимодействия приводит к существенному увеличению фактической площади контакта и что контакт может существовать даже при отрицательных внешних нагрузках (разрывающих поверхности). При этом деформационная составляющая силы трения всегда действует в направлении, противоположном движению волнистого тела [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №14-29-00198).

Литература

1. Goryacheva I.G., Sadeghi F., Nickel D. Internal stresses in contact of rough body and a viscoelastic layered semi-infinite plane // ASME J.Tribol. 1996. Vol.118, No. 1. P.131-136
2. Горячева И.Г., Маховская Ю.Ю. Влияние несовершенной упругости поверхностного слоя на контактные характеристики при скольжении шероховатых упругих тел // Трение и износ. 1997. Т.18, №1. С.5-12

3. Б.В. Шептунов, И.Г. Горячева, М.А. Ноздрин, Контактная задача о движении штампа с регулярным рельефом по вязкоупругому основанию, Трение и износ. – 2013. – Т. 34. – № 2. – С. 109–119.

4. И.Г.Горячева, Ю.Ю.Маховская, Моделирование трения на разных масштабных уровнях // Изв. РАН МТТ, 3, с.117-127, 2010.

О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УСТОЙЧИВОСТИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ

Грибков В.А., Хохлов А.О.

(Москва)

Метод, основанный на теории Флоке-Ляпунова, приобрел репутацию одного из наиболее эффективных численных методов решения задач устойчивости периодических движений. Рассмотрение реальных объектов (например, объектов космической техники таких, как космические тросовые системы) приводит к дискретным моделям высокой размерности с большим числом степеней свободы. Однако при интегрировании систем обыкновенных дифференциальных уравнений большого порядка с целью получения матриц монодромии и вычисления мультипликаторов, общее время решения задачи устойчивости (определения границ области устойчивости при наличии различных проектных вариантов) оказывается значительным.

Использование теории возмущений существенно сокращается время расчетов за счет разделения матрицы коэффициентов системы дифференциальных уравнений на составные части и получения матрицы монодромии в виде матричного ряда с частотным параметром в явном виде. Полученное итоговое выражение для матрицы монодромии позволяет строить решение задачи устойчивости с различной точностью в зависимости от удерживаемого числа членов ряда. Снижается время решения задачи (повышается эффективность получения расчетных результатов).

Весь алгоритм теории возмущений применительно к системам, описываемым обыкновенными дифференциальными уравнениями с периодическими коэффициентами, представлен в векторно-матричном виде, что делает удобным его реализацию в вычислительной программе. Проанализированы несколько вариантов реализации алгоритма с целью выбора наиболее эффективного в указанном выше смысле.

Выполнена оценка сходимости алгоритма решения задачи устойчивости по теории Флоке-Ляпунова в варианте теории возмущений. В качестве эталонных данных использованы результаты, полученные по классическому варианту теории.

Рассмотрен пример решения задачи параметрической стабилизации статически неустойчивого объекта с использованием классической схемы и в модифицированном варианте с использованием теории возмущений.

Полученные результаты говорят о повышении эффективности решения задач устойчивости систем обыкновенных дифференциальных уравнений с периодической матрицей коэффициентов при использовании модифицированного метода.

АЭРОДИНАМИКА И АЭРОУПРУГОСТЬ МЕМБРАННЫХ КРЫЛЬЕВ БОЛЬШОГО УДЛИНЕНИЯ

Гришанина Т.В., Шклярчук Ф.Н.

(Москва)

Рассматривается дозвуковое обтекание деформируемого прямого крыла большого удлинения для сверхлегких высотных самолетов большой продолжительности полета. Крыло состоит из передней тонкостенной балки (лонжерон с обшивкой носика) и задней балки (перекладины), которые соединены между собой тонкостенными, недеформируемыми в своей плоскости нервюрами и расположенными между ними мембранами с профилированными слоями легкого пенопласта. Натяжение мембран в направлении профиля регулируется путем относительного перемещения задней балки в плоскости крыла за счет малых изменений длин нервюр. Это влияет на деформации профиля и на распределение аэродинамического давления по поверхности крыла.

Разработана математическая модель для расчета аэродинамических и аэроупругих характеристик мембранного крыла большого удлинения с использованием гипотезы плоского обтекания поперечных сечений (профилей) крыла. Сначала решается плоская задача аэроупругости для профиля крыла с мембранной при заданных поперечном перемещении и угле закручивания передней балки и относительном перемещении задней балки (или натяжении мембраны). Мембрана при малых поперечных перемещениях представляется линейной конечно-элементной моделью, а аэродинамическое давление определяется в зависимости от поперечных перемещений (местных углов атаки) профиля на основании точного решения. Далее из полученных уравнений статической аэроупругости профиля переменные, представляющие узловые перемещения мембраны, исключаются и определяются приведенные подъемная сила и момент тангажа деформируемого профиля в зависимости от перемещения и угла закручивания передней балки, а также от натяжения мембраны.

Далее крыло представляется в виде системы отсеков (секций между нервюрами). Аэродинамические нагрузки в пределах длины отсека аппроксимируются линейными функциями, а передняя балка отсека рассматривается как конечный

элемент, работающий на изгиб, поперечный сдвиг и кручение. Получены уравнения аэроупругости составного мембранного крыла с управляемыми за счет натяжения мембран аэродинамическими характеристиками.

На примере расчета оценено влияние натяжения мембраны на распределение аэродинамического давления и на аэродинамические характеристики профиля. Показано, что за счет изменения натяжения мембраны можно управлять моментом тангажа профиля без элерона. При определенных критических отношениях натяжения мембраны и скоростного напора может происходить дивергенция профиля с выворачиванием натянутой мембраны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 15-08-04786).

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕМПФИРУЮЩИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Гюнал И., Паймушин В.Н., Фирсов В.А., Шишкин В.М.

(Казань, Киров)

Предложен теоретико-экспериментальный метод, существенно расширяющий возможности и область применения международного стандарта ASTM E756 [1], для исследования демпфирующих свойств материалов:

- в низкочастотном диапазоне от 0 до 100 Гц;
- с низкими жесткостными свойствами (модулем упругости $E < 100$ МПа);
- в условиях значительных амплитуд перемещений;
- с возможностью определения зависимостей энергопоглощающих свойств от амплитудных значений деформаций.

Предложенный метод использует известную методику (см., например, [2]), основанную на непосредственной обработке опытных виброграмм изгибных затухающих колебаний консольно закрепленных тест-образцов различной структуры [1,3], используемых для исследования демпфирующих свойств материала как в условиях его растяжения-сжатия, так и поперечного сдвига.

Для реализации предложенного метода была создана специальная экспериментальная установка (рис.), а также разработан алгоритм аппроксимации экспериментальных данных опытных виброграмм колебаний для определения частоты и логарифмического декремента колебаний в зависимости от амплитуды колебаний с точностью достаточной для уверенной фиксации амплитудных и частотных характеристик даже при амплитуде порядка долей миллиметра.

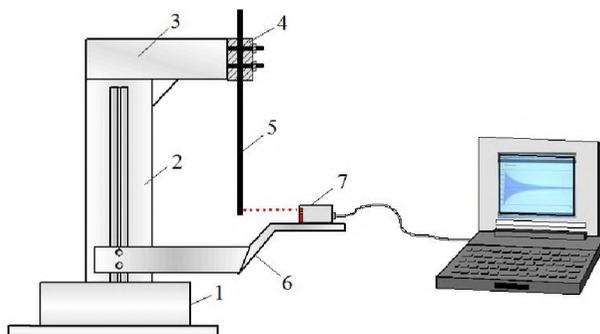


Рис. Схема экспериментальной установки

Это достигается использованием триангуляционного лазерного датчика фирмы RIFTEK (RF603-X/100), обеспечивающего точность измерения амплитуды колебаний 0,01 мм в цифровом формате, а также разработанного математического обеспечения, позволяющего осуществлять до 2000 замеров амплитуды в секунду.

Следует отметить, что исследование демпфирующих свойств материалов в заявленном низкочастотном диапазоне можно осуществить лишь при вертикальном расположении испытываемых тест-образцов.

В рамках предложенной методологии осуществлены параметрические исследования динамического поведения тест-образцов различных геометрических параметров из стали и дюралюминия в качестве основы, а также тест-образцов трехслойной структуры для определения демпфирующих свойств технической резины.

Результаты этих исследований позволили сделать следующие выводы:

1. Выявлено существенное влияние аэродинамического сопротивления на параметры демпфирования исследуемых тест-образцов. Так для образцов толщиной 1 мм, шириной $b = 10 \div 50$ мм, длиной $L = 150 \div 300$ мм, имеющих частоты первого тона изгибных колебаний в диапазоне 8 – 32 Гц, аэродинамическое демпфирование составляет до 100% для стали и до 350% для дюралюминия (Д16АТ) от собственных демпфирующих свойств материала. Для рекомендуемой стандартом [1] ширины образца $b = 10$ мм аэродинамическое демпфирование достигает 20% и 120% соответственно. Полученные результаты позволили разработать теоретико-экспериментальный метод определения аэродинамической составляющей демпфирования затухающих колебаний и построить аналитическое выражение для ее определения [4], что необходимо для оценки собственных демпфирующих свойств материала.

2. Обнаружено существенное снижение динамического модуля упругости по сравнению с его статическим номиналом для алюминиевого сплава Д16АТ

(до 30%) и для стали Ст.3 (до 10%), что необходимо учитывать во всех исследованиях динамического поведения конструкций.

Представлены результаты, которые свидетельствуют о перспективности использования предложенного теоретико-экспериментального метода для исследования демпфирующих свойств материалов с широким спектром физико-механических свойств.

Исследование выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00667).

Литература:

1. ASTM, "E-756-05: Standard test method for measuring vibration-damping properties of materials," ASTM International, PA, 2010.
2. Пановко Я. Г., Внутреннее трение при колебаниях упругих систем, Москва: Изд.Физ-мат.Лит., 1960.
3. Nashif A. D, Jones D. I. G. and Henderson J. P. Vibration damping, John Wiley & Sons, 1986.
4. Egorov A. G., Kamalutdinov A. M., Nuriev A. N. and Paimushin V. N., "Theoretical-Experimental Method for Determining the Parameters of Damping Based on the Study of Damped Flexural Vibrations of Test Specimens 2. Aerodynamic Component of Damping," Mechanics of composite materials, vol. 50, no. 3, pp. 267-278, 2014.

ПОСТРОЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧАХ МЕХАНОДИФфуЗИИ

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

(Москва)

Решение многих нестационарных связанных задач механики сплошной среды связано с большими математическими трудностями. Например, в задачах механо-диффузии при применении таких стандартных процедур, как преобразование Лапласа, большие сложности возникают уже на этапе нахождения постоянных интегрирования из граничных условий. С ещё большими трудностями сопряжена процедура обращения преобразования. При определённых типах граничных условий решение указанных задач в зависимости от вида среды можно использовать преобразование Фурье или разложение в ряд Фурье, что существенно упрощает алгоритм нахождения оригиналов [1-3]. Недостатком такого подхода является ограниченность области применимости, которая обусловлена спецификой граничных условий.

Чтобы устранить такого рода недостаток предлагается построить соотношения между граничными условиями различных типов. В таком случае достаточно решить какую-либо одну наиболее простую задачу, а все другие задачи с граничными условиями других типов будут сводиться к ней.

В качестве соотношений связывающих между собой правые части граничных условий различных типов выступают интегральные уравнения Вольтерры 1-го рода, ядрами которых являются функции Грина одной из задач, для которой построено решение. Основной сложностью при использовании данного подхода является то, что функции Грина могут иметь особенности, которые требуют дополнительных исследований. Выделение этих особенностей и установление их характера позволяет свести интегральное уравнение с сингулярным ядром к интегральному уравнению с непрерывным ядром. Это позволяет решать интегральное уравнение численно с помощью квадратурных формул.

Данная методика апробирована на примере решения одномерных задач упругой диффузии для однокомпонентного слоя и полупространства

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-08-01161 А)

Литература

1. Давыдов С.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Двухкомпонентное упруго диффузионное полупространство под действием нестационарных возмущений // Экологический вестник научных центров Черноморского Экономического сотрудничества. 2014. №2. С 31-38
2. Гачкевич А.Р., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Одномерная задача о нестационарной связанной упругой диффузии для слоя // Известия Саратовского университета. Новая серия, Серия Математика. Механика. Информатика. Саратов: Саратовский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского. Т. 13, Вып. 4, ч.1, 2013, С.52-59.
3. Zemskov A. V., Tarlakovskiy D. V. Approximate solution of three-dimensional problem for elastic diffusion in orthotropic layer // Journal of Mathematical Sciences, **203**, Issue 2 (2014) 221.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ МКЭ

Давыдов Р.Л., Султанов Л.У.

(Казань)

Настоящая работа посвящена разработке и численной реализации методики исследования напряженно-деформированного состояния упругопластических тел с учетом больших перемещений. Используется процедура пошагового нагружения, где разрешающее вариационное уравнение получено из принципа

виртуальных мощностей в текущей конфигурации. Пространственная дискретизация основана на методе конечных элементов (МКЭ).

1. Кинематика среды. В качестве тензоров, описывающих деформацию и скорость деформации, используются левый тензор Коши–Грина: \mathbf{B} , тензор пространственного градиента скорости \mathbf{h} , тензор деформации скорости \mathbf{d} .

2. Определяющие соотношения. Напряженное состояние описывается с помощью тензора истинных напряжений $\Sigma = \sigma_{ij} (\vec{e}_i \vec{e}_j)$.

Удельную потенциальную энергию деформации можно представить в виде двух слагаемых, из которых первое зависит только от изменения объема, а второе – от инвариантов введенных модифицированных мер деформаций. Тензор напряжений Коши – Эйлера будет выражаться в следующем виде:

$$\Sigma = \frac{2}{J} \mathbf{B} \cdot \frac{\partial W}{\partial \mathbf{B}} \quad (1)$$

Здесь J – относительное изменение объема.

3. Алгоритм расчета. Для соотношения (1), получено физическое соотношение в виде зависимости производной Труделла тензора напряжений от деформации скорости:

$$\Sigma^{Tr} = \dot{\Sigma} + \mathbf{h} \cdot \Sigma + \Sigma \cdot \mathbf{h}^T - I_{1d} \Sigma = \Lambda_{\Sigma} \cdot \mathbf{d}$$

Для решения нелинейной задачи используется инкрементальный метод. В качестве базового уравнения используется уравнение виртуальных мощностей. Перейдя в определяющих соотношениях и линеаризованном уравнении к приращениям, составлено разрешающая система линейных уравнений.

В рамках теории течения используются аддитивное представление для полной деформации скорости, т.е. $\mathbf{d} = \mathbf{d}^e + \mathbf{d}^p$. Предполагается справедливость ассоциированного закона течения. Используется метод проецирования напряжений на поверхность текучести.

4. Численный пример. В качестве примера рассмотрено следующее выражение потенциала упругих деформаций: $W = \frac{\mu}{2} (I_{1B} - 3) + \frac{K}{2} (J - 1)^2$. В качестве критерия упругого деформирования - условие Губера-Мизеса.

Решена тестовая задача о плоской деформации квадратной полосы, приводится сравнение с результатами [2]. Далее рассмотрено упругое деформирование плиты под действием равномерного давления и упругопластическое растяжение круглого стержня, приводится сравнение с результатами [3].

Таким образом, в работе построена методика численного исследования упругопластических тел, для которых физические соотношения задаются с помощью упругого потенциала. Получены линеаризованные определяющие соотношения и разрешающее уравнение. Численная реализация основана на методе

конечных элементов на базе восьмиузлового полилинейного элемента. Решенные задачи демонстрируют работоспособность полученной методики.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№, 15-01-08733, 15-01-05686.

Литература

1. Голованов А.И., Коноплев Ю.Г., Султанов Л.У. Численное исследование конечных деформаций гиперупругих тел. I. Кинематика и вариационные уравнения // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия физико-математические науки. – 2008. – Т. 150, Кн. 1. – С. 29-37.

2. Голованов А.И., Коноплев Ю.Г., Султанов Л.У. Численное исследование конечных деформаций гиперупругих тел. II. Физические соотношения // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия физико-математические науки. – 2008. – Т. 150, Кн. 3. – С. 122-132.

3. Голованов А.И., Коноплев Ю.Г., Султанов Л.У. Численное исследование конечных деформаций гиперупругих тел III. Постановки задачи и алгоритмы решения // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия физико-математические науки. – 2009. – Т. 151, Кн. 3. – С. 108-120.

4. Голованов А.И., Коноплев Ю.Г., Султанов Л.У. Численное исследование конечных деформаций гиперупругих тел IV. Конечноеэлементная реализация. Примеры решения задач // Ученые записки Казанского университета. Серия физико-математические науки. – 2010. – Т. 152, Кн. 4. – С. 115–126.

5. Голованов А.И., Султанов Л.У. Численное исследование больших упругопластических деформаций трехмерных тел // Прикладная механика. – Киев. – 2005 – Т. 41. – №6. – С. 36-43.

6. Голованов А. И., Султанов Л. У. Исследование закритического упругопластического состояния трехмерных тел с учетом конечных деформаций// Известия Вузов. Авиационная техника.–2008.–N 4.–С. 13-16.

7. Уилкинс М.Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительных методы в гидродинамике. – М. Мир, 1967. – С.212-263.

8. Bonet J., Wood R.D. Nonlinear continuum mechanics for finite elementanalysis. – Cambridge University Press, 1997. – 283 p.

9. Eidel B., Gruttmann F. Elastoplastic orthotropy at finite strains: multiplicative formulation and numerical implementation // Computational Materials Science 28 (2003), PP. 732–742.

10. Schröder J., Gruttmann F. A simple orthotropicfinite elasto-plasticity model based on generalizedstress–strain measures // Comput. Mech. 30 (2002), PP. 38–64.

О НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СПИРАЛЬНЫХ НАТЯЖНЫХ ЗАЖИМОВ

Данилин А.Н., Курдюмов Н.Н., Тарасов С.С.

(Москва)

В настоящее время появился класс задач, связанных с проектированием и изготовлением зажимов спирального типа, предназначенных для подвески, ремонта и соединения проводов воздушных линий электропередачи (ВЛ) [1, 2]. Спиральный зажим представляет собой один или несколько повивов (проволочных слоёв) ограниченной длины, каждый из которых образован из отдельных спиральных проволок или их прядей. Конструкция спирального зажима очень хорошо сочетается с проводами, так как после монтажа она фактически интегрируется с проводом в одно целое. С точки зрения механики, повивы спирального зажима, смонтированного на проводе, можно рассматривать как дополнительные внешние (для провода) повивы ограниченной длины.

При проектировании зажима ставится задача об определении его несущей способности, а также нахождении оптимальных значений конструктивных параметров, например, длины зажима, направления и шага (угла намотки) спиралей. При неудачном их выборе работа зажима может оказаться неэффективной и даже приводить к повреждениям ядра конструкции. Получить решения этих задач можно только на основе рассмотрения спиральной конструкции как системы взаимодействующих проволочных повивов с учетом сил трения.

В представленной работе каждый повив представляется с позиции энергетического подхода как эквивалентная по упругим свойствам анизотропная цилиндрическая оболочка, а сама проволочная конструкция рассматривается как система вложенных друг в друга цилиндрических оболочек, между которыми допускается проскальзывание с учетом трения по модели Кулона [1-4]. На основе этого подхода получены явные формулы для определения матриц податливости и жесткости, решены краевые задачи о несущей способности спиральных зажимов и даны оценки конструктивных параметров, близких к оптимальным.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 13-01-00471-а, а также стипендии президента РФ для поддержки молодых ученых СП-417.2012.1.

Литература

1. Виноградов А.А., Данилин А.Н., Рабинский Л.Н. Деформирование многослойных проволочных конструкций спирального типа. Математическое моделирование, примеры использования – М.: Изд-во МАИ, 2014. – 168 с.

2. Данилин А.Н., Курдюмов Н.Н. Моделирование деформирования многослойных спиральных зажимов для натяжения и соединения проводов воздуш-

ных линий электропередачи / Тезисы докладов Международного научного семинара "Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы" (8-10 декабря 2014 г.). - М. 2014. – С. 23-24.

3. Данилин А.Н., Кузнецова Е.Л., Рабинский Л.Н., Тарасов С.С. Новая модель деформирования проволочных систем спиральной структуры // Нелинейный мир. 2011. Т. 9. № 10. – С. 635-645.

4. Данилин А.Н., Захаров А.П., Кузнецова Е.Л., Курдюмов Н.Н., Тарасов С.С. Деформирование спиральных зажимов для проводов воздушных линий электропередачи // Нелинейный мир. 2013. Т. 11. № 4. – С. 234-242.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУБКОЛЕБАНИЙ ГИБКИХ ПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Данилин А.Н., Курдюмов Н.Н., Тарасов С.С.

(Москва)

Провода воздушных линий электропередачи (ВЛ) представляют собой сложные конструкции, образованные проволочными слоями (повивами), навитыми друг на друга под разными углами относительно сердечника.

В предлагаемой работе каждый повив представляется с позиции энергетического подхода как эквивалентная по упругим свойствам анизотропная цилиндрическая оболочка, а сам провод рассматривается как система вложенных друг в друга цилиндрических оболочек, между которыми допускается проскальзывание с учетом сил давления и трения [1, 2]. На основе этого подхода получены формулы для определения матрицы податливости и рассмотрены задачи совместной работы провода со спиральной арматурой. Даны также формулы для оценки жесткостей провода на кручение и изгиб с учетом его внутреннего строения и взаимодействия повивов между собой.

С учётом разработанной модели для провода, учитывающей взаимодействие проволочных повивов друг с другом, рассмотрен ряд задач о субколебаниях фазных проводов, вызываемых действием аэродинамического следа [3, 4]. Необходимым условием для возникновения субколебаний является наличие двух проводов, расположенных приблизительно в одной горизонтальной плоскости поблизости друг от друга. При устойчивом ветре, дующем поперек трассы рассматриваемой воздушной ЛЭП, один провод располагается в аэродинамическом следе другого. Изменения аэродинамической подъемной силы и силы лобового сопротивления, воздействующих на подветренный провод, приводят к неустойчивому состоянию этого провода, который при ветре 6-15 м/с начинает колебаться. В процесс колебаний втягивается и наветренный провод.

В расчётах натяжение провода считается постоянным по его длине. Деформация удлинения провода определяется в квадратичном приближении в зависимости от поперечных перемещений. В качестве неизвестных (обобщенных координат) рассматриваются перемещения и угол закручивания провода на его концах, а также коэффициенты разложения этих функций в ряды по синусам с целыми числами полуволн по длине пролёта [5, 6].

Получены общие уравнения колебаний системы проводов в обобщенных координатах с нелинейностями упругих, инерционных и аэродинамических сил, а также линеаризованные однородные уравнения малых аэроупругих колебаний относительно статического положения равновесия. Из последних уравнений определяется критическая скорость флаттера. Нелинейные уравнения при заданной скорости ветра и заданных начальных условиях решаются численно. При этом используются частично линеаризованные уравнения (по инерционным и аэродинамическим силам) и полные нелинейные уравнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 13-01-00471-а, а также стипендии президента РФ для поддержки молодых ученых СП-417.2012.1.

Литература

1. Виноградов А.А., Данилин А.Н., Рабинский Л.Н. Деформирование многослойных проволочных конструкций спирального типа. Математическое моделирование, примеры использования – М.: Изд-во МАИ, 2014. – 168 с.

2. Шалашилин В.И., Данилин А.Н., Костриченко А.Б. Решение задач о нелинейном деформировании гибких многослойных проволочных конструкций с использованием наилучшей параметризации // Материалы XV международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2007), 25-31 мая 2007 г., Алушта. М. Вузовская книга, 2007 г. – С. 509.

3. Данилин А.Н., Захаров А.П., Шалашилин В.И. Модель субколебаний расщепленной фазы в пролёте воздушной линии электропередачи для выбора оптимальной схемы расстановки распорок-гасителей // Материалы XIV международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Тезисы докладов. Ярополец, 18-22 февраля 2008 г. М. 2007 г. – С. 78.

4. Данилин А.Н., Снеговский Д.В., Шалашилин В.И., Захаров А.П., Аносов Ю.В., Костриченко А.Б., Кузнецов Е.Б. Нелинейные модели взаимодействия проводов воздушных линий электропередачи с ветровым потоком // Материалы VII Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ 2008). 2008. – С.170-172.

5. Шклярчук Ф.Н., Данилин А.Н. Нелинейные колебания и галопирование провода с обледенением // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 11. – С. 188-197.

6. Данилин А.Н., Шклярчук Ф.Н. Нелинейные аэроупругие колебания и галопирование провода с обледенением в полёте воздушной линии электропередачи // Механика композиционных материалов и конструкций. 2013. Т.19. № 4. – С. 513-524.

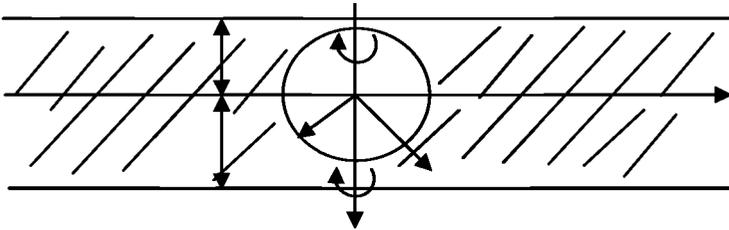
НЕСТАЦИОНАРНОЕ ВРАЩЕНИЕ ШАРА В УПРУГОМ СЛОЕ

Джаббаров О.Р., Тарлаковский Д.В., Шукуров А.М.

(Москва, Карши)

Важное практическое значение исследования нестационарных волновых процессов в упругих слоях определяется тем, что они актуальны для изучения напряженно-деформированного состояния среды и конструкции при нестационарных воздействиях, а также в связи с расчетами на сейс-мостойкость, которые требуют учета влияния отражающих граничных поверхностей на напряженно-деформируемое состояние среды, окружа-ющей конструкции.

В работе рассматривается осесимметричная задача о нестационарном вращении абсолютно жесткого шара безразмерного радиуса R с центром O в плоском бесконечном упругом слое с толщиной $h+l$ ($h > R$, $l > R$).



В начальный момент времени $\tau = 0$ шар подвергается нестационарному вращению вокруг оси Oz по заданному закону $V(\tau, \theta)$. Плоские границы упругого слоя являются либо свободными поверхностями, либо жесткими стенками. Движение упругой среды относительно ненулевой компоненты векторного потенциала описывается волновым уравнением. Для решения задачи используются интегральное преобразование Лапласа по времени и разложения в ряды по полиномам Гегенбауэра в сферической системе координат с началом в центре O жесткого шара.

В результате задача сводится к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений, которую запишем в виде бесконечного матричного уравнения.

Его решение разыскивается в виде рядов по экспонентам $x = e^{-2/m_s}$, $y = e^{-2/m_s}$, $z = e^{-\eta_s}$. Постановка этих рядов в матричное уравнение приводит к рекуррентным соотношениям относительно коэффициентов рядов. Эти соотношения позволяют определить все искомые изображения функций без применения редукции бесконечной системы уравнений. Анализ рекуррентных соотношений показывает, что изображения есть рациональные функции параметра преобразования Лапласа, который дает возможность вычислять их оригиналы, а следовательно, и оригиналы коэффициентов перемещения и напряжения в среде с помощью теории вычетов.

Получены формулы для смещений и напряжений в среде. Приведены численные расчеты. Определены влияния граничных поверхностей бесконечного упругого слоя на напряженно-деформированное состояние среды в окрестности шара.

УПРУГИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ АМОРФНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦ

Дибирова К.С., Задорина Е.Н., Козлов Г.В., Магомедов Г.М.

(Махачкала, Москва, Нальчик)

Применение наноразмерных наполнителей (наноапполнителей) открывает новые возможности создания полимерных композиционных материалов, поскольку повышение механических свойств достигается при нетипично низких концентрациях наполнителя.

Наполнитель (наноапполнитель) вводят в полимеры с целью увеличения жесткости нанокомполитов. Усиление полимерных комполитов (нанокомполитов) характеризуется степенью усиления E_K/E_M (E_H/E_M), где E_K , E_H и E_M - модули упругости комполита, нанокомполита и матричного полимера, соответственно. Для описания степени усиления разработана фрактальная модель усиления [1]. Она предполагает, что роль наполнителя (наноапполнителя) сводится к видоизменению и фиксации структуры матричного полимера. Такой подход учитывает различие модулей упругости наполнителя (наноапполнителя) и матричного полимера. В работе рассматриваются нанокомполиты на основе полиэтилена низкой плотности/ Na^+ -монтмориллонит, модуль упругости матричного полимера составляет 0,2 ГПа [2], а наноапполнителя - 400-420 ГПа [3], т.е. различие составляет более трех порядков. При таких условиях деформация органоглины практически равна нулю, а поведение нанокомполита определяет поведение полимерной матрицы.

Структуру аморфного состояния полимеров предложено рассматривать как естественный нанокомполит [4, 5]. В рамках кластерной модели структура

аморфного состояния полимеров состоит из областей локального порядка (кластеров), погруженных в рыхлоупакованную матрицу, в которой сконцентрирован весь свободный объем полимера. Кластеры, в свою очередь, состоят из нескольких коллинеарных плотноупакованных статистических сегментов разных макромолекул. Они являются аморфным аналогом кристаллитов с вытянутыми цепями и имеют размеры порядка нанометров (истинными наночастицами – нанокластерами). В случае представления полимеров как естественных нанокомполитов они играют роль наноапполнителя, а рыхлоупакованная матрица – роль матрицы нанокомполита.

В качестве матричного полимера использован линейный полиэтилен низкой плотности (ПЭНП) марки Dowlex-2032. В качестве наноапполнителя использован модифицированный Na^+ -монтмориллонит (ММТ). Содержание ММТ варьировалось в пределах 1-7 масс. % [4]. Размеры пластины ММТ составляют: длина ~ 100 нм, ширина ~ 35 нм и толщина ~ 1 нм [5].

Установлено, что модуль упругости нанокомполита E_n возрастает по мере уменьшения $n_{кл}$ – количества статистических сегментов в одном нанокластере. Такое поведение нанокомполитов ПЭНП/ММТ идентично поведению как дисперсно-наполненных, так и естественных нанокомполитов.

Теоретическая зависимость E_n для естественных нанокомполитов определяется как функция параметров кластерной модели: [4,5]:

$$E_n = c \left(\frac{\phi_{кл} v_{кл}}{n_{кл}} \right) \quad (1)$$

где c - константа, принимаемая для ПЭНП равной $5,9 \times 10^{-26} \text{ м}^3$; $\phi_{кл}$ – относительная доля нанокластера; $v_{кл}$ – плотность кластерной сетки макромолекулярных зацеплений.

Теоретическая зависимость $E_n(n_{кл})$, рассчитанная согласно уравнению (1), для исследуемых нанокомполитов показала достаточно хорошее соответствие с экспериментом (расхождение составляет 11,6%). Таким образом, по мере увеличения массового содержания органоглины W_n в интервале 0-7 масс. % величина $n_{кл}$ снижается от 8,40 до 3,17 и сопровождается ростом модуля упругости нанокомполита ПЭНП/ММТ от 206 до 569 МПа.

Для нанокомполитов ПЭНП/ММТ, наблюдается снижение $n_{кл}$ по мере роста объемного содержания межфазных областей $\phi_{мф}$, т.е. сформированные на поверхности органоглины плотноупакованные (и, возможно, подвергающиеся эпитаксиальной кристаллизации) межфазные области как бы «растаскивают» нанокластеры, уменьшая число статистических сегментов в них. Эти процессы имеют одну и ту же направленность, а именно, увеличение модуля упругости нанокомполита.

Исследования показали общий механизм усиления естественных и искусственных (наполненных неорганическим нанонаполнителем) полимерных нанокомпозитов. Этим механизмом является снижение числа статистических сегментов в одном нанокластере по мере роста содержания нанонаполнителя. Физической основой указанного эффекта является формирование плотноупакованных межфазных областей в искусственных нанокомпозитах.

Литература

1. *Козлов Г.В., Яновский Ю.Г., Карнет Ю.Н.* Структура и свойства дисперсно-наполненных полимерных композитов: фрактальный анализ. – М.: Альянстранса-том, 2008. - 363 с.
2. Hotta S., Paul D.R. Nanocomposites formed from linear low density polyethylene and organoclays. // *Polymer*. - 2004. - V. 45, № 21. - P. 7639-7654.
3. Sheng N., Boyce M.C., Parks D.M., Rutledge G.C., Abes J.I., Cohen R.E. Multiscale micromechanical modeling of polymer/clay nanocomposites and the effective clay particle // *Polymer*. - 2004. - V. 45, № 2. - P. 487-506.
4. Башоров М.Т., *Козлов Г.В., Микитаев А.К.* Наноструктуры в полимерах: синергетика формирования, методы регулирования и влияние на свойства. // *Материаловедение*. - 2009, № 9. - С. 39-51.
5. *Магомедов Г.М., Козлов Г.В.* Синтез, структура и свойства сетчатых полимеров и нанокомпозитов на их основе. – М.: Академия Естествознания, 2010. – 464 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕСА И РЕЛЬСА ПРИ НАЕЗДЕ КОЛЕСА НА СТЫК

Евтух Е.С., Неклюдова Г.А.

(Брянск)

При наезде колеса вагона на рельсовые стыки возникают дополнительные динамические силы, воздействующие на путь и элементы подвижного состава. К тому же, в этих случаях условия контакта колеса и рельса неблагоприятны. Этими факторами обусловлены высокие контактные давления на поверхностях колеса и рельса, способствующие более интенсивному накоплению контактно-усталостных повреждений в их материалах. В связи с тем, что ударная сила зависит от зазора в рельсовом стыке, расчет накопления повреждений в колесе проведен с учетом вероятности значения зазора.

Для определения ударной силы, возникающей при перекатывании колеса через рельсовый стык, использован известный подход, базирующийся на решении Герца о соударении двух твёрдых тел. В работе методом конечных элементов решена задача контакта колеса с кромкой рельса с варьированием нормаль-

ной силы в контакте. На основе этого решения получена зависимость между силой и сближением тел.

Для определения величины накопленной поврежденности в материале колеса использована кривая контактной усталости. Она построена в координатах: N – количество циклов до зарождения усталостной трещины, p_0 – максимальные давления в контакте. Для того чтобы воспользоваться кривой контактной усталости, понадобилась зависимость максимального контактного давления от ударной силы, которая получена на основе результатов решения контактных задач для колеса и рельса методом конечных элементов.

Наглядное представление о влиянии зазора в рельсовом стыке и скорости движения вагона дает картина линий равных чисел циклов до разрушения материала колеса. Накапливаемая поврежденность возрастает с возрастанием зазора в рельсовом стыке и скорости движения.

Наличие стыков в бесстыковом пути приводит к увеличению накопленной поврежденности на 0,54...0,58%. Просадка балласта в области стыка может привести к увеличению поврежденности в 3-4 раза из-за динамических сил, сопровождающих колебания полувагона при прохождении этого участка.

Несмотря на явные преимущества бесстыкового пути над звеньевым, доля его от общей длины железнодорожных путей Российской Федерации составляет около 40 %. А в некоторых регионах перейти на бесстыковой путь в силу ряда причин не представляется возможным, и звеньевая конструкция пути еще продолжительное время будет иметь свою область применения. Учитывая этот факт, на 1000 км звеньевого пути количество стыков в 7, 17 раз больше, поэтому увеличение накопленной поврежденности составляет 4,16%.

УСТОЙЧИВОСТЬ МАССИВНОЙ БАЛКИ ПОДКРЕПЛЕННОЙ ПРУЖИНАМИ РАЗНОЙ ЖЕСТКОСТИ

Егоров С.В., Габсаттаров Р.М., Саченков О.А.

(Казань)

Устойчивость подвески автомобиля является одним из решающих факторов управления транспортного средства. Подвеска выполняет следующие функции: обеспечивает требуемый характер перемещения колёс относительно кузова или рамы, а также необходимую плавность хода. Основными элементами подвески являются: упругие элементы, которые воспринимают и передают нормальные силы реакции дороги, возникающие при наезде колеса на её неровности; направляющие элементы, которые задают характер перемещения колёс и их связи между собой и с несущей системой, а также передают продольные и боковые силы и их моменты. Упругие элементы подвески автомобиля в зависи-

мости от внешних возмущений могут войти в резонанс с собственными колебаниями системы, что приводит к потере управляемости.

В рамках работы были рассмотрены собственные вертикальные колебания подвески с разными жесткостными характеристиками. В рамках модели рассматривались перемещения центра тяжести автомобиля, а также повороты подвески около центра масс. Были определены разрешающая система уравнений и собственные колебания системы при различных жесткостях рессор. Оценка устойчивости проводилась методом возмущений, которые моделируют неровности дороги. Были рассмотрены случаи наезда на препятствие обоими колесами и одним колесом, так же рассматривались случаи одного препятствия и множества препятствий, расположенных периодически. В работе были оценены границы диапазонов устойчивых колебаний в зависимости от характера возмущений при различных значениях жесткостей рессор.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТОЧНОСТИ ПОСАДКИ ВАЛОВ НА ВИБРАЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕДУКТОРА

Егоров С.В., Лустин А.Д., Саченков О.А.

(Казань)

На практике при использования редукторов, в связи с совместностью малых перекосов колец подшипника, монтажных отклонений и прочих отклонений от номинальных размеров возникают зазоры в узлах крепления валов редуктора, а значит возникают колебательные процессы. В связи с большими угловыми скоростями, моментами, которые передаёт редуктор и совместной работой валов и прочих узлов механизма, оценка колебательных процессов является важной задачей, так как при различных режимах работы указанные совместные колебания могут привести к резонансу колебательных процессов, что качественно может повлиять на износ и работоспособность редуктора. В рамках данной работы рассматриваются вибрации, связанные с зазорами при посадки валов в корпус редуктора.

Была рассмотрена одна ступень редуктора, параметрами модели выступали величины зазоров в местах установки цапф в подшипник, величина отклонения от соосности посадочных отверстий, величина допуска в зацеплении. Для ведущего вала определялись частоты и амплитуды колебаний в зависимости от режима работы. После чего происходил расчет движения выходного вала с учетом возмущений, вызванных неравномерностью зацепления, и определялись частоты и амплитуды выходного вала. Были произведены расчеты для различных

диапазонов зазоров и отклонений от соосности, получены зависимости частоты колебаний от величин зазоров и отклонений.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЛОКАЛИЗОВАННЫЕ ВОЛНЫ ДЕФОРМАЦИИ В ДВУМЕРНОЙ ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЕ

Ерофеев В.И., Павлов И.С.

(Нижний Новгород)

Разработана нелинейная математическая модель двумерной зернистой среды, представляющей собой квадратную решетку из упруго взаимодействующих круглых частиц, обладающих продольной, поперечной и ротационной степенями свободы. В низкочастотном диапазоне ротационной степеню свободы можно пренебречь, и полученная трехмодовая модель вырождается в двухмодовую. По найденным аналитическим зависимостям коэффициентов нелинейностей обеих моделей от параметров микроструктуры произведены численные оценки этих коэффициентов [1]. Двухмодовая система методом многих масштабов приводится к эволюционному уравнению Кадомцева-Петвиашвили относительно сдвиговой деформации, имеющему решение в виде солитона. Для ряда кристаллов с кубической симметрией определено, является ли солитон устойчивым и какова его полярность [2]. В соответствии с критерием Лайтхилла найдены области модуляционной неустойчивости (само модуляции) сдвиговой волны деформации при условии наличия в материале статической продольной деформации, а также изучены виды волновых пакетов в случае модуляционной неустойчивости [3].

Литература

1. *Павлов И.С.* Об оценке коэффициентов нелинейностей зернистой среды методом структурного моделирования // Вестник ННГУ: Математическое моделирование и оптимальное управление. 2012. № 6 (в печати).
2. *Ерофеев В.И., Павлов И.С.* Локализованные волны деформации в двумерной кристаллической среде с неплотной упаковкой частиц // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сборник. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2012 (в печати).
3. *Ерофеев В.И., Кажасев В.В., Павлов И.С.* Само модуляция сдвиговых волн деформации, распространяющихся в одномерной зернистой среде // Нелинейный мир. 2012. Т. 10. № 9. С. 603-613.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНО- УПРОЧНЕННЫХ КОМПОЗИТОВ НА ПОЛИЭФИРНОЙ ОСНОВЕ

Ершова А.Ю., Мартыросов М.И.

(Москва)

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе полиэфирных смол в настоящее время широко применяются в различных областях современной техники. ПКМ обладают рядом преимуществ по сравнению с металлами, их сплавами, бетоном, стеклом и часто становятся весьма эффективной альтернативой традиционным конструкционным материалам. Основным достоинством ПКМ является высокий уровень их удельных характеристик. Технологические процессы формования изделий из ПКМ позволяют получать изделия более сложной формы и характеризуются существенно меньшей энергоемкостью. Указанные преимущества относятся и к достаточно новому классу дисперсно-упрочненных ПКМ – литевому искусственному камню (ЛИК), предназначенному для замены природного гранита, мрамора и других пород в строительстве и машиностроении.

ЛИК – это композиционный конструкционный материал, состоящий из насыщенной полиэфирной смолы (~20%) и мелкозернистого инертного наполнителя (~80%). В зависимости от используемой смолы, наполнителя и красящих пигментов можно имитировать цвет и фактуру натурально природного камня: мрамора, малахита, оникса, змеевика, гранита и т.д. ЛИК является беспористым, однородным в массе материалом, стойким к колебаниям температуры окружающей среды, способным к восприятию ударных и вибрационных нагрузок, поддается механической обработке, склеиванию. Этот материал не изменяет цвет со временем, обладает высоким шумопоглощением, низкой теплопроводностью, высокими антибактериальными свойствами, стойкостью к ряду химически агрессивных сред и коррозии, а также повышенной износостойкостью. В отличие от натурального природного камня, материалу присуще отсутствие радиоактивного фона, что позволяет использовать ЛИК при реализации некоторых перспективных нанотехнологий. Объектом применения этих материалов могут, например, являться несущие системы (станины, стойки, основания) для достаточно высокого спектра высокоточных станков, контрольно-измерительных машин и нанотехники, где использование металлических материалов исчерпало себя и не позволяет выйти на требуемые технические параметры и характеристики. В настоящее время литевая технология позволяет изготавливать изделия практически любой сложности, в том числе и объемные длинномерные, где будут сохранены природные качества и внешний вид натурального камня.

Однако, замена традиционных материалов на новые должна сопровождаться значительным объемом научно-исследовательских работ, связанных с изучением особенностей механического поведения ПКМ. В настоящее время известны ограниченные исследования механических характеристик ЛИК, необходимых для оценки работоспособности элементов конструкций из этих материалов. В данной работе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования механических свойств ЛИК на основе ненасыщенных полиэфиров. Экспериментальные исследования проведены на универсальных испытательных машинах ZWICK Z100 (Германия) и INSTRON модель 5960 (Великобритания).

По результатам машинных испытаний с использованием указанного оборудования и тензометрических методов измерения продольной и поперечной деформаций определены упругие характеристики ЛИК при растяжении и сжатии (предел прочности, модуль упругости, коэффициент Пуассона и другие). Получены кривые ползучести и релаксации напряжений при значениях напряжений и деформаций близких к предельным. С использованием методов податливости и К-тарировки получены экспериментальные значения характеристик вязкости разрушения исследуемого материала.

В теоретической части работы рассмотрено решение ряда прикладных задач по анализу напряженно-деформированного состояния пластин и плоских панелей конечных размеров из ЛИК, нагруженных растяжением-сжатием в двух направлениях и сдвигом. Используются уравнения Halpin-Tsai. Расчеты проведены в MSC/PATRAN методом конечных элементов. Рассмотрены различные варианты граничных условий.

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), а также гранта Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 11-01-00540_a).

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ТОНКОСТЕННЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКОВЫХ ДЕТАЛЕЙ

Жигилий В.С., Жигилий С.В.

(Москва)

Тонкостенные сферические оболочковые детали применяют в авиационно-космическом производстве и многих других отраслях машиностроения. Это объясняется тем, что емкости-оболочки сферической формы обеспечивают минимальную массу, наилучший теплоотвод, наивысшую прочность при минимальной площади поверхности и наибольшей величине полезного объема.

Анализ традиционно применяемых технологий получения класса сферических оболочковых деталей показывает, что не все технологии обеспечивают в полной мере требований конструкций такого типа деталей, поскольку сохраняется значительная удельная масса, неравномерность и большое утонение стенки детали, не достаточно высокое качество поверхности, высокая не однородность механических свойств.

Исключение этих недостатков достигается применением процесса фрикционно-реверсивной вытяжки эластичным пуансоном по твердой матрице, разработка научных и практических основ которого обеспечивает минимальное утонение, равномерность свойств и качество поверхности стенки детали.

При изучении процессов формообразования важной задачей является отыскание поля напряжений и определение на основе этого допустимой степени деформации, которая ограничивается или разрушением заготовки, или потерей устойчивости, приводящей к нежелательному искажению формы.

В настоящей работе предпринята попытка синтезировать процесс вытяжки, исходя из требований формирования сферических оболочковых деталей с наивысшей равномерностью и наименьшим утонением стенки детали, т. е. сформировать такую систему внешних сил, при которой будет обеспечена конструкция сферической оболочковой детали в соответствии с требованием, предъявляемыми к такого вида оболочкам.

Целью теоретического исследования являлось установление функциональных зависимостей, определяющих деформационные характеристики на основе представлений о механизме процесса. Особенностью теоретического анализа является системное расчленение нагруженной внешними силами деформированной заготовки на зоны с однородными схемами напряженного состояния с учетом граничных условий зоны, рассмотрением равновесия под действием приложенных внешних и внутренних сил с последующей интеграцией их и установлением величин напряжений в любом сечении очага деформации.

Теоретически исследовано воздействие внешних сил и возникающих при этом напряжений на поведение опасной зоны, в которой концентрируются наибольшие напряжения и деформации, приводящие к утонению и возможному разрушению тонкостенных сферических оболочек.

Исследовано влияние на интенсивность напряжения в опасной зоне всех основных параметров и факторов, влияющих на эту интенсивность: геометрии матрицы, интенсивности контактного трения со стороны опорного вкладыша и эластичной среды, интенсивности контактного трения на фланец заготовки со стороны матрицы, интенсивности формообразующего давления со стороны эластичной среды, геометрии эластичного пуансона, характеристик смазочных сред и интенсификаторов трения.

Условием оптимизации принят минимум меридионального напряжения в опасном сечении заготовки, который является количественной характеристикой, управляющей степенью формоизменения и интенсивностью утонения стенки детали, являющиеся взаимосвязанными характеристиками технологических возможностей процесса.

Установлено, что одним из главных факторов, влияющих на величину меридионального напряжения в любой точке оболочки, является напряжение контактного трения, входящее в структуру меридиональных напряжений. Регулируя силы контактного трения в различных зонах очага деформации, можно достичь минимума напряжения в опасном сечении и соответственно минимума утонения заготовки, что является условием оптимизации протекания процесса фрикционно-реверсивной вытяжки.

При этом исследования показали, что наивысшие технологические возможности процесса могут быть достигнуты только при создании интенсивного контактного трения между заготовкой и пуансоном и минимальной интенсивности трения между прижимной опорой и заготовкой.

Перспективность процесса фрикционно-реверсивной вытяжки заключается в том, что он обеспечивает получение тонкостенной сферической оболочки с равномерной толщиной стенки.

ФЛАТТЕР ПЛОСКОЙ ПАНЕЛИ С УПРУГИМ ПОДКРЕПЛЕНИЕМ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ГАЗА

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

(Москва)

Критические значения параметров неконсервативных нагрузок в задачах упругой устойчивости определяются соотношениями между частотами, определяющими динамический тип потери устойчивости [1]. Яркой иллюстрацией этой особенности является известный парадокс Николаи, обнаруженный еще в 30-е годы прошлого столетия. Позже в 50-60 г. много было решено неконсервативных задач теории упругой устойчивости с обнаружением различных эффектов, свойственных только указанным системам. В частности, в работе [2] было показано, что в задаче Бека для стержня, связанного с упругим основанием, критическое значение следящей силы не зависит от жесткости упругого основания. С ссылкой на то, что при вычислении критической нагрузки не учитывалось рассеяние энергии это положение подверглось критике [3]. Однако несколько позже в статье [4] были проведены аналогичные исследования с учетом внешнего и внутреннего трения и также установлено, что при малом и умеренном демпфировании критическое значение следящей силы не зависит от жесткости упругого основания. Причина этого явления кроется в том, что с ростом жестко-

сти основания происходит сближение низших частот, ответственных за наступление флаттера, а увеличение мощности неконсервативной нагрузки, необходимой для раскачивания системы большей жесткости, обеспечивается увеличением частоты флаттера.

В настоящей работе рассматривается задача об устойчивости плоской панели, связанной с упругим основанием и находящейся в сверхзвуковом потоке газа. Упругое основание, рассматриваемое как винклеровское поверхностной жесткостью c , может моделировать систему каких-либо подкрепляющих элементов, Панель поверхностной плотностью ρh и цилиндрической жесткостью D , шарнирно закрепленную по сторонам при $x=0$ и $x=a$, удлиненную в направлении ортогональному потоку. Кроме аэродинамической нагрузки со скоростью обтекания U , панель подвергается сжатию в направлении потока мембранным усилием N_0 . Нормальное состояние панели – плоская форма равновесия. Если аэродинамическая нагрузка превысит некоторое критическое значение, то это приведет к динамической потере устойчивости плоской формы равновесия (флаттеру). Критическое значение мембранного усилия приводит к квазистатической потере устойчивости (дивергенции). Будем считать, что в пластине реализуется состояние цилиндрического изгиба, и нормальный прогиб в пластине $w(x,t)$ можно рассматривать как функцию только координаты x и времени t . Используя простейшую схематизацию аэродинамической нагрузки [5] для сверхзвуковых скоростей потока приходим к уравнению возмущенного движения в окрестности исследуемого на устойчивость плоской формы равновесия, которое в безразмерном виде имеет вид:

$$\frac{1}{\pi^4} \left(1 + \varepsilon_i \frac{\partial}{\partial \tau} \right) \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} + \frac{\alpha}{\pi^2} \frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} + \frac{\beta}{2} \frac{\partial w}{\partial \xi} + \varepsilon_e \frac{\partial w}{\partial \tau} + \frac{\partial^2 w}{\partial \tau^2} + \frac{\gamma}{\pi^4} w = 0,$$

где введены следующие обозначения:

$$\alpha = \frac{N_0}{N_*}, \quad \beta = \frac{2\rho_\infty v U}{\rho h a \omega_0^2}, \quad \omega_0 = \frac{\pi^2}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}}, \quad \gamma = \frac{c a^3}{D}, \quad \varepsilon_i = b_i \omega_0, \quad \varepsilon_e = \frac{\rho_\infty v}{\rho h \omega_0},$$

$$\tau = \omega_0 t, \quad \xi = \frac{x}{a}, \quad N_* = \frac{\pi^2 D}{a^2}.$$

Здесь p_0 – невозмущенное давление, ρ_∞ – плотность газа, U – скорость набегающего потока, v – скорость звука.

Решение уравнения возмущенного движения представляется в виде ряда по формам собственных колебаний. После применения процедуры метода Бубнова-Галеркина получим матричное уравнение относительно вектора обобщенных координат \mathbf{q}

$$\mathbf{A}\ddot{\mathbf{q}} + \left[\varepsilon_e \mathbf{A} + \frac{\varepsilon_r}{\pi^4} \mathbf{C} \right] \dot{\mathbf{q}} + \left(\frac{1}{\pi^4} \mathbf{C} + \frac{\alpha}{\pi^2} \mathbf{D} + \frac{\beta}{2} \mathbf{B} - \frac{\gamma}{\pi^4} \mathbf{A} \right) \mathbf{q} = 0,$$

где элементы матриц \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} и \mathbf{D} вычисляются как интегралы от произведения базисных функций и их производных. Представление вектора обобщенных координат $\mathbf{q}(\tau) = \mathbf{q}_0 \exp(\lambda\tau)$ дает уравнение относительно характеристических показателей λ . При изменении параметров системы α, β, γ неустойчивость системы соответствует переходу хотя бы одного характеристического показателя в правую полуплоскость. Если мембранное усилие в панели отсутствует, то, так же как и для задачи Бека [2,4], критическое значение скорости потока при малом демпфировании практически не зависит от жесткости упругого основания γ . При варьировании усилия α , также существенно влияющего на собственные частоты системы вплоть до их совпадения, обнаружены эффекты снижения критических значений скорости потока. В работе также подробно изучено поведение границ области устойчивости на плоскости параметров нагружения системы.

Литература

1. Болотин В.В. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. – М.: Физматгиз, 1961. – 339 с.
2. Smith T. E. Herrmann G. Stability of a Beam on an Elastic Foundation Subjected to a Follower Force // J. Appl. Mech., 1972, т 39. pp. 628–629.
3. Волошин И.И., Громов В.Г. О критерии устойчивости стержня на упругом основании при действии следящей силы // Изд. АН СССР, Механика твердого тела. – 1977, №4. С. 169 - 171.
4. Радин В.П., Чирков В.П., Шугорев А.В. Устойчивости стержня на упругом основании при непотенциальном нагружении // Строительная механика и расчет сооружений. – 2008, №5. С. 5-11.
5. Горшков А.Г., Морозов В.И., Пономарев А.Т., Шклярчук Ф.Н. Аэроупругость конструкций. М.: Наука, 2000. 591 с.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГЕРМЕТИЧНОГО СЛОЯ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КОМПОЗИТНОЙ ОБОЛОЧКИ

Зайцев В.Н., Костриченко А.Б.

(Москва)

Особенности баллонов, работающих длительное время под давлением, является требование сохранения ими герметичности. Используемые способы герметизации композитных конструкций не всегда отвечают этому условию. Так, резиновый слой с течением

нием времени теряет герметизирующие свойства вследствие старения, а слои термопласта можно использовать в сравнительно узком диапазоне температур.

Один из перспективных способов обеспечения герметичности – введение несущего металлического слоя, обладающих малой проницаемостью, стойкостью к агрессивным средам и позволяющего использовать металлическую оболочку в качестве оправки при намотке баллона. Получаемая комбинированная конструкция, состоящая из внутреннего изотропного слоя и наружного армированного слоя, как правило, оказывается тяжелее баллона из композита, однако обладает по сравнению с последним рядом технологических и эксплуатационных преимуществ.

Расчетная схема оболочки существенным образом зависит от принятой модели структуры материала. Можно выделить три основных направления построения модели/1/.

Первое направление основано на представлении материала в упорядоченно или случайно расположенных в изотропной среде (связующем) армирующих элементов (волокон). Модели такого рода позволяют определять средние упругие постоянные материала в зависимости от упругих постоянных волокон и связующего и их относительно объемного содержания в материале.

Второе – основано на замене исходного гетерогенного материала условной однородной анизотропной средой, упругие характеристики которой находятся расчетно-экспериментальными методами. Различные варианты этого подхода характеризуются порядком введения в расчет экспериментальных констант. В частности, они могут быть введены как упругие характеристики некоторого элемента, из которого затем образуется анизотропная среда. При этом ее упругие постоянные находятся расчетным путем на основании известных геометрических соотношений, определяющих преобразование постоянных при повороте осей координат. Возможен также прямой экспериментальный путь определения характеристик материала на образцах, вырезанных из конструкции.

Наконец, третья возможная модель структуры стеклопластика используется при определении оптимальных схем армирования и основана на замене оболочки пространственной системой гибких нитей. Связующее при этом не учитывается.

Для построения модели конструктивно изотропной модели цилиндрической оболочки за основной элемент принимается полоска в виде ленты, пропитанной полимерным связующим. Выбор такого элемента обоснован, так как именно из него образуется оболочка в процессе намотки.

Элементарная ортотропная полоска наделяется жесткостью при растяжении – сжатии в двух направлениях и сдвиге, соответствующие упругие постоянные определяются экспериментально. Существующие теоретические зависимости не используются, поскольку они не учитывают ряда технологических факторов, например, натяжение ленты при намотке, давления, прессования, режима отверждения и других параметров, влияющих на механические свойства/2/. С другой стороны экспериментальный путь опреде-

ления характеристик анизотропного материала представляется нецелесообразным, так как связан с большим объемом экспериментальных исследований.

Упругие постоянные и пределы прочности элемента находились в результате испытаний цилиндрических оболочек и колец, изготовленных радиальной намоткой.

Исследуется баллон высокого давления, представляющий собой цилиндр с полусферическими днищами. Конструктивно он состоит из герметичного металлического слоя и силовой композиционной оболочки. Баллон предназначен для хранения криогенных компонентов. Баллон нагружался внутренним давлением 20 МПа.

Рассматриваются различные случаи изготовления баллона.

1. Баллон изготовлен из композитного материала Русар с герметичным алюминиевым слоем толщиной 2 мм.

2. Баллон изготовлен из композитного материала УКН-500+ЭХД-МК с герметичным алюминиевым слоем толщиной 2 мм.

3. Баллон изготовлен из композитного материала Т-800 с герметичным алюминиевым слоем толщиной 2 мм.

Композитная оболочка, получается путем намотки ленты толщиной 0,8 мм. в несколько слоев под углами ± 60 градусов. Число композитных слоёв равно четырём. Аналитического решения такой задачи нет, поэтому математическая модель такой оболочки строилась с помощью метода конечных элементов. Использовался многослойный оболочечный элемент для адекватного описания геометрии оболочки. Задача решалась с помощью программного комплекса NXNastran 7.5. Определялось напряженное состояние во всех слоях оболочки. Наиболее нагруженным оказался герметичный слой оболочки изготовленной из материала Русар, но во всех оболочках напряжения по критерию Мизеса превосходили предел текучести и превосходили по величине предел прочности. Это происходит потому, что задача решалась в линейной физической постановке. Так поступают, когда деформации не превышают $\varepsilon \leq 0,2\%$. При большей деформации диаграмма $\sigma - \varepsilon$ становится нелинейной. Существуют различные методы расчёта на прочность за пределами упругости. Все они основаны на различных способах аппроксимации диаграммы $\sigma - \varepsilon$. Наиболее простой способ, аппроксимация в виде ломаных линий. Используя этот способ, получили действительные запасы прочности для герметичного слоя

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 15-01-03421).

Литература

1. Елпатьевский А.Н., Васильев В.В. Прочность цилиндрических оболочек из армированных материалов. М.: Машиностроение, 1972, - 168 с.

2. Композиционные материалы. Т 2. Механика композиционных материалов. М.: Мир, 1978, - 569 с.

ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ ВОЛНЫ В УПРУГО-ПОРИСТОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ, НАХОДЯЩЕМСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОВЕРХНОСТНЫХ СИЛОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Данг Куанг Занг, Тарлаковский Д.В.

(Москва)

Выполнено исследование процесса распространения осесимметричных волн в упруго-пористом полупространстве. Движение среды в цилиндрической системе координат описывается двумя волновыми уравнениями относительно скалярного и ненулевой компоненты векторного потенциала [1].

Потенциалы связаны с компоненты вектора перемещений и тензора напряжений известными соотношениями [1].

На граничной плоскости полупространства заданы силовые возмущения в виде дельта-функция Дирака. На бесконечности возмущения отсутствуют, а начальные условия нулевые. Соответствующие решения являются поверхностными функциями влияния.

В основу решения положен метод преобразования Лапласа по времени и Ханкеля по радиусу r . Найдены изображения всех функций влияния. Их оригиналы находятся с помощью теоремы о связи решений плоской и пространственной задач [2], а также известных решений плоской задачи [3].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 15-08-00787) и гранта Президента РФ НШ-2029.2014.8.

Литература

1. Данг Занг Куанг, Тарлаковский Д.В. Осесимметричные нестационарные колебания упруго-пористого полупространства под действием поверхностного возмущения // Труды IX Всероссийской научной конференции «Нелинейные колебания механических систем» (Нижний Новгород, 24–29 сентября 2012 г.) - Нижний Новгород: Издательский дом «Наш дом», 2012. – С. 314-319.

2. Горшков А.Г., Тарлаковский Д.В. Динамические контактные задачи с подвижными границами. М.: Физматлит, 1995. 352 с.

3. Нгуен Нгок Хоа, Тарлаковский Д.В. Нестационарные поверхностные функции влияния для упруго-пористой полуплоскости // Электронный журнал «Труды МАИ», 2012, №53, www.mai.ru/science/trudy/.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ МЕХАНОДИФФУЗИОННЫЕ ПОЛЯ В ОДНОРОДНОМ ИЗОТРОПНОМ СЛОЕ

Земсков А.В., Тарлаковский Д.В.

(Москва)

Рассматривается двумерная нестационарная задача упругой диффузии для однородного изотропного слоя. Физико-механические процессы в среде описываются геометрически линейной моделью упругой диффузии без учёта температурных эффектов [1–5], которая включает в себя два уравнения движения и одно уравнение массопереноса.

Для решения задачи применяется редукция к нулевым граничным условиям. Далее последовательно используется интегральное преобразование Фурье по одной из пространственных координат, разложение в ряд Фурье по второй пространственной координате и преобразование Лапласа по времени. В результате исходная задача сводится к последовательности систем из трёх линейных алгебраических уравнений относительно изображений Фурье-Лапласа искомым функций. Из этих уравнений получаем решение редуцированной задачи в изображениях. Задача обращения трансформант Лапласа сводится к обращению рациональных функций. Трансформанты Фурье обращаются численно с помощью формулы трапеций.

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 финансовой поддержке РФФИ (проект 14-08-01161 А)

Литература

1. Давыдов С.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Двухкомпонентное упруго диффузионное полупространство под действием нестационарных возмущений // Экологический вестник научных центров Черноморского Экономического сотрудничества. 2014. №2. С 31-38
2. Гачкевич А.Р., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Одномерная задача о нестационарной связанной упругой диффузии для слоя // Известия Саратовского университета. Новая серия, Серия Математика. Механика. Информатика. Саратов: Саратовский государственный университет им. Н.Г.Чернышевского. Т. 13, Вып. 4, ч.1, 2013, С.52-59.

3. Земсков А.В., Тарлаковский Д.В. Приближённое решение трёхмерной задачи об упругой диффузии для ортотропного слоя // Математичні методи та фізико-механічні поля, Львів, 2013, т. 56, № 2, С. 178-191

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

5. *Tarlakovskii D.V., Vestyak V.A., Zemskov A.V.* Dynamic Processes in Thermoelctromagnetoelastic and Thermoelastodiffusive Media // Encyclopedia of thermal stress, volume 2, C-D, Springer Dordrecht Heidelberg New York London, Springer reference. 2014. P 1064 – 1071.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТУРБОАГРЕГАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДИК

Зиле А.З., Тарадай Д.В., Шуранова Ю.А.

(Москва)

Совершенствование и развитие методов и средств контроля технического состояния турбоагрегата является одним из эффективных путей повышения надежности эксплуатации и предотвращения возникновения аварийных ситуаций. Современные системы мониторинга и диагностики не позволяют в полной мере выявлять дефекты оборудования. Например, известны многократные случаи задеваний роторов, поломки болтов муфтовых соединений и других повреждений, когда стационарные системы контроля не позволяли предотвратить развитие аварий энергетического оборудования. Для повышения технического обслуживания, диагностирования и предупреждения развития аварийных ситуаций целесообразно учитывать все факторы, влияющие на динамическую надежность валопроводов, и выполнять комплексный контроль технического состояния турбоагрегатов.

Для более эффективного диагностирования дефектов валопроводов были разработаны методы и средства измерения крутильных колебаний валопроводов турбоагрегатов [1, 2]. Для этого были созданы программные и технологические средства с апробацией решений на стенде ВТИ, а затем и на турбоагрегатах 200 и 300 МВт. Система мониторинга контроля крутильных колебаний основана на измерениях временных интервалов между импульсами, создаваемыми датчиками при прохождении мимо них информационных элементов зубчатых колец в процессе вращения валопровода. Для генерации подобных импульсов в сечениях измерений и единичного опорного импульса от отметчика оборотов применялись датчики Холла. Впервые стационарная система контроля крутильных колебаний ВТИ была апробирована для турбоагрегата 300 МВт. Одновременно с динамическими параметрами крутильных перемещений разработанная система

обеспечивала также непрерывные измерения и регистрацию статической закрутки валопровода как важного диагностического параметра. Выполненные исследования показали, что крутильные колебания и статическая закрутка валопровода могут быть достаточно эффективно измерены методом временных интервалов. Эти измерения могут быть включены в системы вибродиагностики для дополнительного контроля повреждаемости оборудования.

В процессе эксплуатации турбоагрегатов валопровод испытывает воздействие различных видов циклического и статического нагружения. Считается [3], что наиболее опасными являются термические напряжения, возникающие в высокотемпературных роторах высокого и среднего давления при пусках, остановках, изменениях активной нагрузки и пр. Именно по этим напряжениям в критических сечениях по длине РВД и РСД рассчитывается остаточный ресурс и оценивается эквивалентное время наработки по малоциклового усталости. Однако, учитывая опыт повреждения крупных турбоагрегатов, при оценке выработки ресурса валопровода необходимо учитывать и многоцикловую усталость. Основной причиной многоцикловой усталости являются переменные напряжения, возникающие под воздействием изгибных и крутильных колебаний при нестационарных режимах работы турбоагрегатов. Для оценки уточненного ресурса, предлагается учитывать многоцикловую усталость, которая определяется по переменным и постоянным напряжениям на участках валопровода, диагностируемыми расчетно-экспериментальными методами по значениям вибрации опор, их смещений при эксплуатации, амплитуд и частот крутильных колебаний.

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. Тарадай Д. В., Зиле А. З., Шуранова Ю. А. Выявление источников возбуждения крутильных колебаний и оценка эквивалентных часов выработки ресурса // Материалы XX международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.1. – М.: ООО «ТР-принт», 2014. – С. 178-180.
3. РД 34.17.440-96. Методические указания о порядке проведения работ при оценке индивидуального ресурса паровых турбин и продлении срока их эксплуатации сверх паркового ресурса. – М.:ВТИ, 1996.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОЧИСТКИ ЭЛЕМЕНТОВ ГИДРАВЛИКИ И СЛОЖНОФАСОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ГТД

Ивкин Е.И., Козинер Д.Ю.

(Москва)

В основе комплекса для автоматизированной очистки поверхностей различных деталей лежит оптимизированный под эти нужды малогабаритный трехкоординатный фрезерный станок производства ООО МП «Реабин». Модернизация станка заключается в наличии вмонтированного взамен шпиндельного узла ультразвукового преобразователя, а также ванны для ультразвуковой очистки, перемещающейся по оси Y. Станок через блок управления подсоединен к персональному компьютеру и работает через программу Mach3 CNC Control Application Release. Данная программа использует стандартный для большинства станков ЧПУ язык программирования ИСО 7-бит (ISO 7-bit) и позволяет создавать управляющие программы, как вручную, так и загружать их из САМ-систем. Ультразвуковой генератор комплекса имеет рабочую частоту 22кГц, ультразвуковой пьезоэлектрический преобразователь имеет рабочую амплитуду 3-30 мкм. Все агрегаты комплекса работают от напряжения питания 220В. Принцип действия направленной высокоинтенсивной ультразвуковой очистки заключается в том, что активное образование кавитации происходит непосредственно вблизи загрязненной поверхности и оказывает максимальный разрушающий эффект на загрязнение. Процесс ультразвуковой очистки лучше всего совмещать с операциями, значительно повышающими производительность, такими как: предварительная замочка в технологической моющей среде; промывка деталей после очистки от технологических сред; просушка деталей. Подобный комплекс способен выполнять широкий ряд задач связанных с очисткой различных поверхностей деталей ГТД, элементов гидравлики и других сложнофасонных изделий от стойких загрязнений, имеющих сложную природу и не поддающихся качественной очистке другими методами.

Литература

1. *Панов А. П.*, Ультразвуковая высокоамплитудная очистка поверхности. – М: Наука, 1986.

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Игумнов Л.А., Петров А.Н., Ипатов А.А., Аменицкий А.В.

(Нижний Новгород)

На основе аналитических решений, полученных в изображениях по Лапласу и численно обращенных в пространство оригиналов, проводится анализ распространения динамического импульса в пороупругой среде.

Исследуется распространение волн в полностью и частично насыщенных пористых средах на примере задачи о действии осевой силы в виде функции Хевисайда по времени на одномерный стержень. Рассматриваются двухкомпонентная и трехкомпонентная среды соответственно с четырьмя и пятью базовыми функциями описания волнового процесса. Возникающая система дифференциальных уравнений в частных производных и краевые условия записывается в терминах преобразований Лапласа по переменной времени. Для построения оригинала аналитического решения используется шаговый метод численного обращения преобразования Лапласа. Параметры пористого материала соответствуют скальной породе и водонасыщенному песку. Вычисления проводились при различных значениях коэффициента насыщенности среды.

Особенностью волнового процесса в насыщенных пористых средах является существование трех типов волн: в отличие от упругого случая появляется медленная волна, которая может существенно изменить волновую картину. Для демонстрации эффекта проявления медленной волны используется прием вариации коэффициентом проницаемости. Появление эффекта медленной волны отмечено на графиках поровых давлений: для порового давления жидкого наполнителя наблюдается два скачка амплитуды, для газообразного – три. Полученные результаты сравниваются с результатами других авторов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 14-08-31415-мол_а, 14-08-31410-мол_а, 13-08-00658-а, 14-08-00811-а).

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ТРЕХМЕРНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ПОРОВАЗКОУПРУГОСТИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Игумнов Л.А., Белов А.А., Ипатов А.А.

(Нижний Новгород)

Рассматриваются краевые задачи линейной трехмерной динамической теории поровязкоупругих. Исследуются волновые поля в поровязкоупругих телах. Граница тела может быть достаточно произвольного вида и описываться по-

верхностью кусочно-ляпуновского типа. Для описания вязкоупругих свойств материала использованы классические модели вязкоупругости (Максвелла, Кельвина-Фойгта, стандартного вязкоупругого тела). Базовое пороупругое решение получается на основе классической модели Био. Поровязкоупругое решение строится с использованием принципа соответствия.

В качестве метода решения трехмерных краевых задач применяется метод гранично-интегральных уравнений. Численная схема основана на использовании формулы Грина-Бетти-Соммильяны. Гранично-элементные схемы используют согласованную аппроксимацию граничных функций. Используются интегральные преобразования Лапласа по времени и численные алгоритмы их обращения. При поэлементном численном интегрировании используется метод Гаусса и иерархический алгоритм интегрирования.

Показано влияние вязкости на волновые картины откликов в конечных телах. Продемонстрирован эффект перестройки волновых полей поровязкоупругих откликов в зависимости от параметра вязкоупругой модели, когда свойства вязкоупругого материала модели стандартного вязкоупругого тела изменялись с мгновенных модулей на длительные.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 14-08-31415-мол_а, 14-08-31410-мол_а, 13-08-00658-а, 14-08-00811-а).

Литература

1. Schanz M. Wave Propagation in Viscoelastic and Poroelastic Continua // Berlin Springer, 2001. – 170 p
2. Игумнов Л.А., Белов А.А., Литвинчук С.Ю. Об исследовании влияния вязкости материала на волновые поля перемещений и напряжений методом граничных элементов // Проблемы прочности и пластичности: Межвузовский сборник. Н.Новгород: Изд-во ННГУ. 2006. Вып. 68. С.161-169.
3. Biot M.A. Theory of deformation of a porous viscoelastic anisotropic solid // J. Appl. Phys. 27(5). 1956. P.459–467
4. Игумнов Л.А., Ипатов А.А., Сабаева Т.А. Влияние вязкости на динамический отклик в вязкоупругих и поровязкоупругих телах // Проблемы прочности и пластичности. Межвуз. сб. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ. 2014. Вып. 76 (2). С. 106-113.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ДИНАМИКИ ТРЕХМЕРНЫХ ОДНОРОДНЫХ ЭЛЕКТРОУПРУГИХ И АНИЗОТРОПНЫХ УПРУГИХ ТЕЛ

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

(Нижний Новгород)

Представлена схема прямого подхода метода граничных элементов, направленная на решение динамических начально-краевых задач трехмерных линейных теорий анизотропной упругости и электроупругости. Учет связанности механического и электрического полей основан на использовании специальной формализации, которая позволяет построить обобщенную начально-краевую задачу для упругих и электроупругих тел.

Гранично-элементная методика основана на точных сингулярных граничных интегральных уравнениях (ГИУ) прямого подхода в пространстве изображений по Лапласу по временной переменной [1]. Для получения дискретного аналога ГИУ используется схема на основе модели согласованной аппроксимации. В отличие от широко распространённого изопараметрического подхода, граница области аппроксимируется квадратичными элементами, обобщенные перемещения – линейными, а обобщенные поверхностные усилия – постоянными элементами. Для пространственной дискретизации используется метод локаций. Динамические анизотропные и электроупругие фундаментальные решения, которые являются ядрами ГИУ, записаны в виде интеграла по единичной полусфере [2, 3]. Описана интерполяционная схема для эффективного вычисления статической части фундаментальных решений.

Реализация предложенного гранично-элементного подхода протестирована на решении следующих динамических задач: о действии нагрузки на торец призматического анизотропного упругого тела; о совместном воздействии механической нагрузки в виде функции Хевисайда по времени и электрического потенциала на Г-образное однородное трехмерное электроупругое тело. Проведено сравнение полученных решений с результатами, полученными в известном пакете конечно-элементного моделирования.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», соглашение № 14.578.21.0036 (уникальный идентификатор RFMEFI57814X0036) и РФФИ (проект 14-08-31410).

Литература

1. *Igunov L.A., Markov I.P., Rataushko Ya.Yu.* Modeling the dynamics of 3-D elastic anisotropic solids using boundary element method // *Adv. Mat. Res.* - 2014. - Vol. 1040. - P. 633-637.
2. *Wang C.Y., Achenbach J.D.* Elastodynamic fundamental solutions for anisotropic solids // *Geophys. J. Int.* - 1994. - Vol. 118. - P. 384-392.
3. *Wang C.Y., Zhang Ch.* 3-D and 2-D Dynamic Green's functions and time-domain BIEs for piezoelectric solids // *Eng. Anal. Bound. Elem.* - 2005. - Vol. 29. - P. 454-465.

ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОЙ ОСАДКИ ПОДЗЕМНОГО ГАРАЖА ПО ДВУМ МОДЕЛЯМ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ИХ СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ

Каюмов Р.А., Шакирзянов Ф.Р., Бутенко А.В.

(Казань)

Проводится расчет осадки системы конструкция-грунт при длительных и переменных нагрузках. Связь деформаций и перемещений считается линейной, используются соотношения Коши. Для оценки прочности конструкции используется критерий Мизеса, а в качестве критерия прочности грунта принимается критерий Друккера-Прагера [1], записываемый в форме:

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

Полная деформация определяется выражением [2]:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^c. \quad (1)$$

Пластичность грунта описывается ассоциированным законом течения [2]:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}. \quad (2)$$

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

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

Ползучесть грунта учитывается по двум моделям деформирования грунтов – инкрементальной и наследственной теориям. Соотношения для деформации ползучести по инкрементальной теории приняты в виде [3]:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^c = \frac{\eta \cdot \sigma_{ij}^b}{1 + A \cdot \varepsilon_i^c}. \quad (4)$$

Наследственная теория ползучести принята в виде [3]:

$$\varepsilon_{ij}^c = \int_0^t \frac{\mu \cdot \sigma_{ij}^\beta}{(t-\tau)^\alpha} d\tau. \quad (5)$$

Поскольку в наследственной теории ползучести необходимо запоминать всю историю нагружения, что усложняет расчеты, то предлагается упрощенная методика вычисления деформаций ползучести по наследственной теории с помощью аппроксимации напряжений по четырем их значениям в различные моменты времени [4].

Проводится тестовый расчет растяжения балки по двум методикам расчета и их сравнительный анализ. Для этого параметры, входящие в соотношения (4)-(5) находятся из условия минимальности квадратичной невязки деформаций ползучести, полученных по инкрементальной и наследственной теориям при некоторой заданной нагрузке.

В качестве модельной рассмотрена задача оценки осадки подземного гаража, находящегося в грунтовом массиве. Подземный гараж представляет из себя двухсекционное коробчатое строение. Сверху на него действует распределенная нагрузка от верхней части здания, а внутри гаража действует переменная нагрузка от автомобилей. НДС системы определяется методом конечных элементов (МКЭ).

Для выявления закономерностей влияния геометрических и механических характеристик на осадку системы проводятся численные эксперименты на базе разработанного авторами комплекса программ МКЭ.

Проводится анализ и выявляются закономерности при постоянной и переменной нагрузках.

Предложенная методика быстрого вычисления деформаций ползучести по наследственной теории путем аппроксимации напряжений по четырем значениям времени дает результат близкий к точным.

При значениях нагрузок, отличных от тех, при которых были найдены коэффициенты η , μ , A , α , деформации ползучести сильно различаются. При переменной нагрузке инкрементальная и наследственная теории также дают сильно различающиеся результаты.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08-06018).

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., Бутенко А.В. Приближенный метод вычисления деформаций ползучести по наследственной теории и сравнение ее с инкрементальной теорией. // Изв. Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – Казань: Изд-во КазГАСУ, 2014. – № 3(29).

РАСЧЕТ ДВУТАВРОВОЙ БАЛКИ С ТРЕЩИНОЙ, НАХОДЯЩЕЙСЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕРАВНОМЕРНОЙ ЦИКЛИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Каюмов Р.А., Мухамедова И.З., Туйсина Е.Б.

(Казань)

Повышение эксплуатационной надежности строительных конструкций при снижении их материалоемкости является важнейшим направлением ресурсосберегающих технологий. Сложность прогнозирования поведения конструкций в конкретных зданиях при циклической нагрузке определяется многими факторами: геометрическими характеристиками сечения, схемой циклического нагружения, величиной амплитуды, природой материала и др. Все они оказывают влияние на закономерности зарождения и распространение усталостных трещин.

В работе рассмотрена шарнирно-опертая двутавровая балка, в середине сечения которой имеется малый технологический разрез. При данной постановке задачи, последний можно рассматривать как малую продольную трещину, длина которой будет увеличиваться под действием циклических нагрузок. Поскольку в середине поперечного сечения нормальные напряжения равны нулю, развитие трещины будет обуславливаться действием касательных напряжений. Считается, что балка разрушается в момент достижения трещиной ее критической величины. Изучается зависимость долговечности конструкции от амплитуды нагрузки, от начальной длины трещины. Исследуется возможность замены неравномерной циклической нагрузки, действующей на двутавровую балку, эквивалентной равномерной циклической нагрузкой.

Скорость подрастания трещины тем больше, чем больше размах напряжения и чем больше начальная длина трещины. Размах напряжений будет равен $\Delta\tau = 2\tau_{\max}$. Закон подрастания трещины аналитически можно записать в виде:

$$\dot{b} = K \cdot (\Delta\tau \cdot \sqrt{b})^m \quad (1)$$

где b – длина трещины в данный момент времени, $\dot{b} = db / dt$ – скорость подрастания трещины, K, m – механические характеристики материала балки.

Построена зависимость долговечности от амплитуды нагрузки и начальной длины трещины. При большой начальной длине продольного разреза (трещины) ресурс балки почти линейно зависит от этой длины.

Исследуется долговечность конструкции, когда амплитуда действующей нагрузки непостоянная величина. Тогда в соотношении (1) размах напряжений $\Delta\tau$ принимается некоторой функцией следующего вида:

$$\Delta\tau = \frac{\Delta\tau^{\max}}{\beta + 1} [\beta * \cos^2(\gamma \cdot t) + 1] \quad (2)$$

При неравномерной циклической нагрузке касательные напряжения в сечении балки с течением времени аппроксимируем некоторым законом:

$$\tau = \frac{\Delta\tau^{\max}}{2 \cdot (\beta + 1)} \sin(n \cdot \gamma \cdot t) \cdot [\beta * \cos^2(\gamma \cdot t) + 1], \quad (3)$$

здесь величина $n \cdot \gamma$ определяет частоту колебаний, параметр n характеризует число максимумов по нагрузке за один большой период, параметр β определяет отношение $\Delta\tau^{\max} / \Delta\tau^{\min}$

Рассмотрена возможность замены амплитуд нагрузок, входящих в один период (большой цикл), их среднеарифметическим значением :

$$P_0 = \sum_{i=1}^n P_i / n. \quad (4)$$

Ввиду большого числа больших циклов, будем считать, что разрушение образца происходит по истечении целого числа циклов. По линейной теории накопления повреждений, введем удельный параметр повреждений Ω ($0 \leq \Omega \leq 1$), накопленных балкой при циклическом нагружении.

Рассмотрено влияние увеличения максимальной амплитуды цикла P_{\max} неравномерной нагрузки на долговечность балки и зависимость долговечности балки от количества волн в одном большом периоде нагружения конструкции. Исследования показали, что величина нагрузки почти не влияет на относительную величину долговечности t^*/t_0 , а влияет величина P_{\max} / P_0 . Во-вторых, на t^*/t_0 существенно влияет количество волн n в периоде. Чем больше их количество, тем выше долговечность конструкции.

Проведено сравнение решения, полученное интегрированием уравнения (1) с решением, полученным по линейному закону накопления повреждений. Исследованы стационарный процесс, нестационарный процесс и решение задачи по линейной теории накопления повреждений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №15-08-06018).

Литература

1. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. – М.: Машиностроение, 1990. – 448 с.

2. Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. – М.: Машиностроение. – 312 с.
3. Брок Д. Основы механики разрушения. – М.: Высш. Школа, 1980. – 368 с.
4. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1980. – 640 с.
5. Каюмов Р.А., Тазюков Б.Ф. Расчет цилиндрической оболочки на циклическую прочность // Вестник Казанского технологического университета, 2012, № 9. – С. 162-164.
6. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1974. – 310 с.
7. Писаренко Г.С., Лебедев А.А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наукова думка, 1976. – 415 с.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ СЖАТЫХ КОМПОЗИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК К СИЛОВЫМ ВОЗМУЩЕНИЯМ

Колосов Г.И.

(Королёв)

Задача прогнозирования величин сжимающих усилий, при превышении которых присутствие малых силовых возмущений способно вызывать колебательную неустойчивость цилиндрических оболочек, решена с использованием уравнений возмущённого движения слоистых анизотропных оболочек, линеаризованных в окрестности их равновесных состояний, и динамического критерия устойчивости. Приведены результаты определения указанных величин сжимающих усилий 81 стеклопластиковой и 22 углепластиковых цилиндрических оболочек, для которых результаты экспериментальных исследований устойчивости при осевом сжатии опубликованы в печати. Установлено, что результаты прогнозирования границы неустойчивости исследованных оболочек к силовым возмущениям близки к нижней границе коэффициентов устойчивости, определенной на базе собранных экспериментальных данных.

Литература

1. Колосов Г.И. Прогнозирование положения нижней границы области устойчивости цилиндрических оболочек из стеклопластика при равномерном осевом их сжатии // Космонавтика и ракетостроение. 2010. Вып. 3(60).
2. Колосов Г.И. Особенности прогнозирования положения нижней границы области экспериментальных значений критических нагрузок цилиндрических оболочек из стеклопластика при равномерном осевом сжатии на основе концепции относительной устойчивости их равновесных состояний // Материалы XVI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы

механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Т.2. – Ч.: ГУП «ИПК «Чувашия», 2010.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫВИХА ВЕРТЛУЖНОГО КОМПОНЕНТА ИМПЛАНТАТА ПРИ ДИСПЛАЗИИ ВЕРТЛУЖНОЙ ВПАДИНЫ

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

(Казань, Чебоксары)

Целью работы стало определение методами математического моделирования критической величины недопокрытия ацетабулярного компонента, при которой возможна его имплантация без использования дополнительной опоры. Актуальность данного исследования продиктована клинической практикой и отсутствием четких рекомендаций тактике эндопротезирования с недопокрытием вертлужного компонента. В рамках исследования была построена трехмерная параметрическая модель, позволяющая моделировать поведение ацетабулярного компонента в вертлужной впадине при различных степенях дисплазии. В рамках проведения численного эксперимента учитывалась посадка в натяг чашки эндопротеза, степень дисплазии оценивалась на основе оригинального способа интраоперационного измерения площади недопокрытия вертлужного компонента. Были проведены расчеты для чашек диаметром 52, 54 и 56 мм. На основе результатов численных расчетов был изучен механизм потери несущей способности ацетабулярного компонента, получены зависимости величины критической силы от процента недопокрытия. Была выявлена стабильность имплантат при степени недопокрытия до 20%, до 30% величина критической силы превышает 2 кН и уменьшается с увеличением процента недопокрытия. Полученные данные сравнивались с клиническими и экспериментальными данными, на основании расчетных величин были построены статистические зависимости.

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.

ВЫБОР СХЕМ МОБИЛЬНЫХ СРЕДСТВ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Копанева Д.С., Толмачев К.С., Фетисов Г.П.

(Москва)

В докладе рассматривается проблема создания отечественных инвалидных колясок повышенной эффективности.

Их история берет свое начало в древнем Китае, первые упоминания были обнаружены в манускриптах 6 в.н.э. где упоминается кресло на колесах.

Еще одно историческое свидетельство древнего происхождения кресел-колясок, уже более подробное, с детальным описанием. В 1595 году для короля Испании Филиппа II изготовили инвалидную коляску повышенной комфортности. Коляска имела упоры для ног и подлокотники. Следующий прорыв в совершенствовании инвалидных колясок относится к 1655 году. Британец Стефан Фафлер, часовщик-инвалид сконструировал трехколесный аппарат. Фафлер передвигался в нем без посторонней помощи. Это была первая самоходная инвалидная коляска, приводимая в движение рычагом.

В 1783 году изобретатель из Англии, Джон Доусон, представил собственную модель инвалидной коляски. Назвал он ее «Бат-коляска», в честь родного города Доусона. У Бат-коляски было третье колесо, которым можно было рулить с помощью специальной ручки.

В настоящее время на российском и европейском рынке инвалидных колясок несчетное множество. Их различают как по производителями, так и по функционалу. Разработаны несколько вариантов кресел с механизмом передвижения по лестничным проемам, но ни одна модель так и не прижилась на российском рынке. Причины различны: дороговизна, массивность, неудобство эксплуатации и т.д.

Одна из последних разработок наших ученых – это инвалидная коляска «ступенькоход» Гради-Стандарт, презентация ее впервые произошла на Международном медицинском форуме – 2010 в Сокольниках. Эта инвалидная коляска действительно представляет интерес для инвалидов-колясочников России и стран ближнего зарубежья, где вопросы безбарьерного пространства для людей с ограниченными возможностями особенно актуальны. Но она имеет существенный недостаток - большой вес и высокую стоимость.

Основной задачей данного исследования является разработка максимально компактной, легкой, эргономичной, функциональной конструкции. Для этого в докладе будут рассмотрены различные варианты конструкций, материалов и технологий, макет, а также перечень необходимых испытаний.

Литература

1. «Кресла или индивидуальные средства передвижения, специально предназначенные для пациентов или людей с ограниченными возможностями в движении, например кресла на колесах» авторы Элизов Александр Дмитриевич, Семенов Александр Георгиевич, Иванов Владимир Михайлович, Самойлов Александр Дмитриевич.
2. <http://www.findpatent.ru/patent/242/2421202.html>
3. Патент на изобретение №:2102957 Автор:Борисов Сергей Владимирович, Борисов Алексей Владимирович, Коба Алексей Леонтьевич
4. «Коляска для передвижения по лестнице» автор: Харитонов А.Г.

РЕШЕНИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ ТЕРМОСИЛОВОЙ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ АНИЗОТРОПНОГО ДИСКА ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ МЕТОДОМ ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ВОЛЬТЕРРА 2-ГО РОДА

Королевич В.В., Медведев Д.Г.

(Прага, Минск)

Методом интегрального уравнения Вольтерра 2-го рода решается в общем виде осесимметричная плоская задача для полярно-ортотропного кольцевого диска переменной толщины $h(r)$, вращающегося с постоянной угловой скоростью ω в тепловом поле. Диск одновременно испытывает механическую деформацию от действия центробежных сил и температурную деформацию от теплового поля [1]. Предполагается, что температурное поле в диске зависит только от радиуса r , а упругие постоянные – модули Юнга E_r, E_θ , коэффициенты Пуассона $\nu_{r\theta}, \nu_{\theta r}$, модуль сдвига $G_{r\theta}$ - зависят от температуры $T(r)$.

Радиальная $\sigma_r(r)$ и тангенциальная $\sigma_\theta(r)$ компоненты напряжений в диске определяются через функцию напряжений $\psi_T(r)$ следующим образом:

$$\sigma_r(r) = \frac{1}{rh(r)} \psi_T(r), \quad \sigma_\theta(r) = \frac{1}{h(r)} \dot{\psi}_T(r) + \rho \omega^2 r^2,$$

где функция $\psi_T(r)$ вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} \psi_T(r) = & \int_{r_0}^r (r-s) \varphi_T^{(1)}(s) ds + h(r_0)(r-r_0) \sigma_\theta(r_0) + \\ & + r_0 h(r_0) \sigma_r(r_0) - h(r_0) \rho \omega^2 r_0^2 (r-r_0). \end{aligned}$$

Разрешающая функция $\psi_T(r)$ удовлетворяет интегральному уравнению Вольтерра 2-го рода:

$$\Phi_T(r) = \lambda \int_{r_0}^r K_1^{(T)}(r, s) \Phi_T(s) ds + f^{(T)}(r),$$

которое решается методом последовательных приближений, положив нулевое приближение $\Phi_{T,0}(r) = 0$ [2].

Распределение температурного поля $T(r)$ в диске находится теоретически из решения задачи теплопроводности в анизотропном диске или определяется экспериментально. Также определяются теоретически по формулам Белла [3] или экспериментально зависимости упругих постоянных композита от температуры.

Найдя функцию напряжений, $\Psi_T(r)$ получим распределение радиальных $N_r^{(T)}(r)$ и тангенциальных $N_\theta^{(T)}(r)$ усилий в анизотропном кольцевом диске, вращающемся в тепловом поле:

$$N_r^{(T)}(r) = \frac{1}{r} \left[\int_{r_0}^r (r-s) \Phi_T(s) ds + (r-r_0) N_\theta^{(T)}(r_0) + r_0 N_r^{(T)}(r_0) - h(r_0) \rho \omega^2 r_0^2 (r-r_0) \right],$$

$$N_\theta^{(T)}(r) = \int_{r_0}^r \Phi_T(s) ds + N_\theta^{(T)}(r_0) + [h(r)r^2 - h(r_0)r_0^2] \rho \omega^2.$$

Литература

1. Воробей В.В., Морозов Е.В., Татарников О.В.

Расчет термонапряженных конструкций из композиционных материалов. – М.; Машиностроение, 1992. – 240 с.

2. Королевич В.В., Медведев Д.Г. Интегральные уравнения Вольтерра 2-го рода плоской задачи теории упругости для вращающихся алярно-ортотропных дисков переменной толщины// Вестник БГУ. Сер.1.-2010.- №1- С. 160-162.

3. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых тел; В 2-х ч.- М.; Наука, 1984.-1027 с.

РАСЧЕТ ТЕРМОСИЛОВОГО ИЗГИБА ВРАЩАЮЩЕГОСЯ АНИЗОТРОПНОГО ДИСКА ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ МЕТОДОМ ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ВОЛЬТЕРРА

Королевич В.В., Медведев Д.Г.

(Прага, Минск)

С помощью интегрального уравнения Вольтерра 2-го рода решается в общем виде задача об осесимметричном изгибе полярно-ортотропного диска пе-

ременной толщины $h(r)$, вращающегося с постоянной угловой скоростью ω во внешнем тепловом поле.

Пусть раскалённый поток газа или пара направлен перпендикулярно к срединной плоскости вращающегося анизотропного диска. В результате действия центробежных сил и температурного поля диск будет испытывать растягивающие усилия в плоскости диска. Воздействие осесимметричного потока газа интенсивностью $q_z(r)$, направленного нормально к срединной плоскости диска, вызовет осесимметричный изгиб. Таким образом, анизотропный диск одновременно будет испытывать растяжение и изгиб под действием приложенных нагрузок. Здесь предполагается, что распределение температуры T в анизотропном композитном диске зависит только от радиуса r , а упругие постоянные композита зависят от температуры $T(r)$.

Как нами показано в работе [1], задача сводится к нахождению функции $\vartheta_r(r)$ - угла поворота нормали к срединной плоскости диска, определяемая по

$$\text{формуле: } \vartheta_r(r) = \int_{r_0}^r (r-s) \Theta_0^{(T)}(s) ds + \frac{M_r(r_0)}{D_{11}(r_0)} + \frac{1}{r_0} [r_0 - \nu_{\theta r}(r_0) \times (r - r_0)] \vartheta_r(r_0),$$

где $M_r(r_0)$ - изгибающий радиальный момент на внутреннем контуре диска радиуса r_0 .

Разрешающая функция $\Theta_0^{(T)}(r)$ удовлетворяет интегральному уравнению Вольтерра 2-го рода:

$$\Theta_0^{(T)}(r) = \lambda \int_{r_0}^r K_0^{(T)}(r, s) \Theta_0^{(T)}(s) ds + g_0^{(T)}(r),$$

которое решается методом последовательных приближений, положив $\Theta_{0,0}^{(T)}(r) = 0$.

Внутренние силовые факторы в диске: изгибающие радиальный $M_r(r)$, тангенциальный $M_\theta(r)$ моменты и поперечная сила $Q_r(r)$ выражаются через функцию $\vartheta_r(r)$ по формулам, приведенным в [1]. Распределение нормальных радиального $\sigma_r(r, z)$, тангенциального $\sigma_\theta(r, z)$ напряжений и касательных $\tau_{r\theta}(r) = \tau_{\theta r}(r)$ напряжений рассчитываются по известным формулам.

Литература

1. Королевич В.В., Медведев Д.Г. Интегральные уравнения Вольтерра 2-го рода в задачах изгиба вращающихся полярно-ортотропных дисков переменной толщины // Вестник БГУ. Сер.1. – 2012.- №3 – С. 108-116.

**АНАЛИЗ ВЫНУЖДЕННЫХ НЕРЕЗОНАНСНЫХ
ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ
АНИЗОТРОПНОГО ДИСКА ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ МЕТОДОМ
ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ВОЛЬТЕРРА 2-ГО РОДА**

Королевич В.В.

(Прага)

В работе анализируются вынужденные изгибные колебания полярно-ортотропного кольцевого диска переменной толщины $h(r)$, вращающегося с постоянной угловой скоростью ω вокруг нормальной оси, проходящей через центр диска, и нагруженного осесимметричной поперечной нагрузкой $q_z(r, t)$, гармонически изменяющейся во времени t с частотой Ω , не совпадающей ни с одной из собственных частот колебаний диска («нерезонансный» случай).

Для решения поставленной задачи применяется операционное исчисление и линейные интегральные уравнения Вольтерра 2-го рода. Используя интегральное преобразование Лапласа функции динамического прогиба $w(r, t)$ и интенсивности изгибающей нагрузки $q_z(r, t) = q_0(r) \sin \Omega t$ по временной переменной t , перейдем от оригиналов этих функций к их изображениям [1]:

$$w(r, t) \square = W(r, p); \quad q_z(r, t) \square = q_0(r) \cdot \frac{\Omega}{p^2 + \Omega^2}.$$

Изображение $W(r, p)$ представим через разрешающую функцию $X^{(\omega)}(s, p)$:

$$W(r, p) = \frac{1}{6} \int_{r_0}^r (r-s)^3 X^{(\omega)}(s, p) ds + \frac{1}{6} (r-r_0)^3 \ddot{W}(r_0, p) + \\ + \frac{1}{2} (r-r_0)^2 \cdot \dot{W}(r_0, p) + (r-r_0) \cdot \dot{W}(r_0, p) + W(r_0, p).$$

Сама функция $X^{(\omega)}(s, p)$ удовлетворяет линейному интегральному уравнению Вольтерра 2-го рода:

$$X^{(\omega)}(r, p) = \lambda \int_{r_0}^r K^{(\omega)}(r, s, p) X^{(\omega)}(s, p) ds + f^{(\omega)}(r, p),$$

которое решается методом последовательных приближений, положив нулевое приближение $X_0^{(\omega)}(r, p) = 0$ [2]. Для найденного изображения $W(r, p)$ оригинал функции $w(r, t)$ равен сумме вычетов функции $W(r, p)e^{pt}$:

$$w(r, t) = \sum_{k=1}^n \operatorname{Re} s W(r, p) e^{pt},$$

где p_k - полюса порядка m функции $W(r, p)$.

Зная оригинал динамической функции прогиба $w(r, t)$,

можем по известным формулам [2] вычислить изгибающие моменты и поперечную силу в диске, а затем рассчитать нормальные $\sigma_r(r, z, t)$, $\sigma_\theta(r, z, t)$ и касательные $\tau_{rz}(r, t)$ динамические напряжения.

Литература

1. Диткин В.А., Прудников А.П. Справочник по операционному исчислению. М.; Высшая школа, 1965. – 466 с
2. Королевич В.В., Медведев Д.Г. Интегральные уравнения Вольтерра 2-го рода в задачах изгиба вращающихся полярно-ортотропных дисков переменной толщины // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2012. - № 3 – С. 108-116.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО АЭРОУПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СОСТАВНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С ГАЗОПРОНИЦАЕМЫМ СЛОЕМ ПРИ ВНУТРЕННЕМ ВЗРЫВНОМ НАГРУЖЕНИИ

Кочетков А.В., Крылов С.В., Турыгина И.А.

(Нижний Новгород)

Приводятся результаты численного исследования процессов динамического деформирования составной цилиндрической оболочки, защищенной изнутри рулонированным пакетом металлических плетеных проволочных сеток. Внутреннее нагружение оболочки осуществляется взрывом шарового заряда. Математическая модель деформирования пакетов проволочных сеток рассматривалась ранее в [1,2]. В рамках этой модели динамическое поведение пакета сетки с содержащимся поровым газом описывается на основе нелинейных уравнений динамики двух взаимопроникающих континуумов, каждый из которых имеет свои скорости, напряжения (давления) и температуры. Предполагается, что эффекты вязкости и теплопроводности существенны лишь в процессах межфазного взаимодействия. Пакет сетки деформируется нелинейно и анизотропно – в направлении, перпендикулярном к слоям сетки упругоупластически сжимается, а в окружном направлении – упругоупластически растягивается. Сдвиговые напряжения пренебрежимо малы. Упрощенная программная реализация данной модели оснащается экспериментальной диаграммой динамического сжатия в направлении, перпендикулярном слоям сетки. В окружном направлении путем вычислений подбирается значение эффективного упругого модуля E_{eff} на растяжение.

Численное решение задачи основывается на явной модифицированной схеме С.К.Годунова в эйлерово-лагранжевых сетках как для уравнений динамического деформирования металлической фазы, так и уравнений динамики порового газа. Расчет проводится при помощи программного кода UPSGOD в связанной постановке [3]. Как показывают результаты проведенных вычислений, процессы деформирования пакета сетки под действием продуктов взрыва носят колебательный характер, сопровождающийся периодическими отрывами от внутренней стальной оболочки в окрестности плоскости симметрии и следующими за этим новыми соударениями с ней. Частота таких колебаний определяется не только жесткостью пакета силовых наружных оболочек, но и зависит от жесткостных характеристик пакетов металлической сетки, за которые в применяемой модели отвечает параметр E_{eff} . Изменение данного параметра в сторону уменьшения влечет за собой снижение жесткости пакета сетки и уменьшению его сопротивляемости процессам раздачи в окружном направлении. В конечном итоге это может привести не к наблюдаемому в экспериментах снижению деформаций наружного корпуса, а, наоборот, к их увеличению. В случае значительного изменения E_{eff} в другую сторону наблюдается обратная картина - жесткость пакета сетки существенно завышается. В связи с этим выбирается оптимальное значение эффективного упругого модуля, при котором расхождение расчетных и экспериментальных данных по максимально достигнутым деформациям внешнего корпуса цилиндрической оболочки сводятся к минимуму.

В целом из проведенных расчетов следует, что наличие защитных пакетов плетёных сеток приводит к снижению максимальной окружной деформации рассмотренной составной оболочки примерно на 30%.

Приводятся также результаты численных исследований взаимодействия плоских ударных волн с разнесенными и консолидированными слоями плетеных сеток. Варьировалось количество слоев. Анализируются параметры проходящих и отраженных ударных волн. При прохождении ударных волн через пакет металлических плетеных сеток происходит ослабление амплитуды и импульса. С увеличением количества слоев сетки усиливается отраженная волна и ослабляется проходящая. Таким образом, преграда, представляющая собой пакет металлической плетеной сетки, выполняет свои функции – снижает нагрузку: как по амплитуде, так и по величине импульса проходящей ударной волны. При численном моделировании взаимодействия взрывной ударной волны с газопроницаемой преградой процессы теплообмена между металлом и газом оказывают возрастающее влияние на процесс с ростом количества слоев. Результаты численных исследований сопоставляются с известными экспериментальными данными.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №13-08-00219 а; №14-08-00197 а).

Литература

1. Абузяров М.Х., Глазова Е.Г., *Кочетков А.В., Крылов С.В.*, Романов В.И., Сырунин М.А.. Моделирование взаимодействия ударных волн с деформируемыми газопроницаемыми преградами. // Проблемы прочности и пластичности. Н.Новгород. Изд-во ННГУ: Межвуз. сб., 72.(2010) С.120-129.

2. Глазова Е.Г., *Кочетков А.В.* Численное моделирование взаимодействия деформируемых газопроницаемых пакетов сеток с ударными волнами // ПМТФ. 53(3) (2012) С.11-19.

3. М.Х. Абузяров, *С.В. Крылов*, Е.В. Цветкова. Моделирование гидроупругопластического взаимодействия с помощью программного комплекса UPSGOD // Проблемы прочности и пластичности. Н.Новгород. Изд-во ННГУ: Межвуз. сб., 75(1) (2013) С.25-32.

ПОВЕДЕНИЕ ТРЕХСЛОЙНОГО КЛИНА С ЗАПОЛНИТЕЛЕМ СПЛОШНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ВХОДЕ В ЖИДКОСТЬ

Крупенин А.М., Мартиросов М.И.

(Москва)

Рассматривается вертикальный удар (с нулевым углом атаки) о первоначально невозмущенную свободную поверхность идеальной несжимаемой жидкости (воды), занимающей нижнее полупространство, бесконечно длинного симметричного относительно вертикальной оси трехслойного клина (плоскокилеватого тела). Исследуется начальный этап такого взаимодействия, когда возникают максимальные гидродинамические нагрузки.

Начальная скорость контакта клина с жидкостью считается намного меньшей скорости распространения звука в жидкости, а угол килеватости клина является малой величиной (до 15°). Клин составлен из упругих трехслойных пластин симметричного строения по толщине и крепится к абсолютно жесткому массивному телу. Толщины тонких несущих слоев (обшивки) и заполнителя считаются известными, используемые материалы - заданными. Для изотропных несущих слоев приняты гипотезы Кирхгофа о несжимаемости, прямолинейности и перпендикулярности нормали к деформированной срединной поверхности.

Как известно, по способности воспринимать продольные усилия заполнители подразделяют на два вида: легкий и жесткий. Легкий заполнитель обладает крайне малым по сравнению с несущими слоями модулем упругости в направлении, параллельном поверхности несущих слоев, а жесткий заполнитель имеет сравнимый с несущими слоями модуль упругости в этом же направлении. Таким образом, в слоистом пакете с легким заполнителем можно пренебречь напряжениями растяжения—сжатия в направлении, параллельном поверхности несущих слоев. В настоящей работе рассматриваются сплошные заполнители из легкого

и жесткого изотропного материала. Считается, что в несжимаемом по толщине сплошном заполнителе деформированная нормаль остается прямолинейной. При принятых допущениях выведены (в безразмерном виде) и численно проанализированы уравнения движения пластин клина для этих случаев.

При определении гидродинамических нагрузок, действующих на клин, его смоченная поверхность аппроксимируется непрерывно расширяющейся плоской пластиной, причем скорость обтекания равна скорости погружения, а скорость расширения пластины – скорости увеличения смоченной поверхности (теория погружения Г.Вагнера).

Задача решается численно. Расчеты выполнены в среде MathCAD Professional 2001. Получены и исследованы эпюры гидродинамических давлений, нагрузок, перемещений, скоростей, ускорений, а также напряжений по времени и координате (по каждому из слоев трехслойного пакета). Проводится параметрический анализ. Дается сравнение полученных результатов с известными решениями Г.Вагнера для жесткого клина и А.Г.Горшкова для однослойного упругого клина, а также с некоторыми имеющимися экспериментальными и теоретическими данными отечественных и зарубежных специалистов, полученными при решении аналогичных задач нестационарной динамики.

Числовые примеры приведены для слоистого пакета с несущими слоями из алюминиевого сплава 1163РДТВ и различными заполнителями сплошной структуры (фторопласт-4 и др.). Выработаны практические рекомендации по использованию полученных результатов.

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), а также гранта Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 11-01-00540_a).

ПРОЦЕСС ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ВЯЗКОУПРУГОГО РАЗУПРочНЯЮЩЕГОСЯ МАТЕРИАЛА С ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫМ ЯДРОМ ПОЛЗУЧЕСТИ

Кудинов А.Н., Чусова Е.В.

(Тверь)

Рассмотрен частный случай теории ползучести. Для описания асимптотически ограниченной ползучести вязкоупругих материалов были использованы экспоненциальные ядра ползучести. При этом вводятся дополнительные кинетические уравнения, описывающие процесс накопления поврежденности. Предлагаемый вариант модели имеет следующий вид (1):

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t),$$

$$\dot{p}_1(t) = \lambda_1 \left(a_1 \left(\frac{\sigma}{\sigma_*} \right)^m - p_1(t) \right),$$

$$\dot{p}_2(t) = \lambda_2 \left(a_2 \left(\frac{\sigma}{\sigma_*} \right)^m - p_2(t) \right),$$

$$\sigma = \sigma_0(1 + \omega),$$

$$\dot{\omega} = \alpha \sigma \dot{p},$$

Начальные условия $p(0) = 0$, $\omega(0) = 0$

Здесь $p(t)$ — деформация ползучести; $p_1(t)$, $p_2(t)$ — составляющие деформации ползучести; σ_0 — номинальное напряжение; σ — истинное напряжение; ω — параметр повреждённости; λ_1 , λ_2 , a_1 , a_2 , m , α , σ^* — константы модели.

В ходе преобразования, задача была сведена к исследованию на устойчивость системы

$$\dot{p}_k(t) = \lambda_k (a_k b e^{\eta p} - p_k(t)), \quad k = 1, 2$$

с учётом $p(t) = p_1(t) + p_2(t)$ при различных постоянных значениях напряжения σ_0 .

Далее была составлена система уравнений возмущённого движения и используя метод Ляпунова исследования устойчивости по первому приближению (Взяв в качестве возмущённых переменных $y_k = p_k - p_k^0$, $k = 1, 2$) была получена система уравнений

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \lambda_1 (\eta p_1^0 - 1)x + \lambda_1 \eta p_1^0 y \\ \dot{y}(t) = \lambda_2 \eta p_2^0 x + \lambda_2 (\eta p_2^0 - 1)y \end{cases} \quad (2)$$

На основе метода сопряженных уравнений, предложенным в работе Кудинова А.Н. и Катулева А.Н [1], было проведено исследование потери устойчивости данной системы. Данный метод составляет основу для развития специального направления теории и критериев устойчивости нелинейных как автономных, так и неавтономных динамических систем без введения функции Ляпунова.

В результате исследования системы (2) было получено, что критерий устойчивости Гурвица для сопряженной системы выполняется при $\eta < \frac{1}{p^0}$ в любой момент времени; положение равновесия сопряженной системы будет

устойчивым и будет иметь место устойчивость невозмущенного состояния при

$$\sigma_0 p^0 < \frac{1}{\alpha t}.$$

Условие неустойчивости решения можно записать как $\sigma_0 p^0 \geq \frac{1}{\alpha t}$.

С учетом полученных условий, можно записать формулу для критической нагрузки $\sigma_0 p^0 = \frac{1}{\alpha t}$.

Данная задача была решена также в математическом пакете Maple 12. Для этого была составлена программа в Maple 12 на основе метода сопряженных уравнений, предложенного в работе Кудинова А.Н. $\sigma^* = 150$.

Из полученных результатов, было получено значение $\sigma_{плс} = 587$ МПа, которое отделяет область устойчивого деформирования (асимптотически ограниченная ползучесть при $\sigma_0 = const$) для $\sigma_0 \leq \sigma_{плс}$ от области неустойчивого деформирования (появление третьей стадии ползучести) для $\sigma_0 > \sigma_{плс}$.

В заключение следует отметить, что основным преимуществом предлагаемого метода сопряженных уравнений является возможность его применения к задачам исследования динамической устойчивости в самых разных областях науки и техники, уравнения которых сводятся к уравнению второго порядка и то, что для исследования устойчивости нет необходимости построения функции Ляпунова. Анализ полученных результатов показывает, что они хорошо согласуются с вычислениями, ранее проведенными вручную.

Литература

1. Кудинов А.Н., Катулев А.Н., Кузнецов А.Ю. Исследование устойчивости автономных нелинейных динамических систем. // Материалы XVI Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова – Москва, 2010. – С.110-112

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ПОЛЗУЧЕСТИ

Кузнецов Е.Б., Леонов С.С.

(Москва)

Рассматривается задача идентификации параметров модели одноосного растяжения прутков (диаметр $d = 42$ мм) из стали 45, широко используемой в авиации (например, для создания деталей трубопроводной арматуры после за-

калки и отпуска), при постоянных напряжениях и температуре $T = 850^\circ \text{C}$. Для ее описания используется система двух обыкновенных дифференциальных уравнений теории структурных параметров Ю.Н. Работнова с шестью скалярными параметрами $B_\varepsilon, B_\omega, \alpha, m, n, k$ [1,2]

$$\begin{cases} \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{B_\varepsilon \sigma_0^n}{\omega^\alpha (1 - \omega^{\alpha+1})^m}, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{B_\omega \sigma_0^k}{\omega^\alpha (1 - \omega^{\alpha+1})^m}, \end{cases} \quad (1)$$

где ε – деформация ползучести; σ_0 – начальное напряжение; ω – параметр поврежденности, t – время.

В качестве начальных условий берутся однородные [2]:

$$t = 0 : \varepsilon(0) = 0, \omega(0) = 0. \quad (2)$$

В качестве дополнительных данных будем использовать результаты эксперимента по одноосному растяжению цилиндрических образцов из стали 45 для некоторого уровня начального напряжения σ_0 [2]

$$\varepsilon_i = \varepsilon(t_i), \omega_i = \omega(t_i), t_i \in (0, t_*], i = 1, \dots, l, \quad (3)$$

где t_i – момент времени снятия i -ого экспериментального значения, ε_i и ω_i – экспериментальное значение деформации ползучести и параметра поврежденности в момент времени t_i , l – количество экспериментальных точек, t_* – значение длительной прочности конструкции.

Для идентификации параметров начальной задачи (1)-(2) будем использовать методы нейросетевого моделирования [3], согласно которым разложим искомые функции $\varepsilon(t)$ и $\omega(t)$ по нейросетевому базису

$$\begin{cases} \hat{\varepsilon}(t, \mathbf{c}, \mathbf{a}) = \sum_{j=1}^{N_1} \text{th}(c_{0j} t + c_{1j}) \cdot \exp\{-a_{0j}(t - a_{1j})^2\}, \\ \hat{\omega}(t, \mathbf{b}, \mathbf{d}) = \sum_{s=1}^{N_2} \text{th}(b_{0s} t + b_{1s}) \cdot \exp\{-d_{0s}(t - d_{1s})^2\}. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь $\mathbf{c} = \{c_{ij}\}$; $\mathbf{a} = \{a_{ij}\}$; $\mathbf{b} = \{b_{is}\}$; $\mathbf{d} = \{d_{is}\}$; $i = 1, 2$; $j = 1, \dots, N_1$; $s = 1, \dots, N_2$ – прямоугольные матрицы нейросетевых коэффициентов.

Используя нейросетевое разложение (4), систему уравнений (1), начальные условия (2) и экспериментальные данные для некоторого значения напряжения σ_0 (3), запишем нормированный функционал ошибки для данной задачи [3]

$$J(B_\varepsilon, B_\omega, \alpha, m, n, k, \mathbf{c}, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{d}) = \frac{1}{2 \cdot \delta \cdot M + \delta_1 + \delta_2 + (\delta_3 + \delta_4) \cdot l} \times$$

$$\left\{ \delta \sum_{i=1}^M \left[\left| \frac{d\hat{\varepsilon}}{dt} - \frac{B_\varepsilon \sigma_0^n}{\hat{\omega}^\alpha (1 - \hat{\omega}^{\alpha+1})^m} \right|^2 + \left| \frac{d\hat{\omega}}{dt} - \frac{B_\omega \sigma_0^k}{\hat{\omega}^\alpha (1 - \hat{\omega}^{\alpha+1})^m} \right|^2 \right]_{t=\xi_i} + \delta_1 |\hat{\varepsilon}(0, \mathbf{c}, \mathbf{a})|^2 + \right.$$

$$\left. + \delta_2 |\hat{\omega}(0, \mathbf{b}, \mathbf{d})|^2 + \delta_3 \sum_{j=1}^l |\hat{\varepsilon}(t_j, \mathbf{c}, \mathbf{a}) - \varepsilon_j|^2 + \delta_4 \sum_{j=1}^l |\hat{\omega}(t_j, \mathbf{b}, \mathbf{d}) - \omega_j|^2 \right.$$

Здесь $\{\xi_i\}_{i=1}^M$ – набор пробных точек, равномерно распределенных на интервале $(0, t_*)$; выражение под знаком первой суммы берется в точке $t = \xi_i$, M – количество пробных точек.

Для идентификации параметров $B_\varepsilon, B_\omega, \alpha, m, n, k$ решается задача минимизации

$$J(B_\varepsilon, B_\omega, \alpha, m, n, k, \mathbf{c}, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{d}) \xrightarrow{B_\varepsilon, B_\omega, \alpha, m, n, k} \min_{\mathbf{c}, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{d}}. \quad (5)$$

Учитывая особенности протекания процесса деформирования, на параметры модели необходимо наложить следующие ограничения

$$B_\varepsilon > 0, B_\omega > 0, \alpha > 0, m > 0, n > 0, k > 0. \quad (6)$$

Задача минимизации с ограничениями типа неравенств (5)–(6) решалась в среде Mathcad 14 методом сопряженных градиентов [4]. Найдены параметры системы (1) и коэффициенты $\mathbf{c}, \mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{d}$ нейросетевого разложения (4). Полученные данные дают лучшее соответствие с экспериментом по сравнению с решениями, полученными в работе [2], что говорит об эффективной применимости нейросетевого подхода к данному классу задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 13-08-00473а).

Литература

1. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966. – 752 с.
2. 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.
3. Васильев А.Н., Тархов Д.А. Нейросетевое моделирование. Принципы. Алгоритмы. Приложения. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2009. – 528 с.
4. Полак Э. Численные методы оптимизации. Единый подход. – М.: Мир, 1974. – 376 с.

ПОДБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ ФОРМЫ ПОПЕРЕЧНОЙ ПЕРФОРИРОВАННОЙ ПЕРЕГОРОДКИ РЕЗЕРВУАРА АВТОЦИСТЕРНЫ

Кузнецова М. Г., Шимановский А. О.

(Гомель)

Значительная часть наливных грузов в настоящее время транспортируется в автоцистернах. Особенностью динамики автомобилей с жидким грузом является возможность относительного перемещения жидкости в резервуаре. Наиболее эффективным способом улучшения гашения колебаний жидких грузов на сегодняшний день считается установка внутренних перегородок. Для обеспечения лучших динамических качеств автомобиля-цистерны необходимо определить конфигурацию перегородки, при которой гашение колебаний транспортируемого жидкого груза будет происходить наиболее быстро и эффективно, а также должна быть обеспечена достаточная прочность конструкции цистерны.

Выполненные по методике, описанной в [1], расчеты показали, что наибольшая эффективность гашения колебаний обеспечивается при установке перфорированных перегородок. Результаты определения зависимости диссипации энергии от размера отверстий перфорации показали, что наилучшее гашение колебаний жидкостей происходит при использовании перфорированной перегородки с размером отверстий перфорации 18–22 см. Причем эффект от наличия перфорации проявляется при площади отверстий, составляющей 30 % и более от площади перегородки.

Опыт эксплуатации цистерн показывает, что в местах соединения перегородки с оболочкой после определенного периода эксплуатации появляются трещины, что свидетельствует о превышении напряжениями значений предела усталости материала. Стандартом установлено, что глубина перегородки не должна быть меньше 100 мм [2]. Кроме того, для удобства изготовления (с технологической точки зрения) целесообразно, чтобы перегородка имела форму тела вращения и толщину, одинаковую с оболочкой резервуара [2, 3].

Поэтому в качестве расчетной схемы для определения рациональной формы перегородки принята конструкция резервуара с установленной внутри него перфорированной перегородкой, в которой выполнены отверстия одинакового диаметра, равномерно распределенные по площади перегородки. Поставлена задача по определению таких координат точек перегородки, расположенных в поперечной плоскости, чтобы они были равноудалены друг от друга по вертикали и формировали поперечный профиль оболочки перегородки.

В качестве метода решения задачи об определении рациональной формы перфорированной перегородки использован генетический алгоритм в канонической форме [4]. Для решения оптимизационной задачи сначала был создан исходный массив генов, состоящий из координат точек перегородки, выбранных

из всей области допустимых значений ($0 \leq x_k \leq 100$ мм). С целью определения координат с точностью до 1 мм в пределах рассматриваемого интервала для каждой точки рассматривается $2^7 = 128$ возможных положений, взятых с постоянным шагом. Затем из генов были созданы наборы хромосом, определяющие форму перегородки. Точки построения поперечного профиля перегородки соединялись плавной кривой с применением кубических сплайнов, после чего образовывалась оболочка путем вращения кривой вокруг оси Ox . Затем выполнялся расчет напряженно-деформированного состояния получившейся конструкции под действием гидродинамических нагрузок, в качестве которых использованы максимальные значения давления, найденные в результате конечноэлементного моделирования перетекания жидкости в резервуаре с перфорированной перегородкой в среде ANSYS CFX.

В качестве целевой функции выступала функция минимизации максимальных эквивалентных по Мизесу напряжений, возникающих в конструкции под действием статического нагружения. Установлено, что наименьшие напряжения возникают в перфорированной перегородке выпуклой формы, особенностью которой является достаточно большой радиус кривизны в центральной части и значительно меньший в области соединения с оболочкой резервуара. Полученные значения эквивалентных напряжений нигде не превышают предел текучести конструкционной стали (400 МПа), что свидетельствует о выполнении требований по прочности конструкций.

Таким образом, на основе использования генетического алгоритма получена оптимальная форма перфорированной перегородки, имеющей форму тела вращения, при использовании которой наряду с обеспечением максимальной диссипации энергии жидкости достигается минимизация напряжений. Предлагаемое техническое решение дает возможность снижения напряжений в перегородке и в оболочке резервуара. Практическое применение разработки [5] позволит повысить конкурентоспособность цистерн и продлить срок их эксплуатации.

Литература

1. *Shimanovsky A., Kuzniatsova M., Sapietová A. Modeling of Newtonian and Non-Newtonian Liquid Sloshing in Road Tanks while Braking // Applied Mechanics and Materials.* – 2014. – № 611. – P. 137–144.
2. Автомобильные транспортные средства для транспортирования и заправки нефтепродуктов: ГОСТ Р 50913–96. – Введ. 10.06.96. – М.: Госстандарт России, 2003. – 19 с.
3. Цистерны для пищевых жидкостей, устанавливаемые на автотранспортные средства. Общие технические условия: ГОСТ 9218–86. – Введ. 01.01.87. – М.: Госстандарт России, 2001. – 10 с.
4. Гладков Л. А., Курейчик В. В. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. М. Курейчик. – М.: Физматлит, 2006. – 320 с.

5. Кузнецова М. Г., Шимановский А. О. Перегородка резервуара автоцистерны: пат. 9993 Респ. Беларусь: МПК В 60Р 3/22 / заявитель Бел. гос. ун-т трта. – № u20130655 ; заявл. 05.08.2013; опубл. 28.02.2014 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 1. – С. 169.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ
НЕСТАЦИОНАРНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ НАГРУЗКИ**

Кутуев С.А., Тарлаковский Д.В.

(Москва)

Современные расчеты на прочность элементов конструкций, выполненных из композиционных материалов, преимущественно проводятся численными методами. В данной работе изложен подход к таким задачам с аналитической точки зрения.

Рассматривается полуплоскость из ортогонально армированного стеклопластика под действием нестационарной касательной нагрузки. Такой композит является ортотропным материалом.

Предлагается методика нахождения нестационарных поверхностных функций влияния для ортотропной полуплоскости при задании нагрузки, действующей вдоль ее границы в виде дельта-функции Дирака $\delta(x, \tau)$. Задача решается с помощью преобразований Лапласа по времени и Фурье по координате x вдоль границы $z=0$ полуплоскости к системе уравнений нестационарной теории упругости в перемещениях с однородными начальными условиями. Оригиналы функций влияния строятся с помощью совместного обращения данных преобразований через их аналитические представления.

Компоненты напряженно-деформированного состояния ортотропной полуплоскости являются свертками описывающих нагружение функций с соответствующими функциями влияния.

В качестве примера на рис. 1 представлены зависимости от времени функции влияния $\Gamma(x, \tau)$, соответствующей напряжению σ_{13} при $z=0$.

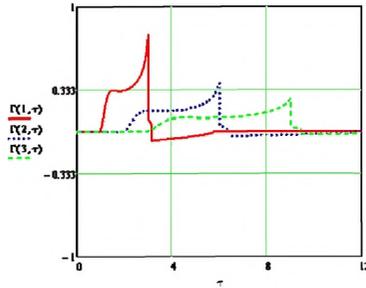


Рис. 1.

В случае кинематических граничных условий вида

$$u_1|_{z=0} = u_0(x, \tau), u_3|_{z=0} = 0, \quad (1)$$

напряжения $\sigma_{13}(x, \tau)$ вычисляется как следующая свертка:

$$\sigma_{13}(x, \tau) = \int_0^{\tau} \int_{-\infty}^{\infty} u_0(\xi, t) \Gamma(x - \xi, \tau - t) d\xi dt.$$

Ее график при $u_0(x, \tau) = \delta(x) \cdot e^{-\tau}$ представлен на рис. 2.

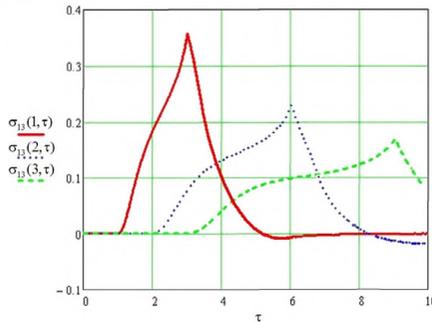


Рис. 2.

Показано, что из решения нестационарной задачи при $u_0(x, \tau) = H(\tau)\delta(x)$ с использованием предельного перехода при $\tau \rightarrow \infty$ вытекает решение статической задачи типа Фламана для ортотропной полуплоскости.

Таким образом, с помощью полученных поверхностных функций влияния для ортотропной полуплоскости можно найти все компоненты ее напряженно-деформированного состояния при любом нестационарном воздействии на нее.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 15-08-00787) и гранта Президента РФ НШ-2029.2014.8.

ВЗАИМНО-ОДНОЗНАЧНЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ УПРУГИМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ И НАПРЯЖЕНИЯМИ НА ГРАНИЦЕ ПРОИЗВОЛЬНО-НЕОДНОРОДНОЙ ПОЛОСЫ

Куштур Р.М., Токовый Ю.В., Айзикович С.М.

(Львов, Ростов-на-Дону)

Проблема управления напряженно-деформированным состоянием неоднородных тел [1] и достижения требуемых показателей эксплуатационных характеристик элементов конструкций при различных способах их нагружения и закрепления актуализирует потребность получения явных взаимно-однозначных соотношений между напряжениями и перемещениями, в том числе, на границе исследуемых тел при произвольной зависимости их свойств от координаты места точки. Наряду с безусловными преимуществами в построении аналитических решений поставленных задач теории упругости и термоупругости для неоднородных тел с краевыми условиями в перемещениях и/или напряжениях, наличие таких соотношений позволяет избежать физически-некорректных результатов [2, 3], а также сравнительно легко получить интегральные условия сплошности для компонент тензора деформации, которые выступают критериями точности при численной реализации решений или использовании непрямых методов решения. Для получения такого вида соотношений, не теряющих своего смысла на границе исследуемого неоднородного тела, необходимо иметь в распоряжении аналитическое решение соответствующей задачи теории упругости или термоупругости для любого из указанных типов краевых условий, явно выражающее искомые компоненты вектора перемещений либо тензора напряжений через заданные факторы нагружения при произвольной зависимости свойств материала от координат. Построение решений такого класса вызывает определенные трудности вследствие того, что исходные дифференциальные уравнения указанных задач содержат неизвестные переменные коэффициенты.

В настоящем докладе излагается методика решения плоских задач теории упругости и термоупругости для неоднородной полосы с произвольным изменением упругих свойств по ширине при заданных на ее продольных сторонах краевых условий в напряжениях, перемещениях или условий смешанного типа. С использованием эффективного метода построения решений плоских квазистатических задач теории упругости и термоупругости в напряжениях, основанного на непосредственном интегрировании исходных дифференциальных уравнений с дальнейшим их сведением к интегральным уравнениям Вольтерры второго рода и применением метода резольвентного ядра [4], получены аналитические решения указанных задач, выражающие компоненты тензора напряжений через усилия (заданные или определяемые из соответствующей задачи) на продольных сторонах полосы. При помощи корректного интегрирования дифферен-

циальных уравнений Коши и построенного решения получены взаимно-однозначные соотношения между упругими перемещениями и напряжениями на сторонах полосы, позволяющие свести поиск аналитических решения указанных задач для любых типов краевых условий к задаче в напряжениях с известным решением.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 13-08-01435-а 14-08-92003), ННС (проект 14-07-90406) и совместного гранта НАН Украины и РФФИ (проект 0114U005082).

Литература

1. *Кушнір Р.М., Попович В.С., Ясінський А.В.* Оптимізація та ідентифікація в термомеханіці неоднорідних тіл // Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. Я.Й. Бурака, Р.М. Кушніра. – Львів: СПОЛОМ, 2011. – Т.5. – 256 с.

2. Вигак В.М. Корректные решения плоских задач теории упругости для полуплоскости // Прикл. механика. – 2004. – Т. 40. – № 3. – С. 55-62.

3. Rychahivskyy A.V. *Tokovyy Yu.V.* Correct analytical solutions to the thermoelasticity problems in a semi-plane // J. Thermal Stresses. – 2008. – V. 31. – № 11 – P. 1125-1145.

4. *Tokovyy Y., Ma C.-C.* An explicit-form solution to the plane elasticity and thermoelasticity problems for anisotropic and inhomogeneous solids // Int. J. Solids Structures. – 2009. – V. 46. – № 21. – P. 3850–3859.

УТОЧНЁННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЁТА ОБЪЁМА РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ В ГАЗОГИДРАВЛИЧЕСКОМ ПРИВОДЕ С ВЫТЕСНИТЕЛЬНЫМ ИСТОЧНИКОМ ЭНЕРГИИ

Лалабеков В.И., Самсонович С.Л.

(Москва)

Стремление к энергомассовому совершенству элементной базы летательного аппарата (ЛА) 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 ЛА 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, составляющего 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.

В работе [2] на основании действия в приводе основных законов сохранения масс газа и жидкости и баланса сил, действующих в газо-гидромеханической системе, которой является привод, разработана его математическая модель (ММ) с использованием типовых блоков библиотеки Simulink. ММ позволяет исследовать работу привода при действии штатных и аномальных возмущений, а также провести синтез параметров для реализации экономичных режимов функционирования. Однако, данная ММ обладает недостатками, к которым относятся следующие:

1. Отсутствует логический блок изменения непроизводительного расхода рабочей жидкости в подвижном и неподвижном состоянии штока РМ;
2. Отсутствует блок воспроизводящий изменение объёма рабочей жидкости в зависимости от температуры эксплуатации.
3. Не учтено влияние температуры эксплуатации на кинематические характеристики потока рабочей жидкости через зазоры золотников РМ.
4. При расчёте параметров газа на участке запуска ТГ использовано максимальное значение температуры газа, в то время как по данным работы [3] температура является функцией давления и компонентов состава топлива.
5. Следствием длительного срока эксплуатации ВИЭ в составе изделия рассматриваемого класса является при запуске наличие колебательного процесса изменения давления нагнетания рабочей жидкости, обусловленного образованием газовой среды в баке вытеснителя вследствие коагуляции растворённого воздуха в рабочей жидкости. Отмеченная особенность работы ВИЭ требует учёта при построении ММ.

Предлагаемая математическая модель расчёта объёма учитывает весь спектр перечисленных факторов и позволяет получить более точное определе-

ние требуемого объёма для выполнения приводом задачи управления движением ЛА в течение заданного времени при минимальном запасе рабочей жидкости в составе ВИЭ.

Как следует из сравнительных результатов моделирования с уточнённой методикой расчёта объёма, разница в объёмах для времени работы привода $t = 10\text{с}$ составляет $\Delta V = V - V_v = 150\text{см}^3$. По отношению к объёму, рассчитанному без учёта влияния перечисленных факторов для $V = 1500\text{см}^3$ улучшается энерго-массовый показатель на $\overline{\Delta V} = (\Delta V_v / V) \cdot 100\% = 10\%.$

Разработанная математическая модель с учётом действия комплекса эксплуатационных факторов и особенности работы элементов на параметры рабочей жидкости даёт более достоверный и 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.

3. Бобылёв В.М. Ракетный двигатель твёрдого топлива как средство управления движением ракет, Москва, «Машиностроение», 1992г., 161с.

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ОТЛИВКАХ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО КОКИЛЬНОГО ЛИТЬЯ

Ларионова Н.В., Масанский О.А., Свечникова Л.А., Токмин А.М.

(Красноярск)

Повышение требований к эксплуатационным и технологическим свойствам отливок заставляет использовать современные методы и принципы решения простых задач.

В настоящее время для анализа теплофизических процессов проходящих при охлаждении отливки, существует несколько методов исследований. Наиболее часто прибегают к аналитическому методу исследования, который несёт наибольшую информацию при наименьших материальных затратах.

Изучение теплообмена между формирующейся структурой отливки, гарнисажа и кокиля проводился с применением программного комплекса ANSYS,

позволяющий провести фазовый анализ кристаллизующейся отливки при различных условиях охлаждения [1].

Известно, что при ЭКЛ в процессе перелива металла из тигля в кокиль, не происходит перемешивания металла и шлака. Ламинарное течение металла и шлака обеспечивает надежную защиту металла от атмосферы. При попадании металла и шлака в форму, шлак, перемещаясь снизу вверх, покрывает стенки кокиля, образуя гарнисаж, вытесняется в верхнюю часть и обогревает отливку в процессе кристаллизации металла, создавая большое термическое сопротивление.

Тепловое поле определяет структуру отливки, формирующуюся при кристаллизации. Изменение геометрических размеров и материала кокиля, толщины гарнисажа и тепловой насадки, применение принудительного охлаждения приводит к изменению конфигурации и интенсивности теплового потока.

Расчеты проводились по оптимизации охлаждения отливок при электрошлаковом кокильном литье с целью исследования влияния скорости кристаллизации на структуру охлаждаемой отливки. Для этого была составлена расчетная схема кристаллизующейся отливки из стали 4Х5МФС при ЭКЛ. Использовались следующие исходные данные: толщина боковой стенки кокиля – 50 мм; толщина донной части – 60 и 120 мм соответственно; толщина гарнисажа – 1,5 мм; толщина шлака над отливкой – 20 мм и 60 мм соответственно; диаметр отливки – 200 мм; высота отливки – 100 мм.

Для расчета были приняты следующие теплофизические свойства материала кокиля, отливки и шлака: коэффициент теплопроводности расплавленного металла 27 Вт/м °С; шлака 1,16 Вт/м °С при температуре заливки, плотность металла и шлака 7495 кг/м³ и 2800 кг/м³ соответственно. Задавались начальные условия: температура заливки жидкого металла 1560 °С, температура окружающей среды 20 °С, коэффициенты теплоотдачи с поверхности шлака, кокиля. Перенос тепла осуществлялся через стенки изложницы, покрытые слоем гарнисажа.

Скорость охлаждения отливки изменялась в зависимости от изменения геометрических размеров изложницы, толщины шлаковой надставки, а также дополнительным охлаждением боковой либо донной части кокиля.

По расчетным данным, полученным с использованием программы ANSYS, были получены зависимости скоростей охлаждения отливки в зависимости от геометрических размеров кокиля и толщины тепловой насадки. Анализ графика скорости охлаждения для кокиля с толщиной стенки 40 мм, толщиной дна 50 мм и толщиной тепловой насадки 20 мм (рис. 1) позволяющие сделать заключение: при заливки расплавленного металла под слоем шлака в кокиль, происходит охлаждение шлака у стен изложницы в первые 30 сек. до температуры примерно 1046 °С, что приводит к образованию гарнисажа. Одновременно интенсивно

нагреваются внутренние стенки изложницы и происходит увеличение температуры до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ от начала соприкосновения с жидким шлаком и металлом (рис 1). С течением времени происходит постепенное снижение и выравнивание температуры кокиля и отливки.

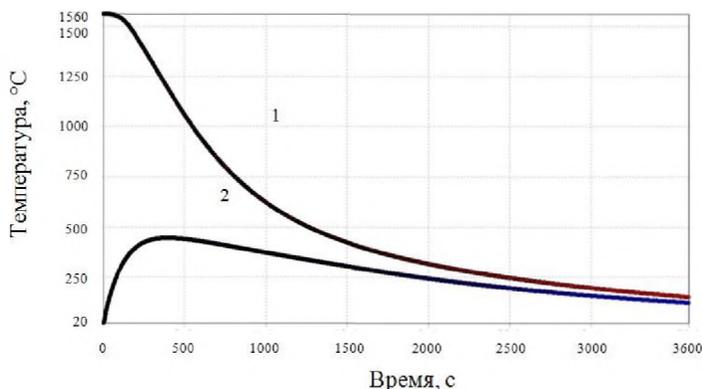


Рис. 1. Зависимость температуры отливки (1) и внутренней стенки кокиля (2) от времени охлаждения.

Полученные аналитические данные скоростей охлаждения отливки и кокиля находятся в хорошем соответствии с экспериментальными результатами. Это позволяет использовать данный метод для анализа условий охлаждения отливок различных размеров и форм, полученных методом ЭКЛ.

Литература

1. Использование программы* ANSYS для моделирования тепловых полей в процессе кристаллизации отливки при электрошлаковом литье / Г.Н. Бояркин и др.// сб. тр. I-й конф: пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH Москва, 2002. 420–422 с.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКОЙ

Ларионова Н.В., Масанский О.А., Свечникова Л.А., Токмин А.М., Толстошеев В.А.

(Красноярск)

В настоящее время существуют различные способы получения слоистых композиционных материалов, одним из которых является индукционная наплав-

ка. Применение данного метода дает возможность управлять химическим и фазовым составом, строением, геометрией и свойствами наплавляемых слоев. Регулируя скорости нагрева и охлаждения, возможно в широких пределах изменять структуру и свойства наплавляемого металла. Важным показателем наплавки порошковых материалов с применением ТВЧ является толщина слоя за один проход. Ранее /1/ было показано, что толщина наплавляемого слоя определяет твердость, которая во многих случаях должна иметь максимальные значения.

Индукционную наплавку осуществляли с применением высокочастотного генератора УВГ 2-25 разработанного в ЦКБ «Геофизика». В качестве материала подложки была использована конструкционная сталь 09Г2С. В качестве наплавочного материала применяли шихту, состоящую из гранулированного металлического порошка ПГС-27 (сормайт) и флюса ФНП-21.

Данная работа посвящена исследованию возможности повышения толщины наплавляемого слоя за один проход без снижения твердости. Установлено /2/, что увеличение скорости наплавки позволяет уменьшить прогрев металла подложки, что приводит к формированию структуры с высокодисперсной карбидной фазой, и как следствие, получению высокой твердости. Толщина наплавляемого слоя зависит от времени воздействия ТВЧ на локальный участок заготовки. При увеличении толщины слоя при наплавке за счет уменьшения скорости охлаждения в большей степени происходит распад твердого раствора, значительная коагуляция промежуточных фаз и как следствие снижение твердости.

Для уменьшения этого эффекта наплавка производилась на принудительно охлаждаемую заготовку. Заготовка в виде пластины толщиной 20 мм устанавливалась на водоохлаждаемую медную плиту, в которой были сформированы каналы для непрерывной циркуляции проточной воды. Нагрев заготовки и шихты при наплавке происходит за счет переменного электромагнитного поля частотой 44 кГц, создаваемого торцевым индуктором с ферритовым усилителем, находящимся над шихтой.

Исследование микроструктуры наплавленного слоя на пластину с принудительным охлаждением указывает на существенное различие по сравнению со слоем полученного без принудительного охлаждения. Отчетливо наблюдается измельчение промежуточных фаз и вытягивание зерен в направлении противоположном направлению преимущественного теплоотвода, формирующие столбчатое строение. Твердость наплавленного слоя полученного по такой технологии имеет повышенные значения по сравнению с твердостью на пластине без охлаждения (рис. 1).

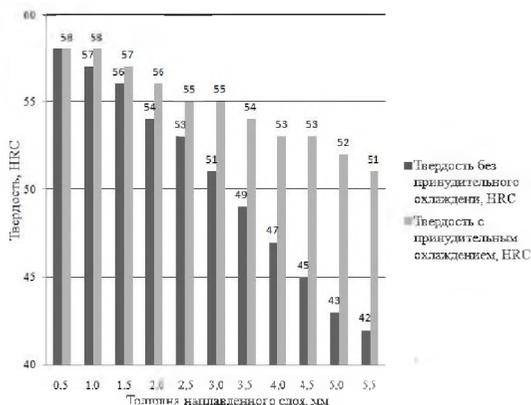


Рис. 1 Твердость наплавленного слоя в зависимости от толщины и условий охлаждения

Выводы

Полученные результаты исследований позволяют определить взаимосвязь скоростей нагрева и охлаждения при получении слоистого материала со структурой и свойствами наплавленного слоя. Применение технологии наплавки с принудительным отводом тепла дает возможность создания материалов с большей толщиной наплавленного слоя за один проход имеющих заданный комплекс свойств.

Литература

1. Токмин А.М., Масанский О.А., Падар В.А. «Расчет параметров индукционной наплавки, обеспечивающих получение требуемого комплекса физико-механических свойств» // Сварочное производство № 4, 2014 г., с. 18–20.
2. Масанский О.А. Получение слоистого композиционного материала с регулируемой структурой и свойствами // Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. Красноярск. 2012 г.

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ В УПРУГОЙ СРЕДЕ

Леоненко Д.В.

(Гомель, Беларусь)

В тонких изотропных несущих слоях приняты гипотезы Кирхгофа–Лява, относительно толстый сжимаемый наполнитель считаем жестким, т.е. учитываем его работу на сдвиг. Для него справедливы точные соотношения теории упругости с линейной ап-

проксимацией перемещений его точек от поперечной координаты z . Перемещения на границах слоев считаем непрерывными. Деформации малые

К наружным поверхностям несущих слоев приложена распределенная нагрузка q_i^k и реакция упругой безынерционной среды Винклера:

$$q_{3r}^k = -\kappa_0^k w^k, \quad q_{\alpha r}^k = 0$$

обусловленная прогибом несущих слоев оболочки w^k (κ_0^k – коэффициент жесткости упругой среды, окружающей оболочку).

Уравнения движения рассматриваемой оболочки в перемещениях получены с помощью вариационного принципа Гамильтона ($k = 1, 2; i = 1, 2, 3$)

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^2 \left[a_{m\alpha 1}^k u_{\alpha, \alpha\alpha}^k + a_{m\alpha 2}^k u_{\alpha, \beta\beta}^k + a_{m\alpha 3}^k u_{\alpha}^k + a_{m\alpha 4}^k u_{\beta, \alpha\beta}^k + \right. \\ & \left. + a_{m\alpha 5}^k w_{\alpha}^k + a_{m\alpha 6}^k w_{\alpha\alpha}^k + a_{m\alpha 7}^k w_{\alpha\beta}^k \right] - b_{\alpha}^m \ddot{u}_{\alpha}^m = (\mp 0, 5h_m c_2^m \delta_{\alpha 2} - R) m_m q_{\alpha}^m, \\ & \sum_{\gamma=1}^2 \sum_{k=1}^2 \left[a_{m31}^k w_{\gamma\gamma\gamma}^k + a_{m32}^k w_{\gamma\gamma\gamma}^k + a_{m33}^k w_{\gamma\gamma}^k + (a_{m34}^k - R m_m \kappa_0^m \delta_{mk}) w^k + a_{m35}^k u_{\gamma, \gamma\gamma}^k + \right. \\ & \left. + a_{m36}^k u_{\gamma}^k + a_{m37}^k u_{\gamma, \gamma\beta}^k \right] - b_3^m \ddot{w}^m = -R m_m \left[q_3^m \pm 0, 5h_m (q_1^m + R^{-1} c_2^m q_2^m) \right] \\ & (m, \alpha, \beta = 1, 2; \alpha \neq \beta). \end{aligned} \quad (1)$$

Начально-краевая задача о колебаниях трехслойной цилиндрической оболочки, связанной с упругой средой, замыкается добавлением к уравнениям движения (1) граничных условий и начальных условий движения

$$\begin{aligned} u_{\alpha}^k(x_{\beta}, 0) &= u_{\alpha 0}^k(x_{\beta}), \quad \dot{u}_{\alpha}^k(x_{\beta}, 0) = \dot{u}_{\alpha 0}^k(x_{\beta}), \\ w^k(x_{\beta}, 0) &= w_0^k(x_{\beta}), \quad \dot{w}^k(x_{\beta}, 0) = \dot{w}_0^k(x_{\beta}) \quad (\alpha, \beta, k = 1, 2). \end{aligned}$$

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-49-00091)

ЛОКАЛЬНОЕ НАГРУЖЕНИЕ ТРЕХСЛОЙНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ В УПРУГОЙ СРЕДЕ ВИНКЛЕРА

Леоненко Д.В.

(Гомель, Беларусь)

В работе [1] исследовано поведение трехслойных пластин и оболочек, не связанных с упругим основанием. В монографии [2] рассмотрено поведение однослойных элементов конструкций на упругом основании с двумя коэффициентами постели. Колебания круговых трехслойных пластин на упругом основании

запного, импульсного и резонансного воздействий. Проведен численный параметрический анализ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 14-49-00091).

Литература

1. Старовойтов Э. И. Вязкоупругопластические слоистые пластины и оболочки. – Гомель: БелГУТ, 2002. – 343 с.

2. Власов В. З., Леонтьев Н. Н. Балки, плиты, оболочки на упругом основании. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 491 с.

3. *Леоненко, Д.В.* Колебания круговых трехслойных пластин на упругом основании Пастернака / Д. В. Леоненко // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2014. – № 1. – С. 59–63.

4. *Леоненко, Д.В.* Уравнения движения трехслойной цилиндрической оболочки / Д.В. Леоненко // Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы: тез. доклад. Междунар. научн. семинара, Москва, 8–10 декабря 2014 г. / Московский авиационный институт. – М.: 2014. – С. 41.

МАКРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОНТАКТА ТРЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С МДО ПОКРЫТИЯМИ

Лесневский Л.Н., Ляховецкий М.А.

(Москва)

Одним из эффективных способов защиты от изнашивания и фреттинг-изнашивания элементов двигателей и энергоустановок (Д и ЭУ), выполняемых из алюминиевых сплавов, является использование различного рода покрытий. В последнее время для этой цели всё большее распространение получают композиционные керамические покрытия, формируемые методом микродугового оксидирования (МДО). Использование таких покрытий в контактах трения приводит к изменению механизмов взаимодействия и разрушения контактирующих поверхностей, поэтому их исследование при различных значениях нормальной силы в контакте и относительного перемещения поверхностей является актуальной задачей.

Для исследования процесса изнашивания и фреттинг-изнашивания в настоящей работе использован макроэнергетический подход, заключающийся в измерении с высокой скоростью регистрации силы трения ($F_{тр}$, Н) и относительного перемещения (D , мкм), и построении так называемых петель фреттинга, т.е. геометрических зависимостей $-F_{тр}-D$, получаемых для различных условий

нагружения. Такие зависимости при увеличении значения относительного перемещения трущихся тел изменяют свою форму от прямой линии до параллелограмма, а внутренняя площадь получаемых фигур позволяет оценить количество рассеиваемой энергии в контакте за единичный акт трения.

Исследование особенностей регистрируемых петель фреттинга и изучение получаемых пятен износа позволили установить взаимосвязь между разрушением композиционных МДО покрытий и условиями нагружения, а с использованием макроэнергетического подхода к анализу процесса изнашивания были определены критерии перехода между режимами изнашивания и получен энергетический коэффициент объемного износа.

ЛОКАЛЬНАЯ НЕУПРУГОСТЬ В ЛИНЕЙНЫХ ПОЛИМЕРАХ

Ломовской В.А., Кухтенкова А.А., Горшков А.А., Акимов Е.В.

(Москва)

Методом релаксационной спектроскопии исследованы диссипативные явления в плёнках поливинилового спирта различных молекулярных масс и степени гидратации. На спектре внутреннего трения в виде пиков механических потерь выявлены два релаксационных перехода (α - и β -пики) и один фазовый первого рода (δ -пик). Найдено, что снижение степени гидратации и увеличение степени кристалличности в поливинилово спирте существенно повышает температуру α -перехода. С увеличением молекулярной массы α -пик смещается в сторону более высоких температур. Температурное положение (β -пика на спектре от молекулярной массы не зависит, но меняется в зависимости от степени гидратации. Зафиксировано резкое падение частоты колебаний в области α -перехода и плавное снижение частоты в области температур β -перехода. Установлено, что величина дефекта модуля, определяемая по частоте колебаний в области α -перехода, не зависит от молекулярной массы и степени гидратации поливинилового спирта.

Работа выполнена по гранту РФФИ № 14-08-00806-а.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА ПОСАДКИ ВОЗВРАЩАЕМОГО АППАРАТА НА ПОСАДОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ С КРАШ-ОПОРАМИ

Луковкин Р.О., Щеглов Г.А.

(Москва)

Уменьшение массы посадочного устройства (ПУ), применяемого в конструкции перспективных многоцветных возвращаемых космических аппаратов

(ВА) капсульного типа, может быть достигнуто за счет использования в его составе одноразовых опор, большинство элементов конструкции которых деформируется пластически. В настоящей работе представлена оригинальная конструкция складной посадочной краш-опоры, с двумя ветвями энергопоглотителей, состоящими из последовательно соединенных краш-боксов, широко применяемых в системе пассивной безопасности автомобилей [2]. Рассматриваемое ПУ состоит из четырех опор.

Целями работы являлись выбор проектных параметров посадочного устройства и исследование кинематических и динамических характеристик процесса посадки ВА на подобном ПУ.

Представлены результаты численного моделирования в программе MSC Dytan процесса пластической деформации опор ПУ в ходе посадки прототипа ВА с различными начальными условиями. Результаты расчетов показывают, что с использованием пластически деформируемых краш-боксов можно достичь экономии массы ПУ в 40% по сравнению с массой опоры традиционной конструкции с сотовыми энергопоглотителями [1]. При этом порядок средних перегрузок, действующих на центр масс ВА, при использовании опоры с краш-боксами оказывается близким к уровню перегрузок с опорами традиционной конструкции.

Авторы благодарят за поддержку центр компетенции компании MSC Software при МГТУ им. Н.Э. Баумана. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-08-01197 А).

Литература

1. Бакулин В.Н., Борзых С.В., Воронин В.В. Математическое моделирование процесса посадки космического аппарата на участке его контакта с поверхностью // Вестник МАИ. 2011. Т.18. №4 С.38-46
2. Хусаинов А.Ш., Кузьмин Ю.А. Пассивная безопасность автомобиля: Учеб.пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2011. 89 с.

ОБ АНАЛИТИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ПРЕДЕЛА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ТОНКИМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ЭКРАНАМИ

Марков В.А., Попов Ю.В., Пусев В.И.

(Москва)

Рассматривается аналитический подход по определению баллистического предела летательных аппаратов (ЛА) при взаимодействии с тонкими металлическими экранами. ЛА можно представить в виде эквивалентного цилиндра с диа-

метром, равным диаметру миделевого сечения ЛА. Так как известные аналитические подходы применимы для недеформируемых ударников, а ЛА являются деформируемыми при высокоскоростном ударе, то вводится работа по деформированию ЛА, которая, как следует из решения аналогичных задач численного моделирования, практически соответствует работе по разрушению экрана. В итоге толщина экрана, пробиваемого деформируемым ЛА, будет в $\sqrt{2}$ раз меньше, чем для аналогичного недеформируемого ЛА при прочих равных условиях. Приводятся примеры расчетов для ЛА типа одномоторных поршневых самолетов и зенитных управляемых ракет.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПАНЕЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Мартirosов М.И.

(Москва)

Полимерный композиционный материал (ПКМ) – материал конструкционного назначения, состоящий из высокопрочных (средне- или высокомодульных) волокон (наполнителя) и полимерной матрицы (отвержденного связующего).

Важнейшее преимущество ПКМ – возможность создания из них элементов конструкций с заданными свойствами, наиболее полно соответствующими характеру и условиям работы. Многообразие волокон и матричных материалов, а также схем армирования позволяет регулировать прочность, жесткость, уровень рабочих температур и другие свойства путем подбора состава, изменения соотношения компонентов и макроструктуры ПКМ.

Механика разрушения элементов конструкций из ПКМ весьма сложна из-за анизотропии, взаимного влияния напряженно-деформированного состояния (НДС) отдельных монослоев, образующих композитный пакет (КП), специфики структуры и ряда 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 по результатам испытаний на растяжение, сжатие и сдвиг. Критерии разрушения определяют критическую комбинацию действующих в монослое напряжений или деформаций, которая и приводит к разрушению.

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 марки BNCF IMS 24K/PRISM EP 2400RS на основе связующего PRISM EP 2400RS производства фирмы Cytac Engineered Materials (США) и углеродной ленты BNCF IMS 24K производства фирмы Toho Tenax (Япония). Смола – эпоксидная. Углеродные волокна представляют собой синтетический материал органического происхождения – полиакрилонитрил, насыщенный углеродом. Химические формулы и рецептуры связующего и армирующих волокон являются ноу-хау их производителей. Панель выполнена по безавтоклавной инфузионной технологии. Инфузионная технология – технология изготовления деталей из сухого наполнителя путем его пропитки связующим за счет создаваемого вакуума. Формат укладки панели – смешанный с преобладанием сдвиговых волокон: $+45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}/+45^{\circ}/90^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}/+45^{\circ}/-45^{\circ}/90^{\circ}/+45^{\circ}$ (всего в КП 14 слоев). Характеристики монослоя известны (толщина, плотность, объемное содержание наполнителя, пределы прочности при растяжении и сжатии вдоль и поперек волокна, предел прочности при сдвиге в плоскости КП, модули упругости при растяжении и сжатии вдоль и поперек волокна, модуль упругости при сдвиге в плоскости КП, коэффициент Пуассона). Определяются жесткостные и прочностные характеристики КП. Проводится расчет на прочность данной панели методом конечных элементов (МКЭ) в линейной постановке под действием различных комбинаций заданных статических нагрузок. Рассматриваются различные варианты граничных условий. Используются следующие критерии разрушения: максимальных напряжений, максимальных деформаций, Хилла, Хоффмана, Цая-Ву, Д'алиа, Норриса, Фишера, Ханкинсона, Коуина, Пака, Хашина-Ротема и другие. Дается сравнение результатов, полученных по различным критериям разрушения. Выработаны практические рекомендации. Расчеты проведены с помощью программного комплекса NX 7.5 с использованием приложения Advanced Simulation, применены конечные элементы типа Laminate и Shell.

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), а также гранта Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 11-01-00540_a).

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ УПРГКОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ РАЗЛИЧНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ

Медведский А. Л., Денисов С. Л.

(Москва)

Целью данной работы является расчёт отклика изотропных металлических пластин при акустических нагрузках с широким частотным спектром и различных видах функции взаимной спектральной. В качестве моделей акустических полей рассматриваются:

1. Полностью коррелированное по поверхности пластины поле;
2. Дельта-коррелированное поле;
3. Поле с конечными масштабами корреляции;
4. Диффузное поле;
5. Поле пульсаций пограничного слоя (модель Коркоса).

По результатам расчёта отклика, с применением четырёх различных методик, проводится сравнительный расчёт долговечности пластины. Проводится сравнительный анализ методик и определяется долговечность пластины и среднеквадратичные напряжения в зависимости от вида частотной спектральной плотности, соотношения частот собственных колебаний пластины и максимума спектральной плотности и вида функции взаимной спектральной плотности.

Проведенный анализ показывает, что отклик металлической изотропной пластины существенно зависит от пространственной структуры акустического поля. Результаты расчёта долговечности показывают зависимость не только от вида пространственного распределения поля, но и от методики расчёта.

Полученные результаты могут быть использованы для построения теории отклика ортотропных и анизотропных пластин на внешнее широкополосное акустическое воздействие при различных видах функции взаимной спектральной плотности.

Также полученные результаты могут использоваться для отработки алгоритмов при построении различных численных методик расчёта отклика пластин на внешнее нестационарное воздействие.

Литература

1. Денисов С.Л., Медведский А.Л., Паранин Г.В. Изучение долговечности изотропных пластин при широкополосном акустическом нагружении с различными видами функции взаимной спектральной плотности// Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. 45, №2. – С. 118-135.

2. Медведский А.Л., Денисов С.Л. Отклик ортотропных пластин на широкополосное акустическое воздействие при различных видах взаимной спек-

тральной плотности действующей нагрузки// Механика композиционных материалов и конструкций. Т.18, №4, 2012, С. 527-542.

МЕТОД КВАЗИДИАГОНАЛИЗАЦИИ ДЛЯ РАСЧЕТА СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ СВОБОДНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЛИНЕЙНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Мищенко Г.В., Самогин Ю.Н., Цой В.Э.

(Москва)

При расчете собственных частот и форм колебаний линейных механических систем из заданного частотного диапазона возникают трудности, связанные с большим числом степеней свободы. Чтобы сократить размерность задачи, сделать вычислительную программу более надежной в данной статье используется специальное сочетание декомпозиции с конденсацией, которое назовем метод квазидиагонализации. Конденсация по частотному признаку дает возможность, не решая проблему собственных значений для всей системы в целом, приближенно отсечь те формы колебаний, собственные частоты которых не принадлежат заданному частотному диапазону, что позволяет существенно снизить размерность исходной задачи. Кроме того, декомпозиция в сочетании с конденсацией ведет к улучшению устойчивости счета, так как обусловленность матрицы, определяющей устойчивость, зависит от отношения высшей собственной частоты системы к низшей.

В качестве иллюстрации применения метода квазидиагонализации рассмотрена задача об определении двух низших частот и форм колебаний для двухлопастного вала ротора низкого давления паровой турбины.

Литература

1. *Самогин Ю.Н., Хроматов В.Е., Чирков В.П.* Метод конечных элементов в задачах сопротивления материалов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 200 с.
2. *Радин В.П., Самогин Ю.Н., Чирков В.П.* Метод конечных элементов в динамических задачах сопротивления материалов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 316 с.

ДИАГНОСТИКА ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ЛА ТЕНЗОРЕЗИСТОРАМИ НА ОСНОВЕ МОНОСУЛЬФИДА САМАРИЯ

Мишин Ю.Н.

(Москва)

В настоящее время применение неметаллических материалов (НМ) в авиационных и ракетно-космических конструкциях значительно увеличилось вслед-

ствии использования композиционных материалов (КМ), в том числе и для изготовления силовых элементов. НМ по своим физико-механическим характеристикам существенно отличаются от металлов, что необходимо учитывать при тензоизмерениях. Целью работы является совершенствование метода электротензометрии и полупроводниковых средств измерения деформационного состояния конструкций летательных аппаратов для прочностных испытаний (ПИ).

Измерительные средства должны обеспечивать получение качественной информации в достаточном объеме для правильных выводов и в такой форме, чтобы её можно было практически обработать и проанализировать. При прочностных испытаниях ЛА используются приклеиваемые тензорезисторы (ТР), в основном фольговые, частично термокомпенсированные под температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) стали ($\alpha \approx 12 \cdot 10^{-6}$ 1/град) и алюминиевых сплавов ($\alpha \approx 22 \cdot 10^{-6}$ 1/град). Указанные ТР в основном обеспечивали ПИ, поскольку конструкция ЛА выполнялась ранее из упомянутых металлов. НМ характеризуются большим различием ТКЛР, от $\alpha \leq 1 \cdot 10^{-6}$ 1/град у КМ в направлении с большим числом армирующих слоев до $\alpha \leq 90 \cdot 10^{-6}$ 1/град у органических стекол, малой теплопроводностью, зависимостью от температуры модулей упругости органических стекол, полимерной матрицы КМ. Для обеспечения качественных прочностных измерений конструкций из НМ необходима разработка ТР, учитывающих характеристики, прежде всего ТКЛР, этих материалов. В частности для КМ необходимо не менее двух типов ТР для направлений с большим ($> 20\%$, $\alpha \approx 1 \cdot 10^{-6}$ 1/град) и малым ($< 20\%$, $\alpha \approx (8..9) \cdot 10^{-6}$ 1/град) числом армирующих слоев, причем с точными осевыми метками. Испытанные зарубежные ТР могут применяться на углепластиках, но в ограниченном диапазоне $t = -50..80^\circ\text{C}$, в грубых измерениях до 110°C , при более высоких температурах резко возрастает разброс температурного коэффициента сопротивления (ТХС) [1].

Для решения этих задач ограниченно подходят полупроводниковые тензорезисторы. Нелинейность и высокая зависимость характеристик от температуры, хрупкость и дороговизна – вот недостатки, которые, не смотря на очень высокую тензочувствительность (до 120), не позволяют широко применять кремниевые и другие известные сегодня ПТР в тензометрии. Разработчики умалчивают о поперечной чувствительности таких ПТР, которая должна быть очень большой, так как ширина монокристаллических пластин сравнительно велика. Это оставляет только одну сферу применения для таких ПТР – датчики механических величин, и закрывает другую – прочностные испытания. Высокая тензочувствительность в сочетании с высоким удельным сопротивлением обусловила применение ПТР для измерения чрезвычайно малых деформаций с высокой точностью, а также в датчиках с высоким уровнем выходного сигнала [2].

Большой интерес представляют, разрабатываемые в настоящее время в ФГУП «НПО им. С. А. Лавочкина» полупроводниковые ТР (ПТР). Для получения ПТР широкого применения надо, или научиться получать тонкие монокристаллические пленки известных полупроводников, или искать другой материал с достаточно высокой тензочувствительностью. Такой материал был найден в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН в лаборатории редкоземельных полупроводников. Физические свойства моносulfида самария (SmS) очень привлекательны для тензометрии. Так, кроме рекордной тензочувствительности, ТХС у SmS на порядок меньше чем у кремния, линейная зависимость изменения сопротивления от деформации, выдающаяся радиационная и температурная стойкость, высокая температура плавления (2400°C) [3].

Были определены основные метрологические характеристики обсуждаемого ТР и их зависимости от режимов испарения и конденсации на подложках. Оказалось, что изменением режимов получения тонкой пленки можно изменять и метрологические характеристики ТР, при этом достаточно строго коррелируются между собой электрическое сопротивление, тензочувствительность и температурный коэффициент сопротивления (ТКС), а именно, чем больше сопротивление, тем больше тензочувствительность и тем больше ТКС. Наибольший интерес представляет возможность управлять ТКС ТР. В результате был получен ряд термокомпенсированных опытных образцов ТР. Испытания проводились на оргстеклах, алюминиевых сплавах, сталях, титановых сплавах, силикатных стеклах, кварце, при этом тензочувствительность изменялась от 60 до 8 соответственно.

Литература

1. Харитонов Г.М., Володин Н.М., Мишин Ю.Н., Каминский В.В. Термокомпенсированные тензорезисторы для неметаллических материалов в летно-прочностных испытаниях самолетов // *Авиационная промышленность* №1 2012 – НИАТ, Москва, январь 2012 г. с. 3-7.
2. Экспериментальная механика: В 2-х книгах: Книга 1. Пер. с англ. под ред. д.т.н. Б.Н. Ушакова // Под ред. А. Кобаяси. М., Мир, 1990. – 616 с. ил.
3. Каминский В.В., Володин Н.М., Соловьев С.М., Мишин Ю.Н., Н.В. Шаренкова. Вакуумные технологии изготовления тонкопленочных тензорезисторов на основе сульфида самария для авиакосмических аппаратов // *Вестник ФГУП “НПО им. С.А. Лавочкина”* №2, Химки, 2013 г. с. 26-30.

ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЫСТРОХОДНЫХ РОТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Морозов А.Г., Пушкарев А.Г.

(Москва)

Одной из особенностей роторов современных электрических машин является использование роторных систем, работающих за первой или более высшей критической частотой. Такой подход к конструкции позволяет существенно снизить весовые параметры изделия.

Возросший интерес к разработке «более электрического самолета» предполагает наличие мощных и компактных энергетических источников, которые должны обеспечивать управление всеми системами самолета.

Технологический процесс изготовления зарезонансных роторных систем может существенно отличаться от традиционного подхода в связи с появлением прогиба ротора и влиянием неравномерности магнитного поля, которое вызывает появление так называемых сил «магнитного тяжения».

Использование в роторных системах постоянных магнитов большой мощности может вызвать дополнительные погрешности из-за взаимодействия магнитного поля ротора с материалом производственного оборудования.

На кафедре 205 МАИ накоплен большой опыт по формированию облика технологического процесса сборки гибких роторов, учетом особых требования, предъявляемых к конструкции.

Для обеспечения допустимого уровня вибраций и ресурса работы быстроходных роторных машин необходимо решить ряд вопросов:

- а) Назначение допустимых значений остаточных дисбалансов.
- б) Наличие необходимых плоскостей коррекции.
- в) Соблюдение необходимой точности обработки поверхностей.
- г) Наличие необходимого количества материала в плоскостях коррекции.
- д) Сочетание оптимальных допусков и посадок.
- е) Экспериментальное значение собственных частот роторных систем.
- ж) Наличие высокоточного балансировочного оборудования.
- з) Разработка специальной технологической оснастки.
- и) Имитация всех возможных условий работы роторных систем на балансировочном оборудовании

Таким образом, необходимо одновременно разработать и реализовать весь комплекс мероприятий для производства конкурентноспособных изделий.

Литература

1. Абашин И.В., Карзов А.Г., Пушкарёв А.Г. Экспериментальная методика балансировки роторов изделия РД-1700. Материалы VIII Международного симпозиума «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошны сред» (Ярополец, 11 –15 февраля 2002 г.) – М.: МАИ, 2002. с.212.

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ЭХО-ИМПУЛЬСНАЯ ДИАГНОСТИКА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Мотова Е.А., Никитина Н.Е.

(Нижний Новгород)

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния пластической деформации и циклического нагружения на структурное состояние и прочностные свойства стальных и дюралюминиевых образцов.

Основным видом разрушения при переменном нагружении является усталость [1]. Усталость металла охватывает две области циклического нагружения и деформирования, которые в значительной степени отличаются друг от друга. В отличие от области многоциклового усталости (с количеством циклов до 10^7 – 10^8) [2], в области малоциклового усталости, при больших амплитудах нагружения и с числом циклов до 5×10^4 – 10^5 [2], в материале возникают существенные пластические деформации.

В качестве информативного параметра ультразвукового контроля использована величина акустической анизотропии материала, то есть относительная разница скоростей (задержек) взаимно перпендикулярно поляризованных сдвиговых волн, распространяющихся перпендикулярно линии нагружения. Экспериментальные исследования образцов конструкционных материалов, подвергнутых различным силовым воздействиям, выполнены ультразвуковым эхометодом с использованием лабораторного акустического стенда, хорошо описанного в книге [3].

Поскольку изменения скоростей упругих волн в широком спектре различных структурных состояний и технологических обработок конструкционных материалов обычно не превышают нескольких процентов [4], для их применения в качестве информативных параметров неразрушающего контроля требуется адекватная точность измерения временных интервалов. Требуемую точность обеспечивает применение прецизионной ультразвуковой аппаратуры, квалифицированное проведение акустических измерений и правильная интерпретация их результатов.

Нами проведены акустические исследования двух образцов стали 38ХНЗМА. Параметры акустической анизотропии вычислены на основании

прецизионных измерений временных интервалов между синфазными точками ультразвуковых импульсов, отраженных 1, 2, 3 и 4 раза от поверхностей образца. Образец № 1 был подвергнут статическому нагружению до возникновения пластической деформации $\varepsilon = 0,2\%$ и $\varepsilon = 1,2\%$. После каждой ступени нагружения, включая образец до испытаний, проведены акустические измерения времени распространения импульсов сдвиговых волн, поляризованных вдоль и поперек линии нагружения и распространяющихся по нормали к поверхности образца.

Полученную немонотонную зависимость акустического параметра от степени усталости конструкционного материала мы объясняем 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 линии нагружения - параметр анизотропии уменьшается; в) образование макротрещин, ведущих к разрушению. Одна или несколько макротрещин гораздо меньше повлияют на скорость волны, чем множество микротрещин. Поэтому уменьшение параметра анизотропии замедляется.

Изучено влияние гармонического нагружения на акустические характеристики образцов из сплава Д16. Дюралюминиевые образцы № 1 и № 2 подвергали гармоническому нагружению частотой 30 Гц и амплитудой $\sigma_a = 3$ МПа ступенями по 30 000 периодов. 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. Закономерности изменения параметра акустической анизотропии, выявленные при нагружении стальных образцов, сохраняются и для сплава Д16.

В области многоциклового усталости, при малой амплитуде нагрузки, деформация во время каждого цикла в значительной степени упруга [2], и пластические деформации не накапливаются. В нашем случае мы доходим до границы между малоциклового и многоциклового усталостью. Однако рост параметра акустической анизотропии и здесь наблюдается, значит, пластическая деформация образцов при гармоническом нагружении с частотой в десятки герц все же происходит.

В ходе экспериментальных исследований мы показали наличие связи между степенью усталости материала образца, характеризующейся увеличением пластической деформации и накоплением микротрещин, приводящих к развитию макротрещины, и его акустическими свойствами. Закономерности изменения параметра акустической анизотропии, выявленные при малоциклового усталости стальных образцов, сохраняются и для дюралюминиевых образцов, под-

вергнутых гармоническому нагружению. Есть возможность выявлять неразрушающим акустическим методом как момент начала интенсивного трещинообразования (по прекращению роста информативного параметра), так и момент начала интенсивного разрушения (по замедлению его уменьшения).

Литература

1. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. – М.: Наука, 1980. – 312 с.
2. Терентьев В.Ф., Петухов А.Н. Усталость высокопрочных металлических материалов - М.: ИМЕТ РАН-ЦИАМ, 2013. – 515 с.
3. Никитина Н.Е. Акустоупругость. Опыт практического применения - Н. Новгород: Талам, 2005. – 208 с.
4. Муравьев В.В., Зуев Л.Б., Комаров К.Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. – Новосибирск: Наука, 1996. – 184 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ГУСЕНИЧНОГО ТРАНСПОРТА И ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА

Музеев М.Р., Якушев Р.С.

(Казань)

Предполагается, что дорожное полотно представляет собой многослойное полупространство (по дорожным стандартам более 5 слоев). Вес транспорта на гусеничном ходу посредством катков через траки передается на покрытие дороги. Звенья траков образуют неоднородное тело, поэтому линия прогиба представляет собой ломанную кривую. Траки не имеют горизонтальных перемещений, а вертикальные – не ограничены. Прогиб дорожного полотна при движении транспорта перемещается, образуя «бегущую изгибающую волну». При формулировке задачи использовалась упрощенная модель, и исследовалась трехмерная контактная задача взаимодействия подвижного груза с дорожным полотном. Отметим, что задачи механики воздействия подвижной нагрузки на инженерные сооружения и конструкции не престают быть актуальными, и для современного транспорта важно увеличение скорости и грузоподъемности [1].

Математическая постановка задачи включает: уравнения равновесия, условия совместности деформаций, материальные соотношения связи напряжений и деформаций, формулы связи деформаций и перемещений; и еще граничные условия – две зоны под гусеницами $\Sigma_{лев}$, $\Sigma_{пр}$ (где нормальные напряжения определяются интенсивностью распределенного веса транспорта, а касательные – сдвиговыми усилиями) и третья Σ_0 , свободная от нагрузок ($\sigma_{33} \tau_{31} \tau_{32} = 0$) [2]. Задача решалась вычислительными методами (МКЭ) пакета прикладных программ ANSYS. В расчетах использовался Plane183 – плоский конечный элемент

с восемью узлами. По смыслу задачи, вдали от участка нагружения напряженно-деформированное состояние (НДС) убывает, поэтому в модели рассматривалась только область полупространства, превосходящая на порядок линейные размеры транспорта.

На основании проведенных расчетов можно получить картину реакции дорожного полотна на действие подвижного гусеничного транспорта.

Прежде всего, при симметричном распределении нагрузки вдоль гусеницы картина НДС искажается незначительно. Значительное искажение получается при нарушении симметрии распределения нагрузки из-за торможения или ускорения движения. Кроме того, такое искажение возможно из-за разных расстояний между опорными катками. Не одинаковость расстояний между катками приводит к наиболее существенному искажению НДС в жестких бетонных слоях дороги и в подстилающем слое грунта.

Натянутые траки образуют достаточно жесткую балку передающую вес транспорта на дорогу. Однако это приводит к большей концентрации напряжений под гусеницей, а деформаций – ближе к краям гусеницы. Причем при ускорении транспорта искажение картины распределения напряжений смещается назад от направления движения транспорта, а деформаций – вперед.

Вычисления выявили, что на распределение НДС влияют два фактора слоистости дороги. Во-первых, соотношение толщин слоев, а во-вторых, механические свойства самих слоев. Увеличение жесткости подстилающего грунта приводит к значительному уменьшению деформаций и перемещений не только в этом слое, но и вышележащих жестких слоях. Картина распределения напряжений при этом не меняется, а максимальные напряжения практически неизменны даже при уменьшении жесткости.

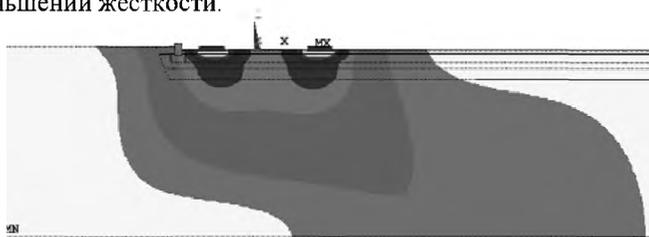


Рис. 1. Интенсивность перемещений в поперечном движению сечении.

На основании численных экспериментов было установлено, что граничные условия влияют на картину НДС только вблизи места контакта.

В заключение о наиболее интересном результате расчетов. На рисунке 1 представлена локализация поля векторов перемещения. На нем наиболее наглядно отражается картина распределения НДС в зависимости от асимметрии

структуры дорожного полотна и его слоистости. Как видно из нее, при движении транспорта по крайней полосе, перемещения и деформации возникают и в глубине подстилающего грунта соседней полосы.

Литература

1. Коноплев Ю.Г., Якушев Р.С. Лекции по динамике сооружений с подвижными нагрузками. – Казань: Отечество, 2003. – 208 с.

2. Музеев М.Р., Якушев Р.С. Взаимодействие подвижной кусочно распределенной нагрузки с многослойным полупространством. // Материалы Всероссийской научной конференции «Обратные краевые задачи» посвященной 100-летию со дня рождения профессора М. Т. Нужиной. г. Казань, 20-24 октября 2014 г. - Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2014.

ОЦЕНКА ИНДИВИДУАЛЬНОГО ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДОВ ПО КРИТЕРИЯМ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Мурзаханов Г.Х., Хроматов В.Е., Щугорев В.Н.

(Москва)

В работе рассматривается расширение области применения методики и программного комплекса по оценке индивидуального остаточного ресурса трубопроводов, изложенных в [1]. Программный комплекс позволяет в интерактивном режиме проводить расчеты остаточного ресурса для протяженных линейных участков трубопроводов, содержащих различные дефекты. В данной статье проводится оценка остаточного ресурса трубопроводов пара и горячей воды, работающих при повышенных температурах в условиях ползучести. Адаптируется к инженерным расчетам теория роста трещин в условиях ползучести, основанная на синтезе микро- и макромеханики разрушения [2]. При этом рост трещин трактуется как процесс последовательной смены состояний устойчивости и неустойчивости с учетом микроповреждений, накопленных у фронтов трещин. В качестве ядер ползучести используются слабо сингулярные ядра, предложенные Ю.Н. Работновым [3].

Оценка несущей способности трубопроводов с трещиноподобными, коррозионными дефектами и вмятинами, обзор различных подходов к оценке остаточного ресурса трубопроводов приведен в [4].

Представленная методика применена для диагностики технического состояния и оценки остаточного ресурса участка главного паропровода ОАО «Одесская ТЭЦ. Технические характеристики паропровода: диаметр $d=273$ мм, толщина стенки $h=11$ мм, марка стали: 12М1ХФ, критическое значение коэффициента интенсивности напряжений $K_{Ic}=35$ МПа $\sqrt{м}$, избыточное давление $P=3,7$ МПа, температура рабочей среды $T=555$ °С.

Используя экспериментальные данные по ползучести стандартным методом наименьших квадратов [1], определяем параметры аналитической кривой ползучести: E_0 (мгновенный модуль упругости)=229.5ГПа, E_∞ (длительный модуль упругости)=9.562ГПа, $\alpha=0.9846$ $\theta_T=100$ тыс. час (параметры ядра ползучести).

Для интегрирования интегро-дифференциального уравнения с помощью математического пакета Matlab разработано программное обеспечение для компьютера, позволяющая оценить остаточный ресурс участков паропровода, содержащих продольные краевые трещины. Для участка паропровода, расположенного между двумя задвижками, методами приборной дефектоскопии обнаружены трещины, глубиной от 1,5 до 2 мм. Ресурс бездефектных сечений паропровода оценивался типовым методом на основе опытных данных по пределам длительной прочности и ползучести стали марки 12М1ХФ

По результатам расчета установлено, что обнаруженные трещины существенно снижают остаточный ресурс. Минимальный срок безопасной эксплуатации паропровода составляет менее пяти лет.

Литература

1. Мурзаханов Г.Х., Щугорев В.Н. Методы оценки конструкционной прочности трубопроводов. М.: МЭИ, 2009, 72 с.
2. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1990, 447 с.
3. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. М.: Наука, 1987, 384 с.
4. Хажинский Г.М. Деформирование. Разрушение. Надежность: задачи деформирования и разрушения стали. Методы оценки прочности энергетического оборудования и трубопроводов.-М.:ЛЕНАНД, 2014.-544

УСТОЙЧИВОСТЬ ПОДАТЛИВОЙ ПРИ ТРАНСВЕРСАЛЬНОМ СДВИГЕ ПЛАСТИНЫ С НЕКЛАССИЧЕСКИМ ЗАЩЕМЛЕНИЕМ КОНТУРА

Нестеров В.А.

(Красноярск)

Композиты обладают высокой удельной прочностью и жесткостью по сравнению с традиционными конструкционными материалами, поэтому часто используются в производстве летательных аппаратов. Балки, пластины и облочки – одни из основных конструктивных элементов самолетов, ракет и спутников. Композитные тонкостенные конструкции имеют высокую степень весового совершенства. Композиты имеют ряд особенностей, которые не учитываются в классических расчетных моделях. В частности, им свойственна низкая сдвиговая жесткость по отношению к трансверсальным напряжениям. Эта же

особенность характерна и для трехслойных конструкций, которые также широко применяются при изготовлении авиационной и ракетно-космической техники.

Рассматривается задача об устойчивости слоистых композитных пластин и трехслойных пластин с композитными несущими слоями. Численное решение задачи выполнено с применением метода конечных элементов (МКЭ) на основе сдвиговой модели пластин первого порядка (теории Рейсснера-Миндлина). Основные матрицы теории МКЭ для задачи об устойчивости пластин – матрица жесткости и матрица геометрической жесткости – получены вариационным способом. Функционал задачи устойчивости получен с помощью выражения для потенциальной энергии деформации пластины в геометрически нелинейной постановке [1]

$$\Delta U = \frac{1}{2} \iint \{ M_x \chi_x + M_y \chi_y + M_{xy} (\chi_{xy} + \chi_{yx}) + Q_x \psi_x + Q_y \psi_y \} dx dy + \\ + \frac{1}{2} \iint (N_{x,0} \omega_x^2 + N_{y,0} \omega_y^2 + 2N_{xy,0} \omega_x \omega_y) dx dy,$$

где M_x , M_y – изгибающие моменты, M_{xy} – крутящий момент, Q_x , Q_y – перерезывающие силы, $N_{x,0}$, $N_{y,0}$ – нормальные мембранные усилия докритического состояния, $N_{xy,0}$ – сдвигающее мембранное усилие докритического состояния, χ_x , χ_y – изменения кривизны соответствующего направления, χ_{xy} – кручение, ψ_x , ψ_y – углы трансверсального сдвига, ω_x , ω_y – углы поворота сечения за счет изгиба, определяемые как

$$\omega_x = -\frac{\partial w}{\partial x} \quad \text{и} \quad \omega_y = -\frac{\partial w}{\partial y}.$$

Используется прямоугольный четырехузловый конечный элемент пластины. Основными кинематическими параметрами в задаче об устойчивости пластины являются прогиб точек базовой плоскости (w) и углы трансверсального сдвига. Приняты для этих параметров следующие распределения по прямоугольнику базовой плоскости элемента:

$$w = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 x^2 + \alpha_5 xy + \alpha_6 y^2 + \\ + \alpha_7 x^3 + \alpha_8 x^2 y + \alpha_9 xy^2 + \alpha_{10} y^3 + \alpha_{11} x^3 y + \alpha_{12} xy^3, \\ \psi_x = \alpha_{13} + \alpha_{14} x + \alpha_{15} y + \alpha_{16} xy, \\ \psi_y = \alpha_{17} + \alpha_{18} x + \alpha_{19} y + \alpha_{20} xy.$$

В отличие от задачи статического расчета пластины [2] в конечно-элементном расчете устойчивости в каждом из четырех узлов прямоугольного конечного элемента присутствуют пять кинематических параметров

$$\delta_i = \left\{ w_i \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_i \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)_i \Psi_{xi} \Psi_{yi} \right\}^T, (i = 1, 2, 3, 4).$$

Сравниваются критические нагрузки и формы потери устойчивости слоистой композитной пластины с углом армирования волокон $\pm 45^\circ$ при двух видах граничных условий: при *классическом заземлении*, когда в контурных узлах все компоненты вектора δ_i равны нулю и при *заземлении со свободным сдвигом*, когда только первые три компоненты этого вектора равны нулю, а деформации сдвига – допустимы. Показано, что расхождение по критическому усилию одноосного сжатия для моделей с различным видом заземления контура в случае относительно толстых пластин может достигать 19 %. Еще более заметной эта разница достигает в моделях с ярко выраженной ортотропией свойств (до 46%).

Аналогичная картина обнаружена при исследовании устойчивости трехслойной пластины с композитными слоями и податливым наполнителем. Критические нагрузки трехслойки с неклассическим заземлением контура (при допустимых сдвигах на контуре) заметно отличаются от аналогичных значений, полученных для модели с полным заземлением сторон пластины.

Проведенные численные эксперименты [3] показали, что при анализе несущей способности невозможно выполнить сколько-нибудь строгой оценки критических нагрузок податливых при трансверсальном сдвиге пластин с неклассическим заземлением (со свободным трансверсальным сдвигом) по результатам расчетов пластин с классическим заземлением, а требуется выполнять каждый раз самостоятельное решение, которое можно осуществить, в частности, с привлечением разработанной нами 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. Расчет на устойчивость пластины, податливой при трансверсальном сдвиге. // Механика композитных материалов. – 2014. Т. 50. - №5 - С. 771-794.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНОГО ФЕРМЕННОГО СТЕРЖНЯ БАЗОВОГО МОДУЛЯ РАЗГОННОГО БЛОКА

Нестеров В.А., Суханов А.С.

(Красноярск)

Силовые тонкостенные элементы конструкций в виде балок, пластин и оболочек широко используются в производстве самолетов, ракет-носителей и космических аппаратов. В последние годы усиливается тенденция замены традиционных конструкционных материалов, которые ранее применялись для изготовления этих элементов, на композиционные. Этому способствуют высокие удельные механические свойства композитов, что позволяет проектировать конструкции летательных аппаратов, обладающих высокой степенью весового совершенства. Стремление улучшить этот параметр летающей техники заставляет пристально следить за появлением новых композитов, которые постоянно повышают механические характеристики за счет совершенствования технологии их производства и улучшения качества исходных материалов.

Композитные конструкции, как правило, обладают большим количеством проектных параметров, что приводит к необходимости выполнять комплексные исследования с целью определения оптимального сочетания этих параметров, наилучшим образом соответствующего условиям эксплуатации конструкций.

В последние годы широкое распространение получили интегрированные пакеты конечно-элементных расчетов (ANSYS, NASTRAN, ABAQUS и т. д.), которые позволяют проводить все виды проектных расчетов, в том числе, конструкций из композиционных материалов. В этих программах учтены все основные особенности поведения композитов (анизотропия механических свойств, неоднородность структуры по толщине, низкая сдвиговая жесткость по отношению к трансверсальным напряжениям). Кроме того, в них заложена возможность создания препроцессорных процедур для гибкого управления проектными параметрами, планирования разнообразных видов расчета и анализа полученных данных. Все это не умаляет, а, наоборот, повышает требования к творческой организации интерактивного взаимодействия проектанта с пакетом расчетных программ.

В настоящей работе рассматривается композитная ферма базового модуля разгонного блока. Основным элементом фермы – стержень – изготовлен методом непрерывной намотки стеклопластикового волокна. В среде препроцессора GEOSTAR пакета конечно-элементного анализа COSMOS/M сформирован модуль, позволяющий моделировать стенку ферменного стержня для последующего проведения серии типовых расчетов с целью определения прочностных, жесткостных и несущих параметров стержня (и конструкции в целом).

В результате численного эксперимента, состоящего из серии предваритель-

ных расчетов параметров напряженно-деформированного состояния (НДС), критических нагрузок и частот собственных колебаний, показана необходимость замены композиционного материала, используемого в настоящее время, на современный углепластик. Особенностью данного анализа является более точное определение параметров НДС в отдельных слоях композита и волокнах конкретного семейства. При этом результаты, полученные на основе расчетов, осуществляемых в среде пакета КЭ программ, подтверждаются решениями, выполненными с помощью других современных [1] моделей многослойных тонкостенных конструкций, изготавливаемых способом непрерывной намотки композитного волокна.

Для определения оптимальной схемы армирования стенки композитного стержня разработана численная модель, предназначенная для проведения комплексного проектного исследования.

Литература

1. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.

НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ ЛИНЕЙНО-ВЯЗКОУПРУГИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Нетребко А.В., Пшеничнов С.Г.

(Москва)

В рамках теории Тимошенко рассмотрена нестационарная динамическая задача для линейно-вязкоупругой круговой цилиндрической оболочки конечной длины при осевой симметрии и граничных условиях на торцах общего вида. Для ее решения применено интегральное преобразование Лапласа по времени с последующим вычислением оригиналов методом Филона.

Сформулированы и доказаны ряд утверждений, устанавливающих связь между спектром задачи о свободных колебаниях оболочки и особыми точками решения нестационарной задачи в изображениях. Сформулированы условия, при которых решение нестационарной задачи для вязкоупругой оболочки с течением времени будет стремиться к решению статической задачи для соответствующей упругой оболочки, где упругими константами являются длительные модули. Даны различные формы представления решения в оригиналах.

Установленные свойства решения в изображениях дали возможность распространить эффективную методику вычисления оригиналов для случая упругой оболочки конечной длины на случай линейно-вязкоупругой оболочки. Это позволило с высокой точностью проследить нестационарные процессы от

начала до моментов порядка нескольких тысяч времен пробега продольной волной расстояния, равного радиусу оболочки.

Приведены результаты расчетов при различных видах динамического воздействия осевой нагрузки на один из торцов. Результаты подтвердили, что для линейно-вязкоупругой оболочки в случае, когда зависимость от времени внешней нагрузки имеет характер функции Хевисайда, процесс затухания волн с течением времени приводит ее состояние к статическому, а при нагрузке в виде одиночного импульса – к ненагруженному состоянию. Рассмотрен переходный волновой процесс для случая периодической нагрузки. Представлены результаты сравнительного параметрического анализа волновых процессов в оболочке при разных типах наследственных ядер и различных режимах динамического нагружения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ НШ-2029.2014.8.

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 38ХН3МА 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:

$$\alpha = \frac{V_1 - V_2}{V_{cp}} = \frac{t_2 - t_1}{t_{cp}},$$

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 $\epsilon_a = 0,5\%$. 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 ($\epsilon_a = 0,004\%$) 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 мож-

но 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 многоцикловом 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.

РАСЧЕТ СУЩЕСТВУЮЩИХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ТЕРМОБИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Николаева А.С., Подкопаева Т.Б.

(Москва)

В настоящее время микроэлектромеханические системы (МЭМС) получили широкое распространение в технике. Они используются в автомобилестроении, авиакосмической промышленности, энергетике, химии, фармакологии, медицине. Совершенствование элементной базы для устройств МЭМС имеет большое значение для инновационно-технологического развития страны. В докладе рассматривается механическая часть актюаторной подсистемы МЭМС.

Для эффективной работы механической части необходимо максимизировать полезное перемещение актюатора. Предложена новая конструкция термобиметаллического актюатора [1] с эффектом «прохлопывания», состоящая из двух сегментов, соединенных друг с другом сваркой или клепкой: осесиммет-

ричного пологого купола [2,3] с отверстием и пластинки продолговатой формы (язычка). Активные слои сегментов расположены с противоположенных сторон, что позволяет существенно увеличить полезные перемещения характерных точек актюатора.

Для решения задачи анализа напряженно-деформированного состояния в микроактюаторе сложной формы использован метод конечных элементов [4,5]. Расчеты выполнены в конечно-элементной среде Abaqus. Нелинейная задача решалась итерационным методом Ньютона с линеаризацией на каждом шаге. В качестве параметра продолжения была выбрана температура. Получена упругая характеристика микроактюатора и его деформированная форма. Проведено сравнение работоспособности предложенной конструкции с существующими переключателями. Значения полезных перемещений характерных точек микроактюатора новой конструкции превышает значения полезных перемещений микроактюаторов существующих конструкций.

Таким образом, предложена новая конструкция микроактюатора и методика ее расчета, которые могут быть эффективно использованы для развития элементной базы устройств МЭМС.

Литература

1. Григолюк Е.И. Тонкие биметаллические оболочки и пластины // Инженерный сборник. – 1953. – Т. 17. - №2 – С. 69-120.
2. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек. - Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского ун-та, 2010. - 380 с.
3. Reissner E On axisymmetrical deformations of thin shells of revolution // Proc. Sympos. Appl. Math. – 1950. – № 3 – С. 27-52.
4. Bathe K.-J. Finite element procedures in engineering analysis New Jersey: Prentice-Hall, 1996, 1050 p.
5. Zienkiewicz O.C. The Finite Element Method New York: MacGrow-Hill, 1977, 737 p.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ДЕМПФИРОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ БОЛЬШИХ КОЛОКОЛОВ

Огрызков С.Г. (иеродиакон Роман), Березовский А.В., Дмитриев В.Г.

(Москва)

В настоящее время в связи как с восстановлением и реставрацией древних церквей и соборов, так и со строительством новых церквей и колоколен актуальной является проблема оценки влияния различных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на частотные характеристики колоколь-

ных ансамблей. 7 декабря 2013 года в Великом Новгороде произошло значимое событие: были подняты с каменных постаментов и впервые после почти 60-летнего молчания озвучены 4 из 6 больших колоколов Софийского собора, которые в течении этого времени использовались как экспонаты Новгородского Государственного Музея-заповедника. Длительное и неравномерное опирание колоколов на кромку нижнего среза за время экспонирования приводит к возникновению остаточных напряжений, которые даже при относительно невысоких значениях обуславливают избыточное демпфирование собственных частот. И прежде всего тех их них, антинодальные точки которых приходятся на нижнюю часть колокола, воспринимающую основную нагрузку. Появление остаточных напряжений, вызванных неоптимальным с точки зрения сохранения музыкально-акустических свойств колоколов режимом хранения, приводит к ухудшению качества звучания колокола, заметному даже на слух.

Для исследования влияния остаточных напряжений на акустические характеристики колоколов были записаны с использованием высококачественной аппаратуры и профессионального программного обеспечения удары в колокола «Будничный», «Хутынский», «Никольский» и «Годуновский» (вес 4600 кг, 3580 кг, 1630 кг и 800 кг соответственно) – сразу после подъема и затем через два и семь месяцев. Изменения в звуке колокола оценивались как субъективно (рядом слушателей), так и объективно, изучением сонограмм и расчетом величины демпфирования наиболее значимых тонов. Первые опыты прослушивания зафиксировали обогащение звука колоколов - в процессе эксперимента, он начинает «тембриться», в нем появляется больше «серебра» за счет возрождения верхней части спектра частот. Также у некоторых экземпляров отмечается приращение певучести, то есть времени затухания звука колокола, и незначительное увеличение его объемности (вероятно за счет усиления низших частот).

С целью выбора наиболее точной методики измерений был поставлен модельный эксперимент. Из одиннадцати частот в программе был сгенерирован сигнал, по соотношениям частичных тонов и их характеру затухания близкий к звуку колокола, который был проанализирован с использованием трех методов:

1. Расчет затухания по амплитудной кривой, полученной методом БПФ (быстрое преобразование Фурье)
 2. Расчет по спектральной плотности мощности (использовались значения частот, полученные прежде методом БПФ).
 3. Анализ виброударных спектров отклика системы резонаторов на сигнал
- Кривая сигнала разбивалась на правых интервалов, на каждом из которых для частоты f_j определялась амплитуда спектра Фурье, СКЗ отфильтрованного сигнала, реакция камертона (осциллятора) и строилась зависимость их изменений по времени с шагом $\Delta t = T/n$, где T – продолжительность модельной записи. Далее для каждой зависимости определялся свой коэффициент затухания, дающий наилучшее

приближение. В результате было установлено, что средняя погрешность для метода преобразования Фурье не превышает 10 %, для метода СПМ – до 5 %, для метода виброударного отклика резонаторов – до 25 %. Точность в определении коэффициентов затухания методом отклика резонаторов для большинства частот также не превышала $(5 \div 10)\%$. Существенные различия в оценке возникали в случае близкого расположения частичных тонов, т.к. в таких случаях резонатор реагирует на близкие кратные частоты. Таким образом, для исследования был выбран второй метод. Анализ производился по двум-трем ударам в колокол для каждой из вышеуказанных звукозаписей, во всех случаях изучалось демпфирование 10÷11 низших частот, полное время затухания которых делилось на $n=30 \div 100$ ($\Delta t=0,05 \div 0,1$ с).

Анализ результатов показал незначительное снижение величины демпфирования 3-5 низших собственных частот колоколов в большинстве случаев. У всех колоколов «ожили» характерные акустические особенности, прежде всего биения ряда частот, связанные с дефектами литья. Заметно изменился характер звучания верхних частичных тонов, особенно у двух из четырех колоколов. Вибрация гармоник f_5-f_{10} усилилась по амплитуде и демпфированию – у колоколов возродился верхний регистр звучания, их звук стал более ярким, «серебряным» - произошло своеобразное перераспределение излучения энергии в структуре собственных частот.

Таким образом, результаты исследований показали, что длительное хранение колоколов при опирании на нижний срез приводит к изменению их акустических характеристик за счет демпфирования целого ряда собственных частот, причем эти изменения носят обратимый характер.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ПУАССОНА

Павлов И.С.

(Нижний Новгород)

Одной из важнейших характеристик упругости материала является коэффициент Пуассона ν , который представляет собой отношение поперечного сжатия к удлинению в случае чистого растяжения. Из классической теории упругости известно, что теоретически обоснованные значения коэффициента Пуассона лежат в интервале $-1 \leq \nu \leq 0,5$ [1]. Особый интерес вызывают материалы с отрицательным значением ν , которые встречаются среди пористых сред, гранулированных материалов, полимеров, композитов, кристаллических сред [1,2]. В настоящее время для таких материалов наиболее употребительным стал термин *ауксетики* (от греческого “*auxelos*” – “разбухающий”), предложенный в 1991 г. К.Эвансом [3]. В последние годы в литературе встречается все больше упоминаний об обладающих ауксетическими свойствами наноматериалах (см, например,

[4,5]) и пористых материалах, которые отличаются высокой потребительской ценностью (низкая плотность, хорошие изоляционные свойства и т.п.). Однако описание свойства ауксетичности невозможно без математической модели. В рамках классической теории упругости, исходящей из представления, что среда является континуумом материальных точек, такое описание весьма проблематично. По этой причине возникает необходимость при моделировании представлять среду регулярной или квазирегулярной решеткой, в узлах которой расположены не материальные точки, а тела малых размеров, обладающие дополнительными степенями свободы. В качестве тел могут выступать домены, зерна, фуллерены, нанотрубки или кластеры из наночастиц. В настоящее время для сред с ауксетическими свойствами применяются модели, как правило, двумерные, но с весьма сложной системой связи между анизотропными частицами, в частности, квадратными (см., например, [1,6]).

В данной работе для кристаллических материалов предложены двумерные динамические модели в виде квадратной (для анизотропной среды) и гексагональной (для изотропной среды) решеток, в узлах которых расположены недеформируемые круглые частицы, обладающие двумя трансляционными и одной вращательной (ротационной) степенями свободы [7]. Пространство между частицами представляет собой безмассовую упругую область, через которую передаются силовые и моментные воздействия, моделируемые упругими пружинами трех видов: с жесткостями K_1 , K_2 и K_3 . В рамках данных моделей можно связать упругие постоянные второго порядка C_{11} , C_{12} и C_{44} с параметрами микроструктуры таких материалов [7], к каковым относятся жесткости пружин, диаметр частиц d и период решетки a .

В анизотропном монокристаллическом материале с кубической решеткой коэффициенты Пуассона в особых кристаллографических направлениях $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ находятся по известным соотношениям [8]:

$$\nu_{\langle 100, 001 \rangle} = \frac{C_{12}}{C_{11} + C_{12}}, \quad (1)$$

$$\nu_{\langle 110, 001 \rangle} = \frac{4C_{12}C_{44}}{2C_{11}C_{44} + (C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12})}, \quad (2)$$

$$\nu_{\langle 110, 1\bar{1}0 \rangle} = \frac{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12}) - 2C_{11}C_{44}}{(C_{11} - C_{12})(C_{11} + 2C_{12}) + 2C_{11}C_{44}}, \quad (3)$$

$$\nu_{\langle 111, 111 \rangle} = \frac{C_{11} + 2C_{12} - 2C_{44}}{2(C_{11} + 2C_{12} + C_{44})}. \quad (4)$$

Коэффициент Пуассона изотропного кристаллического материала вычисляется по формуле (1). Очевидно, что коэффициенты Пуассона (3)-(4), в отличие

от (1)-(2), могут принимать отрицательные значения даже при положительных константах упругости. Благодаря формулам (1)-(4) установлена взаимосвязь коэффициентов Пуассона с параметрами микроструктуры рассматриваемых сред. Показано, что при некоторых значениях параметров микроструктуры коэффициенты Пуассона могут принимать отрицательные значения, что согласуется с известными экспериментальными данными [5,8].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-08-01836).

Литература

1. Конек Д.А., Войцеховски К.В., Плескачевский Ю.М., Шилько С.В. Материалы с отрицательным коэффициентом Пуассона (обзор) // *Механика композиционных материалов и конструкций*. - 2004. - Т. 10. - № 1. - С. 35-69.
2. Гольдштейн Р. В., Городцов В. А., Лисовенко Д.С. Ауксетическая механика кристаллических материалов // *Изв. РАН: Механика твердого тела*. - 2010. - № 4. - С. 43-62.
3. Evans K.E. Auxetic polymers: a new range of materials. *Endeavour, New Series*. - 1991. - N 4. - P.170-174.
4. L.J. Hall, V.R. Coluci, D.S. Galvão, M.E. Kozlov, M. Zhang, S.O. Dantas, R.H. Baughman, Sign Change of Poisson's Ratio for Carbon Nanotube Sheets // *Science*. - 2008. - V. 320. - N 5875. - P. 504-507.
5. Гольдштейн Р.В., Городцов В.А., Лисовенко Д.С., Волков М.А. Отрицательный коэффициент Пуассона для кубических кристаллов и нано/микротрубок // *Физическая мезомеханика*. - 2013. - Т. 16. - № 6. - С. 13-31.
6. Васильев А.А. Анализ ауксетических свойств ячейки с частицами конечного размера // *Письма о материалах*. - 2013. - Т. 3. - № 4 (12). - С. 288-291.
7. Potapov A.I., Pavlov I.S., Lisina S.A. Acoustic Identification of Nanocrystalline Media // *Journal of Sound and Vibration*. - 2009. - V. 322. - N 3. - P. 564-580.
8. Беломестных В.Н., Соболева Е.Г. Коэффициенты Пуассона щелочно-галогенидных кристаллов. Ч. I. Галогениды лития // *Изв. Томского политехнического университета*. - 2012. - Т. 320. - № 2. - С. 137-139.

О ФОРМАХ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ВНЕШНЕМ БОКОВОМ ДАВЛЕНИИ

Паймушин В.Н.

(Казань)

Рассматриваются две постановки задачи о статической потере устойчивости по плоской изгибно-сдвиговой и неклассической балочной изгибной формам цилиндрической оболочки из изотропного материала при действии на ее боко-

вую поверхность внешнего давления. Первая соответствует введению предположения о неизменности направления действия нагрузки p при переходе оболочки из невозмущенного в возмущенное равновесное состояние, когда вектор поверхностной нагрузки задается в виде $\mathbf{X} = -p\mathbf{m}$ (\mathbf{m} – вектор единичной нормали до деформации оболочки), а вторая – действию на оболочку «следающего» гидростатического давления, когда

$$\mathbf{X} = -p\mathbf{m}_* = p \left[\omega_1 \mathbf{e}_1 + \omega_2 \mathbf{e}_2 - \left(1 + e_{11} + e_{22} \right) \mathbf{m} \right], \quad (1)$$

$$\omega_1 = w_{,x}, \quad \omega_2 = (w_{,\theta} - v)/R, \quad e_{11} = u_{,x}, \quad e_{22} = (v_{,\theta} + w)/R.$$

Здесь и далее u, v, w – компоненты вектора перемещений точек срединной поверхности, имеющей радиус R ; x, θ – осевая и окружная координаты.

Используются полученные ранее линеаризованные уравнения теории устойчивости [1] (T_{11}, \dots, M_{22} – внутренние усилия и моменты; $T_{22}^0 = -pR$ – докритические окружные усилия в оболочке)

$$RT_{11,x} + T_{12,x} + \frac{T_{22}^0 u_{,0\theta}}{R} + RX_1 = 0,$$

$$RT_{12,x} + T_{22,\theta} + T_{23} + \frac{T_{22}^0 (w_{,\theta} - v)}{R} + RX_2 = 0, \quad (2)$$

$$RT_{13,x} + T_{23,\theta} - T_{22} + \frac{T_{22}^0 (w_{,0\theta} - v_{,\theta})}{R} + RX_3 = 0,$$

$$RM_{11,x} + M_{12,\theta} - RT_{13} = 0, \quad RM_{12,x} + M_{22,\theta} - RT_{23} = 0,$$

соответствующие модели Тимошенко (t – толщина оболочки, Ψ, χ – функции поворотов)

$$\mathbf{U} = \mathbf{u} + z\boldsymbol{\gamma} = (u + z\Psi)\mathbf{e}_1 + (v + z\chi)\mathbf{e}_2 + (w + z\gamma)\mathbf{m}, \quad -t/2 \leq z \leq t/2$$

с уточнением в них слагаемых, связанных с действием «следающего» внешнего давления и записанных в линейном приближении в приведенном выше варианте и в приближенном варианте $\mathbf{X} = p(\omega_1 \mathbf{e}_1 + \omega_2 \mathbf{e}_2 - \mathbf{m})$.

На основе составленных уравнений сформулированы задачи о плоской изгибно-сдвиговой и балочной изгибной формах потери устойчивости (ФПУ) оболочки в разных приближениях. Для всех сформулированных задач получены точные аналитические решения. Из них решения, описывающие балочные изгибные формы потери устойчивости (ФПУ), соответствуют шарнирному опиранию торцевых сечений оболочки и получены на основе как упрощенных уравнений, составленных в безмоментном приближении, так и неупрощенных (моментных) уравнений. Показано, что их реализация возможна только у длинных оболочек при действии «не следающего» бокового давления, а при действии «следающего» давления его критическое значение, соответствующее балочным изгибным ФПУ, значительно больше критического давления, соответствующего

«оболочечным» изгибным ФПУ. Установлено, что при действии «следящего» давления использование линеаризованных уравнений с отмеченными выше слагаемыми, соответствующими теории среднего изгиба оболочек, является некорректным. Следует особо подчеркнуть, что в случае малых деформаций оболочки при ее среднем изгибе упрощение выражения (1) и первого уравнения системы (2) за счет отбрасывания в них подчеркнутых слагаемых считается абсолютно обоснованным. Но, как показывает сравнение полученных результатов, использование геометрически нелинейных уравнений, предварительно упрощенных указанным выше способом, при постановке и решении тех или иных задач механики оболочек в условиях начального гидростатического давления (в частности, рассматриваемой в данной статье задачи устойчивости по исследуемым неклассическим формам) может привести к весьма значительным погрешностям.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00667) и средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

Литература

1. *Паймушин В.Н.* Проблемы геометрической нелинейности и устойчивости в механике тонких оболочек и прямолинейных стержней // ПММ. 2007. Т.71. Вып.5. С.854-893.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРУГОСТИ И ДЕМПФИРОВАНИЯ УГЛЕПЛАСТИКА

Паймушин В.Н., Фирсов В.А., Гюнал И., Шишкин В.М.

(Казань, Киров)

Для исследования упругих и демпфирующих свойств материалов в динамических режимах деформирования используются удлиненные тест-образцы прямоугольного поперечного сечения. Разработана установка для исследования затухающих изгибных колебаний консольно закрепленных тест-образцов. Для снятия виброграммы колебаний свободного конца тест-образца используется триангуляционный лазерный датчик фирмы RIFTEK (RF603-X/100), обеспечивающий точность измерения амплитуды колебаний 0,01мм.

Проведены испытания серии тест-образцов, состоящих по толщине из шести слоев углеткани Porcher 3692 (связующее ЭДТ-69НМ). Упругие и демпфирующие свойства одного слоя в направлениях 0^0 (ось 1) и 90^0 (ось 2) одинаковы. Для определения динамических модулей упругости углепластика в данных направлениях использовались вертикально расположенные тест-образцы с угла-

ми укладки слоев 0^0 к их продольной оси $0x$ при ширине $b=15,5$ мм и толщине $h=1,32$ мм. Длина L рабочей части тест-образцов менялась в пределах от 100 мм до 450 мм. Динамический модуль упругости определялся по экспериментальной частоте свободных колебаний тест-образца по формуле

$$E_{1,d} = (38,0164 f^2 - 1,5 g/L) \rho L^4 / h^2, \quad (1)$$

учитывающей влияние его веса на расчетную частоту f . При этом, несмотря на некоторый разброс экспериментальных данных, наблюдается заметная тенденция к уменьшению $E_{1,d}$ по мере увеличения частоты f , которую в достаточно широком диапазоне можно аппроксимировать выражением

$$E_{1,d} = 3,11 \cdot 10^3 \cdot \exp(-2,34 \cdot 10^{-2} f) + 3,77 \cdot 10^4 \exp(-3,56 \cdot 10^{-4} f). \quad (2)$$

Относительное уменьшение динамического модуля упругости $E_{1,d}$ по данному выражению в диапазоне частот $f \in [5,85; 112,472]$ Гц, соответствующем заданному набору длин тест-образцов, составляет величину 9,65%.

Для определения динамического модуля упругости при сдвиге использовались тест-образцы с углами укладки слоев 45^0 и длинами рабочей части от 100 мм до 500 мм. Сначала подобно (1) определялись динамические модули упругости $E_{x,d}$ пакета слоев в направлении продольной оси тест-образца, обработка которых дала аппроксимацию

$$E_{x,d} = 2,15 \cdot 10^3 \cdot \exp(-1,60 \cdot 10^{-2} f) + 1,21 \cdot 10^4 \cdot \exp(-2,43 \cdot 10^{-4} f). \quad (3)$$

Наличие аппроксимаций (2) и (3) дает возможность получить зависимость динамического модуля сдвига углепластика от частоты f (через $E_{1,d}$ и $E_{x,d}$):

$$G_{12,d} = a E_{x,d} / (4a - E_{x,d}); \quad a = (E_{1,d} + E_{2,d} + 2\nu_{12} E_{2,d}) / 4(1 - \nu_{12}\nu_{21}) \quad (4)$$

при условии $E_{2,d} = E_{1,d}$, $\nu_{21} = \nu_{12}$.

Демпфирующие свойства тест-образца определяются логарифмическим декрементом колебаний (ЛДК) δ , зависящим от амплитуды колебаний A его свободного конца. На данную зависимость существенное влияние оказывает внешнее аэродинамическое демпфирование, которое необходимо исключить с целью определения параметра внутреннего демпфирования тест-образца:

$$\delta^*(A) = \delta(A) - \delta_a. \quad (5)$$

Аэродинамическую составляющую демпфирования δ_a можно получить теоретико-экспериментальным методом при исследовании изгибных затухающих колебаний дюралюминиевых тест-образцов, в которых, как известно [1], внутреннее трение не зависит от амплитуды колебаний A :

$$\delta_a = \frac{\rho_a b}{\rho h} \left(\frac{6,14}{\sqrt{\beta}} + \frac{25,93 \kappa^{2,07}}{1 + 5,53 \kappa^{1,64}} \right); \quad \beta = \frac{b^2 f}{v}; \quad \kappa = \frac{A}{b}. \quad (6)$$

Здесь ρ_a, ρ - соответственно, плотность воздуха и плотность материала; v - кинематическая вязкость воздуха.

Демпфирующие свойства рассматриваемого углепластика при циклическом деформировании его в направлении оси 1 и при сдвиге определяются ЛДК δ_1 и δ_{12} , зависящими от амплитуд соответствующих деформаций. Данные зависимости представляются степенными функциями

$$\delta_1(\epsilon_{1,0}) = \alpha_1 \epsilon_{1,0}^{\beta_1}, \quad \delta_{12}(\gamma_{12,0}) = \alpha_{12} \gamma_{12,0}^{\beta_{12}}. \quad (7)$$

Для идентификации зависимости $\delta_1(\epsilon_{1,0})$ используются прежние тест-образцы с укладкой 0° . Параметры α_1, β_1 определяются из условия минимума целевой функции

$$F(\alpha_1, \beta_1) = \|\delta^* - \delta\|, \quad (8)$$

где δ^*, δ - векторы, содержащие, соответственно, заданные и расчетные параметры внутреннего демпфирования тест-образца. Для определения компонент вектора δ используется метод конечных элементов с последующей заменой системы разрешающих уравнений одним уравнением относительно нормальной координаты нижней формы колебаний и переходом к алгоритму прогонки для прямого получения амплитуд колебаний и расчетных ЛДК тест-образца. Поиск минимума целевой функции $F(\alpha_1, \beta_1)$ удобнее всего реализовать методом конфигураций Хука-Дживса [2]. Для идентификации зависимости $\delta_{12}(\gamma_{12,0})$ используются параметры внутреннего демпфирования тест-образцов с укладкой слоев 45° . Величины α_{12}, β_{12} данной зависимости находятся при известных α_1, β_1 из условия минимума целевой функции F , зависящей от параметров α_{12}, β_{12} .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00667).

Литература

1. Adams R.D. The damping characteristics of certain steels, cast Irons and other metals // Journal of Sound and Vibration – 1972. – Vol. 23, No 2, – P. 199–216.
2. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ. – М.: Мир, 1982. – 238 с.

УЧЕТ ТРЕБОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ «РУЛЬ – ПРИВОД» ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАНЕВРЕННОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Парафесь С.Г., Туркин И.К.

(Москва)

К числу важнейших задач проектирования маневренных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) относятся задачи обеспечения безопасности от флаттера и аэроупругой устойчивости с системой автоматического управления (САУ). Одним из возможных видов аэроупругой неустойчивости БЛА с САУ является потеря устойчивости в системе «привод – руль» [1]. Для решения задачи согласования параметров и характеристик руля и привода с учетом требования устойчивости системы «привод – руль» предлагается итерационный метод, представленный на рисунке в виде структурной схемы.



На рисунке изображена схема задачи согласования параметров руля и привода с целью обеспечения устойчивости системы «руль – привод»

Согласно предлагаемому методу сначала исследуется устойчивость системы «руль – привод». При этом считается, что предварительно решены задачи отдельного проектирования отдельных частей системы «руль – привод»: руля как агрегата силовой конструкции БЛА и привода как силового агрегата САУ. В случае неустойчивости системы или отсутствия в ней требуемых запасов устойчивости, выполняется анализ влияния параметров (характеристик) руля и привода на устойчивость системы с целью определения их числовых значений, при которых система «руль – привод» обладает достаточными запасами устойчивости (при частотном критерии устойчивости это

запасы по модулю и фазе). На основании этого анализа вырабатываются наиболее эффективные мероприятия, направленные на обеспечение устойчивости системы «руль – привод». Они могут быть связаны с изменением массово-инерционных и жесткостных характеристик руля или коррекцией параметров и характеристик привода. В первом случае решается новая задача проектирования конструкции руля с учетом дополнительных ограничений, налагаемых требованием устойчивости системы «руль – привод», например, ограничениями на частоты собственных колебаний. Во втором случае следует вернуться к проектированию привода как силового агрегата САУ с тем, чтобы при сохранении потребных динамических свойств (динамики и точности) обеспечить его устойчивость на частотах упругих колебаний конструкции руля.

Итерационный процесс совместного проектирования руля и привода продолжается до тех пор, пока не будут удовлетворены предъявляемые к ним требования: для руля – это требования прочности, устойчивости и минимума массы; для привода – требования, связанные с обеспечением потребных динамических свойств при максимальной простоте и надежности и минимальных габаритных размерах и массе; для руля и привода – требование устойчивости системы «руль – привод».

В интересах реализации предлагаемого метода разработаны линеаризованная и нелинейная модели исследования устойчивости системы «руль – привод», отличительной особенностью которых является универсальное описание динамики приводов различных типов (гидравлического, пневматического и электрического). Система «руль – привод» состоит из жесткого руля, совершающего изгибные и крутильные колебания, и неподвижно закрепленного рулевого привода.

Приводится пример решения задачи согласования параметров и характеристик руля и привода с учетом требования устойчивости системы «привод – руль».

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 834.

Литература

1. Беспилотные летательные аппараты: Основы устройства и функционирования / П.П.Афанасьев, И.С. Голубев, С.Б. Левочкин, В.Н. Новиков, С.Г. Парфес, М.Д. Пестов, И.К. Туркин. Под ред. И.С. Голубева и И.К. Туркина. – М.: МАИ, 2010. – 654 с.

ВЛИЯНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ФОРМОВАНИЯ ЗАГОТОВОК НА СТРУКТУРЫ ПОЛУЧАЕМЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Перельман В.Е.

(Москва)

При формировании заготовок из порошковых композиций наряду с получением требуемых плотностей и форм прессовок стоит задача обеспечения равномерного распределения входящих в состав композиций порошков различных материалов. Поскольку объемные доли добавок, как и размеры частиц порошков, входящих в состав композиций, могут изменяться в широких пределах и отличаться на порядок и более, то обычные процессы смешения и подготовки шихт не обеспечивают достаточно равномерное перемешивание материалов в таких композициях. Процессы прессования, в которых реализуются большие степени разнонаправленных деформаций прессуемого материала, позволяют, как показала практика, не только получать близкие к компакту заготовки, но и способствовать равномерному распределению входящих в композицию материалов. В качестве примеров эффективности таких технологий прессования рассмотрим структуры отформованных заготовок из коксо-пековых композиций и композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМП) с добавками чешуйчатого графита, сажи и нанодисперсного порошка монтмориллонита (ММТ).

Для получения высокодисперсных графитов используются порошки кокса с размерами частиц менее 10 мкм. Задачу качественного смешения таких порошков с существенно более крупными порошками пека решают, как правило, применяя технологию горячего смешения, при которой порошок кокса смешивают с расплавом пека. В таких процессах горячего смешения весовые доли пека в композиции составляют 34 и более процентов. На практике это означает, что объемная доля пека достигает 70%. Порошок, полученный после размола такой композиции, имел насыпную плотность $0,7 - 0,75 \text{ г/см}^3$. Плотность цилиндрических заготовок после прессования этого порошка в жесткой матрице в зависимости от давлений прессования находилась в диапазоне $1,3 \div 1,42 \text{ г/см}^3$. Плотность материала после карбонизации (980°C , 300 часов) достигала $1,55 \div 1,58 \text{ г/см}^3$ (НИИГРАФИТ).

Альтернативная технология прессования заготовок из таких шихт, в которой материал в канале пресса на стадии формирования заготовки подвергают при давлениях от 10 до 40 МПа как поэтапно, так и одновременно разнонаправленным деформациям вытяжки, осадки, сдвига и кручения, причем суммарная деформация обрабатываемой шихты достигает нескольких сотен процентов, обеспечила не только высокую плотность прессовок ($1,72 \div$

1,76г/см³), но и хорошее качество смешения и однородность свойств заготовок из высокодисперсных шихт, содержащих не более 24 ÷ 28% пека [1].

Как показали исследования, все частицы порошка кокса, которые имели огранку при такой обработке, покрываются сферической пековой оболочкой, что, как следствие, обеспечивает высокую прочность материала в готовом продукте.

В структуре полученного по указанной выше технологии прессования композиционного материала СВМП с 3 весовыми процентами порошка чешуйчатого графита чешуйки графита, как и частицы кокса при прессовании коксопековой композиции, находятся в каркасе из волокон СВМП. При этом мелкие частицы графита достаточно равномерно распределяются в полимерном материале.

Характер распределения частиц сажи в композиционном материале на основе СВМП показал, что в таких процессах прессования имеет место также и встраивание высокодисперсных частиц сажи в волокна СВМП (содержание сажи 2%). Следует отметить, что высокодисперсные частицы сажи образуют также и конгломераты, которые сохраняются даже и при интенсивной деформационной обработке материала при прессовании.

Большие степени разнонаправленных деформаций при прессовании порошка СВМП GUR 4150, содержащего 2 весовых процента порошка ММТ (наноглина), частицы которого состоят из наноразмерных фрагментов, привели как к встраиванию этих фрагментов в волокна СВМП, так и к нанесению тонких пластин ММТ как пленки на поверхность полимерных гранул.

Данные микрорентгеноспектрального точечного анализа показали, что при использовании такой технологии прессования наноглина, обладая высокой пластичностью, даже при низком процентном содержании распределяется, практически, по всей поверхности крупных частиц СВМП.

Проведенные исследования структур различных композиционных материалов показали, что высокие степени разнонаправленных и отличающихся по типу деформаций позволяют даже в отличие от процессов прессования, в которых прессуемые порошковые композиции получают высокие степени однонаправленных деформаций, с высокой эффективностью гомогенизировать структуру материала в отформованных заготовках.

Литература

1. *Перельман В.Е.*, Губенко Л.А. Новое в технологии получения высокодисперсных графитов, журнал "Известия вузов. Химия и химическая технология", 2013, Т. 56, №. 7 Стр. 109-112.

ИЗГИБ ЧАСТИЧНО ОПЕРТОЙ ТРЕХСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЫ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

Поддубный А.А., Яровая А.В.

(Гомель)

Слоистые элементы конструкций широко используются в промышленном и гражданском строительстве, транспортном машиностроении, при строительстве и восстановлении искусственных сооружений на железных и автомобильных дорогах. Достаточно часто встречаются пластин, контактирующие с упругим основанием. В процессе их эксплуатации по ряду причин возможно появления зазора между пластиной и основанием, из-за чего изменяется расчетная схема конструкции, возрастают параметры ее напряженно-деформированного состояния, что может привести к преждевременному разрушению. При этом материалы проявляют физически нелинейные свойства. Дифференциальные уравнения равновесия становятся нелинейными, и возникает проблема выбора методов их приближенного решения.

Рассматривается прямоугольная трехслойная пластина, испытывающая цилиндрический изгиб, с размерами $l \times b$ и толщиной h . Система координат x, y, z связана со срединной плоскостью заполнителя. Ось x направлена вдоль стороны длиной l , ось y – вдоль стороны длиной b , ось z – вниз. Несущий слой, расположенный со стороны положительного направления оси z , считается первым слоем, следующий несущий слой – вторым, а заполнитель – третьим. Номер слоя обозначен индексом k .

Пластина опирается на участки упругого основания различной жесткости, через k^n обозначен коэффициент жесткости упругого основания на n -м участке ($n = I, II, III$). Если на одном или двух участках основание отсутствует, то необходимо принять нулевым соответствующий коэффициент жесткости. На n -й участок действуют продольная $p^n(x)$ и поперечная $q^n(x)$ распределенные нагрузки, на границах участков и торцах – погонные силы и моменты.

В качестве искоемых величин приняты функции $w^n(x)$, $u^n(x)$ – прогиб и продольное перемещение срединной плоскости заполнителя, а также $\psi^n(x)$ – угол поворота нормали в заполнителе за счет сдвига (угол сдвига) на n -м участке. В точках сопряжения участков должны соблюдаться условия непрерывности перемещений.

В слоях пластины используются физические уравнения теории малых упругопластических деформаций Ильюшина ($i, j = x, y, z$):

$$s_{ij}^{(k)n} = 2G_k^n f^{(k)n} \varepsilon_{ij}^{(k)n} = 2G_k^n (1 - \omega^{(k)n}) \varepsilon_{ij}^{(k)n}; \quad \sigma^{(k)n} = 3K_k^n \varepsilon^{(k)n}, \quad (1)$$

где $s_{ij}^{(k)n}, \varepsilon_{ij}^{(k)n}$ – девиаторы тензоров напряжений и деформаций на n -м участке; $\sigma^{(k)n}, \varepsilon^{(k)n}$ – их шаровые части; G_k^n, K_k^n – модули упругости материалов на n -м участке; $f^{(1)n}, f^{(2)n}$ – функции пластичности в несущих слоях; $f^{(3)n}$ – функция нелинейности в заполнителе.

С помощью вариационного принципа Лагранжа и метода «упругих» решений Ильюшина получены системы обыкновенных дифференциальных уравнений равновесия отдельно для каждого участка. Для n -го участка, связанного с упругим основанием

$$\begin{aligned} a_1^n u^n{}_{,xx} + a_6^n \Psi^n{}_{,xx} - a_7^n w^n{}_{,xxx} &= -p^n + p_\omega^n, \\ a_6^n u^n{}_{,xx} + a_2^n \Psi^n{}_{,xx} - a_3^n w^n{}_{,xxx} - a_5^n \Psi^n &= h_\omega^n, \\ a_7^n u^n{}_{,xxx} + a_3^n \Psi^n{}_{,xxx} - a_4^n w^n{}_{,xxxx} - \kappa^n w^n &= -q^n + q_\omega^n, \end{aligned} \quad (2)$$

где a_i^n – коэффициенты, зависящие от геометрических и жесткостных свойств слоев; $p_\omega^n, h_\omega^n, q_\omega^n$ – величины, соответствующие неупругим составляющим в уравнениях (1).

Если n -й участок не связан с упругим основанием, то третье уравнение системы (2) будет следующим:

$$a_7^n u^n{}_{,xxx} + a_3^n \Psi^n{}_{,xxx} - a_4^n w^n{}_{,xxxx} = -q^n + q_\omega^n.$$

Предположим, что в (1), (2) содержится малый параметр, например все $\omega_k < 1$. Тогда возможен метод итераций, при котором для любого m -го приближения получаем систему уравнений

$$\begin{aligned} a_1^n u^{n(m)}{}_{,xx} + a_6^n \Psi^{n(m)}{}_{,xx} - a_7^n w^{n(m)}{}_{,xxx} &= -p^n + p_\omega^{n(m-1)}; \\ a_6^n u^{n(m)}{}_{,xx} + a_2^n \Psi^{n(m)}{}_{,xx} - a_3^n w^{n(m)}{}_{,xxx} - a_5^n \Psi^{n(m)} &= h_\omega^{n(m-1)}; \\ a_7^n u^{n(m)}{}_{,xxx} + a_3^n \Psi^{n(m)}{}_{,xxx} - a_4^n w^{n(m)}{}_{,xxxx} - \kappa^n w^{n(m)} &= -q^n + q_\omega^{n(m-1)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Если n -й участок не связан с упругим основанием, то в третьем уравнении отсутствует слагаемое $\kappa^n w^{n(m)}$. Величины $p_\omega^{n(m-1)}, h_\omega^{n(m-1)}, q_\omega^{n(m-1)}$, соответствующие неупругим составляющим, носят название дополнительных «внешних» нагрузок. Они служат поправками на пластичность и физическую нелинейность материалов слоев. На первом шаге ($m = 1$) они принимаются равными нулю, в дальнейшем вычисляются по результатам предыдущего приближения.

Применение метода последовательных приближений позволяет на каждом шаге приближения рассматриваемую задачу сводить к линейной задаче теории упругости с дополнительными «внешними» нагрузками.

Решив отдельно системы уравнений для участков, связанных и не связанных с упругим основанием, получаем искомые функции перемещений в рекуррентном виде. Содержащиеся в них константы интегрирования определяются с учетом граничных условий и условий сопряжения участков друг с другом.

Таким образом, получено аналитическое решение в итерациях задачи о деформировании трехслойной пластины, материалы которой проявляют упруго-пластические свойства, при ее частичном контакте с упругим основанием. Проведен численный анализ напряженно-деформированного состояния трехслойных пластин в зависимости от прочностных и геометрических параметров слоев, способов закрепления на торцах, жесткости упругого основания и длин участков опирания.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КИНЕТИКИ ФОРМИРОВАНИЯ БОРИРОВАННОГО СЛОЯ ПРИ ЖИДКОСТНОМ БОРИРОВАНИИ СТАЛЕЙ

Помельникова А.С., Жук В.М.

(Москва)

До настоящего времени не существует методики, которая бы позволила на основе данных о химическом составе исходного сплава и борировующей среды, условий борирования, раскрыть природу процессов, лимитирующих образование борированного слоя, предсказать его структуру и свойства.

В настоящее время общепризнанно, что решетка боридных фаз формируется через промежуточную структуру Fe-B [1]. Однако не ясно, какие изменения должны произойти в решетке стали или железа при превращениях Fe-FeB, Fe-Fe₂B и Fe-Fe₃B. Поэтому не существует единого мнения о том, через какие промежуточные фазы может происходить это превращение.

В соответствии с данными геометрической модели и гамма-резонансной спектроскопии [2,3], превращения, вызванные температурными воздействиями и насыщением стали атомами бора, рассматриваются как совокупность конкурирующих процессов: синтеза и распада включений (кластеров), содержащих различное количество атомов бора или их вакансий. В случае преобразования Fe₂B-FeB или FeB-FeB₂ кинетика изменения содержания FeB в борированном слое может быть описана уравнением:

$$\frac{dN_1}{d\tau} = -N_1 \sum_{m=1}^3 \lambda_c(1,m) N_m + \sum_{m=2}^3 \lambda_p(m,1) N_m, \quad (1)$$

где N_1 – концентрация фазы FeB в борированном слое,

λ_c, λ_p – вероятность синтеза и распада включений FeB, Fe₂B, Fe₃B из кластеров, содержащих одну или m вакансий по бору в мотиве Fe₄B₄.

При малых длительностях изотермической выдержки при борировании содержание нестехиометрического борида FeB_{1-x} изменится в соответствии с уравнением:

$$\Delta N_1 = -N_{1,0}^2 \lambda_c (1,1) \Delta t, \quad (2)$$

где $N_{1,0}$ – начальная концентрация борида FeB ,

λ_c – вероятность коалесценции включений, содержащих 1 (одну) вакансию в структурном мотиве Fe_4B_4 .

Таким образом, уменьшение содержания FeB в слое лимитируется превращением $\text{FeB} - \text{Fe}_2\text{B}$, которое происходит в результате накопления вакансий по бору в отдельных зонах кристаллитов.

Предложенная модель может быть использована при выборе параметров химико-термической обработки с учетом качества поверхности стального изделия, предысторией его изготовления и марки стали.

Литература

1. Крукович М.Г., Прусаков Б.А., Сизов И.Г. Пластичность борированных слоев. – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2010. – 384 с.
2. Помельникова А.С., Перетятыко В.Н., Шипко М.Н. Механизм трансформации решеток боридных фаз // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 10. – с. 45-47.
3. Помельникова А.С., Перетятыко В.Н., Шипко М.Н. Исследование формирования структуры и фазового состава борированного слоя методом ядерного гамма-резонанса // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1989. – № 12. – с. 80-84.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СБОРНЫХ ВИБРОСТОЙКИХ ОПОР ТРУБОПРОВОДА ЛА НА ОСНОВЕ МКЭ И ДАННЫХ ТЕНЗОМЕТРИРОВАНИЯ

Пыхалов А.А., Яхненко М.С.

(Иркутск)

Нагрузки на упругие опоры летательных аппаратов (ЛА), расположенных вблизи высоконагруженных участков конструкции, являются периодическими и могут быть вибрациями, передающимися через конструкции ЛА от силовой установки, или являться следствием работы самого агрегата. Изменяемые параметры упругой прокладки зависят от условий проектирования конструкции. Основными из них являются геометрические параметры (толщина прокладки). Кроме того, могут быть изменены свойства материала прокладки и условия закрепления.

Основной задачей данного исследования является выяснение параметров дополнительных упругих прокладок в конструкции опор трубопровода, для че-

го выполняются следующие работы: 1. Экспериментальное определение параметров пропускания частот от опоры к конструкции; 2. Подбор на основе эксперимента максимально эффективного сочетания геометрических параметров и свойств материалов упругого слоя опоры конструкции.

Материалы и методы исследования. Разработка математической модели метода конечных элементов (МКЭ) расчета вынужденных колебаний трубопроводных систем проведена на основе общего уравнения динамики деформируемого тела в нелинейной постановке с применением контактной задачи теории упругости и расчетом сборных конструкций:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + ([K] + [K_K(\delta)])\{\delta\} = \{F(t, \delta)\} + \{F_K(\delta)\}, \quad (1)$$

где $[M]$, $[C]$, $[K]$ – глобальные матрицы масс, демпфирования и жесткости; $\{\ddot{\delta}\}$, $\{\dot{\delta}\}$, $\{\delta\}$ – векторы узловых ускорений, скоростей и перемещений соответственно; $[M]\{\ddot{\delta}\}$ – вектор сил инерции; $[C]\{\dot{\delta}\}$ – вектор сил демпфирования, $[K]\{\delta\}$ – вектор сил упругости.

Для решения динамического уравнения (1) в работе используется прямой метод численного интегрирования Ньюмарка. Компоненты вектора внешней нагрузки $\{F(t, \delta)\}$ приобретают зависимость от перемещений. Анализ сборных конструкций предполагает появление дополнительных слагаемых, зависящих от вектора перемещений. Этими слагаемыми, как представлено в выражении (1), являются матрица контактной жесткости $[K_K(\delta)]$ и вектор контактных сил $\{F_K(\delta)\}$, которые также являются неявными функциями от перемещений. Добавление слагаемых в уравнение (1) ведёт к уточнению параметров уравнения, однако, значительно повышает необходимое время вычислений при равной вычислительной мощности расчетной станции.

Экспериментальные данные. Решение задачи определения эффективности работы упругой прокладки проводится по методике, изложенной в [1]. Применение указанной методики возможно и в данном случае, однако, при проведении исследований необходимо изучить ни одну полосу частот, а весь диапазон нагружения. Снижение интенсивности виброн нагружения оценивается путем вычисления эффективности виброизоляции Δf_T согласно методике [2], как система защиты от вибрации. Первый путь защиты от вибрации – это «разведение» собственных частот колебания конструкции и частот колебания возбуждающей силы на спектрограммах. Второй вариант решения с конструктивной точки зрения выглядит как добавление в конструкцию упругих элементов и подбор их параметров. В данной работе исследуется параметр интенсивности гашения колебаний в зависимости от параметров материала опоры. Исследование схо-

димости решения МКЭ относительно размера элемента и исследования адекватности математической модели (1) проведено в [3].

Геометрическая модель. Выбрана наименее ресурсозатратная конфигурация КЭ модели. Рассматривается конструкция: массивное тело, прокладка и подставка. Прокладка выполнена из материала «ИРП-1078» или «Полиэтилен» различной толщины. Куб и основание выполнено из стали.

Результаты. Методика расчета показывает серию максимумов частот возбуждений, которые проходят через установленную прокладку, перераспределяясь в частотном диапазоне спектра по интенсивностям. Характер спектрального распределения интенсивности колебаний, действующий через опоры на агрегат, может быть изменен путем добавления в конструкцию упругой прокладки. Результатом добавления прокладки может стать эффективное снижение (до 60 dB) интенсивности вибрационной нагрузки. Прокладка из материала «Полиэтилен» более эффективна на частотах до 1300 Гц, а прокладка из более мягкого материала ИРП1078 показала высокую эффективность на высоких частотах (свыше 1300 Гц). Толщина прокладки влияет на ширину диапазона сглаживания. Для мягкого материала ширина этого диапазона увеличивается из области высоких в область низких частот с увеличением толщины прокладки. Более жесткий материал показывает низкую частотную чувствительность конструкции к толщине прокладки. Объединение двух материалов различного свойства позволяет достичь широкополосного гашения колебаний в конструкции опоры. Данная методика будет применена к расчету демпфирующих прокладок.

Литература

1. Курдюмов, В.И., Зотов Б.И. Проектирование и расчет средств обеспечения безопасности. – М.:Колос, 2005. – 216с.
2. Нор, Е.В., Колесник О.А. Расчет средств защиты от вибрации [Текст]: методические указания к выполнению практической работы по дисциплине «Производственная санитария и гигиена труда» для студентов специальности 280102 «Безопасность технологических процессов и производств». – Ухта: УГТУ, 2008. – 17 с.
3. Яхненко М.С. Динамика сборных конструкций трубопроводных систем с учетом условий сопряжения. Автореферат дисс. канд. техн. наук. Иркутск. 2011. – 20 с.
4. Пыхалов А.А., Высотский А.В. Контактная задача расчета сборных роторов турбошашин с применением МКЭ // Вестн. ИрГТУ. 2003. № 3-4. .56–71.

РОЛЬ МУЗЕЙНО-ВЫСТАВОЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В ФОРМИРОВАНИИ ОБЩЕКУЛЬТУРНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ У СТУДЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗОВ

Радченко С.И., Неклюдова Г.А.

(Брянск)

Целенаправленное развитие культурной личности является актуально значимой задачей высшего образования. В рамках новой субъектно-субъективной учебной парадигмы на первый план выходит становление социальных качеств интеллектуальной личности, формирование поведенческих знаний и умений, которые позволят в будущем выпускнику университета адекватно действовать в различных сложных ситуациях, возникающих в сфере социальной жизни и быть успешным в профессиональной деятельности.

При таком подходе возрастает роль гуманитарных дисциплин, а также воспитательной составляющей учебного процесса подготовки инженеров. Задача формирования общекультурных компетенций должна решаться комплексно. Неотъемлемой частью требований федеральных государственных образовательных стандартов является широкое внедрение интерактивных форм проведения занятий, благодаря чему студент должен превратиться в активного участника образовательного процесса. Кроме того, возрастает роль внеаудиторной образовательной и воспитательной деятельности в процессе формирования общего уровня культуры выпускника.

В Брянском государственном техническом университете (БГТУ) уже более пяти лет студенты активно вовлекаются в музейно-выставочную деятельность в г. Брянске и области на основе творческих работ, выполненных средствами компьютерной графики. Студенческие выставки компьютерной графики состоялись неоднократно в музее братьев Ткачевых, в городском выставочном зале, в музее Хрустала города Дятьково, а также в стенах альма-матер.

Неизменно выставки вызывают искренний интерес у посетителей музеев, широкий резонанс в творческих кругах города, находят отклик в прессе и на телевидение. Брянские газеты отмечали, что «работы, созданные с помощью компьютерных программ, не менее оригинальны и интересны, чем работы, написанные акварелью или маслом» (Брянская учительская газета № 308), «компьютер заменил холст и палитру» (Брянский рабочий № 76). В статьях подчеркивалось: «Выставку посещают студенты и преподаватели. Здесь они черпают знания по компьютерной графике и получают дополнительный заряд для творчества. А это немаловажно для успешной учебы», «У компьютерной графики огромные художественные возможности... для поколения, которое с компьютером на ты, это способ самовыражения, восприятия и оценки мира», «У этого

вида искусства большое будущее, ведь нашу жизнь без компьютера уже невозможно представить».

Участие в работе музеев и знакомство с другими экспозициями позволяет обеспечить приобщение студентов к ценностям мировой и отечественной культуры, воздействие на личность с целью повышения ее образовательного уровня и раскрытия творческого потенциала.

Любое творчество обновляет мир и человек должен всегда творить, а отсутствие этой потребности ведет к деградации.

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ АНТЕННОГО ОБТЕКАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ НАДЕЖНОСТИ

Рогов Д.А., Кирюшина В.В., Коваленко П.В.

(Москва, Обнинск)

Радиопрозрачный антенный обтекатель является одним из важнейших элементов головной части управляемых ракет и большинства скоростных самолетов, в значительной степени определяющим их аэродинамические характеристики и точность наведения на цель [1]. Определенный уровень надежности изделий обеспечивается уже на этапе исследования свойств материалов и проектирования конструкций, позволяя избегать тем самым материальных, временных и иных затрат при натурных испытаниях, а также возможных разрушающих последствий на этапе эксплуатации.

В данной работе рассмотрен процесс автоматической оптимизации конструкции антенного обтекателя на основе критерия надежности с учетом статистической изменчивости физико-механических свойств материалов, геометрических параметров конструкции, тепловых и аэродинамических нагрузок.

На распределение максимальных расчетных напряжений в изделии влияет ряд определяющих параметров $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, которые являются случайными величинами и характеризуют: воздействия внешней среды (тепловые, аэродинамические, вибрационные и др. нагрузки), геометрические неточности (допуски на геометрические параметры), нестабильность технологического процесса (статистическое рассеяние физико-механических свойств материалов) [2]. Определяющие параметры x_1, x_2, \dots, x_n имеют собственные законы распределения, установление которых и определение параметров распределений представляет значительные трудности.

В работе для аэродинамического давления и температуры теплового потока был выбран нормальный закон распределения со средними значениями, равными заданным в техническом задании на разработку обтекателя, и коэффициентами вариации 10%. Для геометрических параметров конструкции (толщин ма-

териалов оболочки, герметика и шпангоута, длины изделия, длины клеевого соединения) был рассмотрен нормальный закон распределения со средними значениями, равными номинальным и стандартными отклонениями, найденными из условия, что в допуск соответствующего параметра укладывается 3 стандартных отклонения [3]. В качестве закона распределения физико-механических и теплофизических свойств керамики, герметика и материала шпангоута, исходя из экспериментальных и физических соображений, был взят нормальный закон распределения со средними значениями, равными заданным по паспорту на соответствующий материал, и коэффициентами вариации 10%. Следует отметить, что уровень силового и температурного нагружения по длине обтекателя и вид температурных зависимостей свойств материалов полагались неизменными.

Задача оптимизации в математическом виде имеет следующий вид [7]:

$$\begin{cases} \beta = \min_U \|U\| \\ g(U) = 0 \end{cases},$$

где $g(U)$ – функция работоспособности (функция предельных состояний); $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ – стандартизированные нормальные переменные, полученные путем центрирования и нормирования (на значение стандартного отклонения) исходного вектора переменных X ; β – характеристика (индекс) безопасности, равная, по определению, числу стандартных отклонений (S_g) предельной функции, укладываемых в интервале от $g(X) = 0$ до среднего значения $g(X) = \bar{g}$,

$$\text{т.е.: } \beta = \frac{\bar{g}}{S_g}.$$

Особая точка в факторном пространстве переменных U , в которой флуктуации переменных образуют комбинацию, приводящую к наихудшему значению выходной характеристики системы (экстремальные условия), есть наиболее вероятная точка (MPP – Most Probable Point).

Процесс связанного расчета температурных полей и напряжений объединялся с помощью среды ANSYS Workbench в цикл с заданными параметрами оптимизации и целевой функцией, согласно [4].

Оценка минимального индекса безопасности, полученная в ходе решения задачи оптимизации, составила для изделия РВВ-АЕ $\beta_{\min} = 2,285$ и соответствующий ей минимальный уровень прочностной надежности по уравнению:

$$H = 1 - P_f = 1 - \int_{g(X) \leq 0} \dots \int f_g(X) dX \approx \Phi(\beta),$$

в котором P_f – вероятность разрушения, $f_g(X)$ – совместная функция плотности распределения переменных вектора X , $\Phi(\beta)$ – функция Лапласа, равен $H_{\min} = 0,98578$.

В ходе выполнения данной работы решена задача оптимизации антенного обтекателя (на примере конструкции изделия РВВ-АЕ) по критерию прочностной надежности в пространстве переменных – физико-механические свойства материалов, геометрические параметры и эксплуатационное нагружение изделия; определено влияние величины и рассеяния каждой переменной на оценку уровня надежности.

Литература

1. Ромашин А.Г., Гайдачук В.Е., Карпов Я.С., Русин М.Ю. Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов. – Харьков: «ХАИ», 2003.
2. Моисеев Ю.А., Чельшев С.В. Технологическая надежность сложного изделия и ее обработка. М., Едиториал УРСС, 2003, 176 с.
3. Карпов Я.С., Левшанов В.С., Русин М.Ю. О возможностях вероятностно-статистической оценки прочности стеклокерамических обтекателей летательных аппаратов для анализа качества технологии их изготовления. // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. Сб. научн. тр. Гос. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», вып. 33(2), Харьков, 2003, С. 19-29.
4. Бахвалов Н.С. Численные методы. – М.: «Наука», 1993.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ГРУБЫХ ПОСАДОК САМОЛЁТА

Рыбин А.В., Щугорев В.Н.

(Москва)

Распространённая на сегодняшний день методика оценки возможных повреждений и принятия решения о дальнейшей судьбе самолёта, после совершения им грубой посадки, фактически основывается на одном параметре: максимальной вертикальной перегрузке самолёта во время посадки. Перегрузка измеряется штатным прибором инерционного типа АДИС-2-3 во время каждой посадки с определённой частотой опросности. Однако, до сих пор не было проведено детальных исследований надёжности показаний прибора в условиях посадки самолёта. Ещё одной существенной проблемой является вопрос о том, на сколько точно можно судить о нагруженности каждого критически важного элемента конструкции самолёта по показаниям одного единственного средства измерения. Недостаточное знание ответов на эти вопросы увеличивает вероятность допустить эксплуатацию воздушного судна с опасными повреждениями.

В настоящей работе проведено исследование вышеупомянутых проблем на примере среднемагистрального пассажирского самолёта Ту-204СМ. Исследование включает численное моделирование динамики посадки упруго-массовой

модели планера самолёта с шасси [1]. В расчёте используется модель датчика АДИС-2-3, чья АЧХ соответствует параметрам реального прибора. Решение уравнений движения с различными начальными условиями проводилось в системе MSC.Adams.

Моделирование всех существенных нелинейных процессов амортизационной системы, а также пространственного взаимодействия самолёта с ВПП позволило детально проанализировать работу датчика ускорения и оценить точность его показаний. Выявлены некоторые случаи грубых посадок, детектирование которых может быть ненадёжно при использовании критерия, основанного лишь на величине максимальной перегрузки.

Литература

1. Рыбин А.В. Исследование динамики посадки пассажирского самолёта // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2014, № 74, эл. адрес: <http://mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49196>

ПОВТОРНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХСЛОЙНОГО УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ В НЕЙТРОННОМ ПОТОКЕ

Савицкий Д.М.

(Гомель)

Радиационное облучение твердых тел сопровождается возникновением дополнительной объемной деформации θ_I , изменением упругих и пластических характеристик материала.

Рассмотрим однородное изотропное тело, занимающее полупространство $z \geq 0$. Если на границу ($z = 0$) параллельно оси z падают нейтроны с одинаковой средней энергией и интенсивностью $\phi_0 = \text{const}$, нейтрон/(м²сек), то интенсивность потока нейтронов, доходящих до плоскости $z = \text{const}$, будет $\phi(z) = \phi_0 e^{-\mu z}$. Величина μ называется макроскопическим эффективным сечением и имеет порядок 1/м. К моменту времени t через сечение z пройдет поток:

$$I(z) = \phi_0 t e^{-\mu z}. \quad (1)$$

Приближенно можно считать, что изменение объема материала прямо пропорционально потоку $I(z)$ и, следовательно, $\theta_I = BI(z)$, где B – опытная константа, которая в зависимости от энергии нейтронов и облучаемого материала может быть порядка $10^{-28} - 10^{-24}$ м²/нейтрон. Величина $I_0 = \phi_0 t$ дает суммарный поток нейтронов на единицу площади поверхности тела. В реакторах ϕ_0 имеет порядок $10^{17} - 10^{18}$ нейтрон/(м²сек), $I_0 - 10^{23} - 10^{27}$ нейтрон/(м²), θ_I до 0,1.

На поверхности тела ($z = 0$) влияние радиации на предел текучести σ_y , вполне удовлетворительно описывается формулой радиационного упрочнения:

$$\sigma_y = \sigma_{y0} \left[1 + A \left(1 - \exp(-\xi I_0) \right)^{1/2} \right], \quad (2)$$

где σ_{y0} – предел пластичности необлученного материала; A, ξ – константы материала.

На глубине z эта формула принимает вид

$$\sigma_y = \sigma_{y0} \left[1 + A \left(1 - \exp(-\xi I) \right)^{1/2} \right].$$

Рассмотрим в рамках теории малых упругопластических деформаций процесс комплексного воздействия на деформируемое тело внешних силовых и радиационных нагрузок. Пусть в начальный момент времени на тело, находящееся в естественном состоянии мгновенно воздействуют внешние силы F_i', R_i' при граничном перемещении u_{i0}' и одновременно нейтронный поток величиной $I_0 = \phi t$. Предполагается, что в теле появляются области упругих и пластических деформаций. Изменением модулей упругости пренебрегаем. Возникающие в теле напряжения, деформации и перемещения помечаем одним штрихом вверху. Связь между напряжениями и деформациями при нагружении из естественного состояния в нейтронном потоке принимаем в виде

$$s'_{ij} = 2G\mathfrak{a}'_{ij} f'(\varepsilon'_u, I, a'_k), \quad \sigma' = K(3\varepsilon' - BI), \quad (3)$$

где $s'_{ij}, \mathfrak{a}'_{ij}$ – девиаторы, σ', ε' – шаровые части тензоров напряжений и деформаций; G – модуль сдвига; K – модуль объемного деформирования; универсальная функция пластичности $f'(\varepsilon'_u, I, a'_k) = 1$ при $\varepsilon'_u \leq \varepsilon'_y$, ε'_y – предел текучести по деформациям в начальный момент времени; a'_k – аппроксимационные параметры; BI – дополнительное объемное деформирование за счет нейтронного облучения.

Пусть, начиная со времени $t = t_1$, воздействие нейтронного потока прекращается ($\phi = 0$), а внешние силы изменяются так, что во всех точках пластически деформируемых областей тела V_p' происходит разгрузка и последующее знакопеременное нагружение объемными F_i'' и поверхностными силами R_i'' (на S_σ) при граничном перемещении u_{i0}'' (на S_u). Уровень облучения тела остается постоянным и равным его значению перед разгрузкой $I_1 = \phi t_1$. Предел пластичности в точках тела зависит от координаты z и становится равным $\sigma_y''(I_1(z))$. Обозначим соответствующие напряжения, деформации и перемещения через σ_{ij}'' , ε_{ij}'' , u_i'' . Для них физические уравнения состояния запишем следующим образом

$$s''_{ij} = 2G\mathfrak{a}''_{ij} f''(\varepsilon''_u, \varepsilon''_1, I_1, a''_k), \quad \sigma'' = 3K\varepsilon''. \quad (4)$$

Здесь $f''(\varepsilon''_u, \varepsilon''_1, I_1, a''_k)$ – функция пластичности при повторном знакопеременном нагружении, причем $f'' = 1$ при $\varepsilon''_u \leq \varepsilon''_y$, ε''_y – деформационный предел текучести при повторном нагружении.

Сложность краевой задачи для величин с двумя штрихами заключается в зависимости искомого решения от точки разгрузки $(\varepsilon_1', \sigma_1')$, поэтому, следуя Москвитину, введем разности для момента времени $t > t_1$:

$$s_{ij}^* = s_{ij}' - s_{ij}'', \quad \varepsilon_{ij}^* = \varepsilon_{ij}' - \varepsilon_{ij}'' \quad (5)$$

Для величин со звездочками примем уравнения состояния

$$s_{ij}^* = 2G\varepsilon_{ij}^* f^*(\varepsilon_u^*, \varepsilon_1', I_1, a_k^*), \quad \sigma^* = 3K\varepsilon^* \quad (6)$$

где $f^*(\varepsilon_u^*, \varepsilon_1', I_1, a_k^*)$ – новая универсальная функция нелинейности диаграммы деформирования в осях $\sigma^* \sim \varepsilon^*$, на линейном участке следует положить $f^* = 1$.

Уравнения равновесия, граничные условия и соотношения Коши для величин σ_{ij}^* , ε_{ij}^* , u_i^* будут типа (4). Принятые соотношения для величин со звездочками образуют новую краевую задачу. Если теперь предположить, что функцию f^* в любой точке кривой деформирования можно приблизить функцией f' , т. е. описать таким же аналитическим выражением только с другими параметрами a_k^* , то мы уйдем от зависимости f^* от ε_1' :

$$f^* = f'(\varepsilon_u^*, I_1, a_k^*).$$

Сравнивая соотношения (3) для тела при нагружении из естественного состояния и соотношения для величин со звездочками (6) отмечаем, что они совпадают с точностью до обозначений. Поэтому, решение задачи для величин со звездочками можно получить из известного решения задачи, соответствующей нагружению из естественного состояния, путем некоторых замен. Например, если известно перемещение $u_i' = u_i'(x, \varepsilon_u', \varepsilon_y', I, a_k')$, то соответствующее перемещение $u_i^* = u_i'(x, \varepsilon_u^*, \varepsilon_y^*, I, a_k^*)$, а искомое перемещение при повторном знакопеременном нагружении определяется из соотношения (5): $u_i'' = u_i' - u_i^*$.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ТРЕХСЛОЙНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ В ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ

Савицкий Д.М., Старовойтов Э.И.

(Гомель)

Рассматривается замкнутая круговая трехслойная цилиндрическая оболочка средней толщины с различными изотропными слоями. Для тонких несущих слоев принимаются гипотезы Кирхгофа–Лява, для жесткого заполнителя используются точные соотношения теории упругости с линейной аппроксимацией перемещений его точек от поперечной координаты. Таким образом, учтена работа заполнителя на сдвиг и его поперечное обжатие.

Перемещения в слоях выражаются через шесть неизвестных функций $u_\alpha^k(x_\beta, t)$, $w^k(x_\beta, t)$ – тангенциальные перемещения и прогибы точек срединной поверхности несущих слоев в направлении правой системы координат x , φ , z , отнесенной к линиям главных кривизн срединной поверхности заполнителя, z – к внешней нормали ($k = 1, 2$ – номер слоя; $\alpha, \beta = 1, 2$ – номера координатных осей, $x_1 = x$, $x_2 = \varphi$). Деформации следуют из соотношений Коши. Напряжения и деформации в слоях оболочки связаны законом Гука:

$$s_{\alpha\beta}^k = 2G_k(T_k)\varepsilon_{\alpha\beta}^k,$$

$$\sigma^{(k)} = 3K_k(T_k)(\varepsilon^{(k)} - \alpha_{0k}T_k) \quad (k = 1, 2, 3),$$

где $s_x^{(k)}$, $\varepsilon_x^{(k)}$ – девиаторные, $\sigma^{(k)}$, $\varepsilon^{(k)}$ – шаровые части тензоров напряжений и деформаций; $G_k(T_k)$, $K_k(T_k)$ – температурно-зависимые модули сдвига и объемного деформирования; T_k – температура; α_{0k} – коэффициент линейного температурного расширения материала k -го слоя.

Разрешающие уравнения в перемещениях получены вариационным методом Лагранжа:

$$\sum_{k=1}^2 \left[\left(a_{ma1}^k \frac{\partial^2}{\partial x_\alpha^2} + a_{ma2}^k \frac{\partial^2}{\partial x_\beta^2} + a_{ma3}^k \right) u_\alpha^k + a_{ma4}^k \frac{\partial^2 u_\beta^k}{\partial x_\alpha \partial x_\beta} + \left(a_{ma5}^k \frac{\partial}{\partial x_\alpha} + a_{ma6}^k \frac{\partial^3}{\partial x_\alpha^3} + a_{ma7}^k \frac{\partial^3}{\partial x_\alpha \partial x_\beta^2} \right) w^k \right] = -L_{aq}^m,$$

$$L_3^m = \sum_{\alpha, k=1}^2 \left[\left(a_{m31}^{ak} \frac{\partial^4}{\partial x_\alpha^4} + a_{m32}^{ak} \frac{\partial^4}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + a_{m33}^{ak} \frac{\partial^2}{\partial x_\alpha^2} + a_{m34}^{ak} \right) w^k + \left(a_{m35}^{ak} \frac{\partial^3}{\partial x_\alpha^3} + a_{m36}^{ak} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} + a_{m37}^{ak} \frac{\partial^3}{\partial x_\alpha \partial x_\beta^2} \right) u_\alpha^k \right] = -L_{3q}^m \quad (m, \alpha, \beta = 1, 2, \alpha \neq \beta).$$

Здесь коэффициенты a_{man}^k выражаются через упругие и геометрические параметры слоев; правые части уравнений учитывают внешние нагрузки q_i^k и температуру T_k

$$L_{1q}^k = m_k R q_1^k + 3R \left[\alpha_{0k} \int_{h_k} K_k T_k (1 + z/R) dz + 0, 5 \alpha_{03} \int_{h_3} K_3 T_3 (1 \pm z/c) (1 + z/R) dz \right]_{,1},$$

$$L_{2q}^k = 3 \left[\alpha_{0k} \int_{h_k} K_k T_k dz + R^{-1} c_2^k \alpha_{0k} \int_{h_k} K_k T_k (z \mp a_k) dz + B_{k2} \alpha_{03} \int_{h_3} K_3 T_3 (1 \pm z/c) dz \right]_{,2} +$$

$$\begin{aligned}
& + (R \pm 0, 5h_k c_2^k) m_k q_2^k, \\
L_{3q}^k & = Rm_k \left[q_3^k \pm 0, 5h_k (q_{1,1}^k + R^{-1} c_2^k q_{2,2}^k) \right] + \\
& + 3R \left[\alpha_{0k} \int_{h_k} K_k T_k (z \mp a_k) (1 + z/R) dz \mp 0, 25h_k \alpha_{03} \int_{h_3} K_3 T_3 (1 \pm z/c) (1 + z/R) dz \right]_{,11} + \\
& + 3 \left[R^{-1} c_2^k \alpha_{0k} \int_{h_k} K_k T_k (z \mp a_k) dz \mp D_{k2} \alpha_{03} \int_{h_3} K_3 T_3 (1 \pm z/c) dz \right]_{,22} - \\
& - 3 \left\{ \alpha_{0k} \int_{h_k} K_k T_k dz + 0, 5\alpha_{03} \left[\int_{h_3} K_3 T_3 (1 \pm z/c) dz \pm Rc^{-1} \int_{h_3} K_3 T_3 (1 \pm z/R) dz \right] \right\}, \\
& m_k = 1 \pm (c + h_k) R^{-1}; \quad (k = 1, 2).
\end{aligned}$$

Если внешняя силовая нагрузка нормальна к поверхности оболочки, то $q_1^k = q_2^k = 0$, и правые части уравнений будут

$$L_{1q}^k = L_{2q}^k = 0, \quad L_{3q}^k = Rm_k q_3^k.$$

Аналитический вид решения уравнений равновесия трехслойной цилиндрической термоупругой оболочки зависит от конкретных граничных условий. При опирании рассматриваемой оболочки по торцам на неподвижные в пространстве жесткие опоры вид решения системы уравнений будет следующий:

$$\begin{aligned}
u_1^k & = \sum_{p,m} U_{1pm}^k \cos \frac{\pi mx}{l} \cos p\phi, \quad u_2^k = \sum_{p,m} U_{2pm}^k \sin \frac{\pi mx}{l} \sin p\phi, \\
w^k & = \sum_{p,m} W_{pm}^k \sin \frac{\pi mx}{l} \cos p\phi \quad (k = 1, 2).
\end{aligned}$$

Внешние нагрузки в общем случае деформирования необходимо разложить в двойные тригонометрические ряды:

$$L_{3q}^k = \sum_{p,m} q_{3pm}^k \sin \frac{\pi mx}{l} \cos p\phi,$$

где

$$q_{3pm}^k = \frac{2}{\pi l} \int_0^{2\pi} \int_0^l L_{3q}^k \sin \frac{\pi mx}{l} \cos p\phi dx d\phi.$$

После подстановки этих перемещений и нагрузок в уравнения равновесия получим систему шести линейных алгебраических уравнений для определения коэффициентов $U_{\alpha pm}^k, W_{pm}^k$ ($\alpha = 1, 2$).

ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ФОРМИРОВАНИЮ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ЛОПАТОК ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Самедов А.С., Усубалиев Т.Б.

(Баку, Азербайджан)

Применение математических методов планирования и анализа эксперимента позволяет избежать существенные затруднения, которые свойственны традиционному подходу при проведении исследований, сопровождающиеся большими материальными и временными затратами. Несмотря, что эти методы являются пассивными, они значительно способствуют существенному повышению эффективности научной работы.

С целью проведения экспериментальных исследований для получения нового состава, уточнения количества проводимых опытов и определения влияния каждого параметра на химическую стойкость сплава был проведен многофакторный анализ с использованием математического метода планирования эксперимента.

До планирования активного эксперимента необходимо было собрать дополнительную информацию (параметры) об исследуемом объекте, позволяющая оценить и связать факторы в математическую модель. В качестве данной информации и используются результаты пассивного эксперимента, проводимого в предыдущих исследованиях. Правильно выбранный критерий оптимизации дает четкое представление о цели работы.

Методы планирования эксперимента позволяют преобразовать исходную систему дифференциальных уравнений в модели регрессии, аналитически связывающие выходные величины с интересующими параметрами. В случае статистического подхода математическая модель объекта или процесса представляется в виде полинома, т.е. отрезка ряда Тейлора:

$$y(x_1, \dots, x_n) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i,j=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i,j,u=1}^n b_{iju} x_i x_j x_u + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 + \dots \quad (1)$$

где b_0 - свободный член, b_i - линейные эффекты, b_{ij} - эффекты парного взаимодействия, b_{iju} - эффекты тройного взаимодействия, b_{ii} - квадратичные эффекты.

Перед проведением эксперимента выполнены сбор и формализация сведений о самом процессе исследования и его выходных факторов. В качестве критериев оптимизации процесса выбраны время проведения опыта, температура и время отжига.

С целью определения количество проводимых опытов использован центрально-композиционный план (ЦКП) второго порядка. Этот план состоит из

полно факторного эксперимента 2^n ($n \leq 5$), к которым добавляют эксперимент в центре плана и в $2n$ звездных точках, расположенных на осях фиктивного пространства $(\pm\alpha, 0, \dots, 0)$, $(0, \pm\alpha, 0, \dots, 0)$, ..., $(0, \dots, 0, \pm\alpha)$; здесь α - расстояние от центра плана до звездной точки - «звездного плеча» (для трех факторов $\alpha = 1,2154$). Общее количество опытов в матрице композиционного плана равно $N = N_0 + 2n + n_0 = 2^3 + 6 + 1 = 15$, где n_0 - количество опытов в центре плана, n - число факторов, N_0 - число опытов полного факторного эксперимента 2^n .

Для трех факторов составлена матрица планирования ортогонального ЦКП второго порядка, где в качестве критериев оптимизации процесса выбраны время проведения опыта в пределах 4...8 час, температура отжига в диапазоне $1000 \div 1200^\circ\text{C}$ и время отжига в пределах 50...70 час.

В ходе исследований были проведены три полных факторных ($n = 3$) эксперимента. Результирующими функциями выбраны твердость, коэффициент теплового линейного расширения (КТЛР) и теплопроводность сплава. Перед тем, как строить матрицу планирования, следует назначить уровни варьирования факторами. Поскольку согласно предварительным исследованиям функции отклика должны быть нелинейными, то факторы x_1 , x_2 , x_3 имели три уровня варьирования. Уровни факторов представляют собой границы исследуемой области по данному технологическому параметру. Верхний и нижний уровни, как правило, устанавливают экспериментально предварительными опытами. Исходя из значений этих параметров, определяем центр плана и интервал варьирования по формулам:

$$\tilde{x}_{jo} = \frac{\tilde{x}_{j\max} + \tilde{x}_{j\min}}{2}, \quad (2)$$

$$J_j = \frac{\tilde{x}_{j\max} - \tilde{x}_{j\min}}{2}, \quad (3)$$

где \tilde{x}_{jo} , $\tilde{x}_{j\max}$, $\tilde{x}_{j\min}$ - значения исследуемого параметра в центре плана, на верхнем и нижнем уровнях, соответственно; J_j - интервал варьирования. Это дает возможность легко построить ортогональную матрицу планирования и значительно облегчить дальнейшие расчеты, так как в этом случае верхние и нижние уровни варьирования будут равны, соответственно, $+1$ и -1 (соответственно, на уровне 1,2154 и -1,2154), а координаты центра равны нулю и совпадают с началом координат.

После составления матрицы ортогонального ЦКП второго порядка были определены значения параметров оптимизации.

Таким образом, общий вид функции для матрицы ортогонального ЦКП второго порядка будет иметь следующий вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (4)$$

Расчет оценок коэффициентов уравнения регрессии производится по методу наименьших квадратов, при этом минимизируется сумма квадратов отклонений между экспериментальными значениями исследуемого параметра и значениями, вычисленными для тех же точек факторного пространства по уравнению регрессии. Благодаря предварительной стандартизации масштаба факторов и ортогональности матрицы планирования, расчет оценок коэффициентов регрессии превращается в простую арифметическую процедуру.

На следующем этапе выполнен статистический анализ полученной модели, т.е. на этом этапе проверяется адекватность представления результатов экспериментов уравнением линейной регрессии, значимость коэффициентов регрессии и их взаимосвязь.

Значимость коэффициентов уравнения регрессии определялся по критерию Стьюдента, а проверка адекватности модели второго порядка производилась с помощью критерия Фишера.

Таким образом, как показали расчеты и экспериментальные исследования, максимальное значение твердости сплава достигается при следующих пределах значений факторов: времени проведения опытов – $5,5 \div 6,5$ час, температуре отжига – $1075 \div 1125$ С, времени отжига – $57 \div 63$ час. Максимальное значение КТЛР достигается при следующих факторах: времени проведения опытов – 8 час, температуре отжига – 1000С, времени отжига – 70 час. Наибольшее влияние на теплопроводность имеет температура отжига (оптимальные значения для достижения максимальной теплопроводности находятся в пределах $1100 \div 1200$ и $1000 \div 1060$).

Применение метода планирования эксперимента позволило в аналитическом виде представить результаты исследований и на основе построения пространственных изображений с достаточной точностью оценить влияние различных факторов.

МЕТОД КВАЗИДИАГОНАЛИЗАЦИИ В РАСЧЕТАХ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЛИНЕЙНЫХ НЕДИССИПАТИВНЫХ СИСТЕМ

Самогин Ю.Н.

(Москва)

Предложен метод расчета вынужденных колебаний линейных механических систем, основанный на квазидиагонализации динамических уравнений си-

стемы с предварительным выделением квазистатической составляющей и с последующим усечением уравнений в соответствии с частотным спектром внешней нагрузки. При этом квазистатическое решение находится не из исходных уравнений движения, а из некоторых упрощенных уравнений. Размерность упрощенной системы равна исходной размерности задачи. Квазистатическое решение является приближенным. Оно уточняется вторым составляющим – динамическим решением. Для построения динамического решения используются лишь те уравнения колебаний, собственные частоты и формы которых принадлежат заданному частотному диапазону внешней нагрузки, что позволяет для определения динамической составляющей использовать систему уравнений существенно меньшей размерности.

В качестве иллюстрации применения метода квазидиагонализации к расчёту вынужденных колебаний линейных механических систем рассмотрена стержневая система с двумя одинаковыми сосредоточенными массами на одну из которых действуют ударные импульсы.

Литература

1. Самогин Ю.Н., Хроматов В.Е., Чирков В.П. Метод конечных элементов в задачах сопротивления материалов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 200 с.
2. Радин В.П., Самогин Ю.Н., Чирков В.П. Метод конечных элементов в динамических задачах сопротивления материалов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 316 с.

О ВОЗМОЖНОСТИ «ОБКАТКИ РОТОРА» ПРИ КИНЕМАТИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Самсонов Ю.П.

(Москва)

В последнее время возродился интерес к давно отмеченному явлению обкатки ротора по поверхностям подшипников. Если в первых работах [1-3] это явление считалось теоретически возможным и интересным, то в настоящее время во многих публикациях [4-7] утверждается, что процесс обкатки может стать объяснением причин разрушения турбомашин большой мощности. В отмеченных работах показано, что при совокупности многих факторов, основным из которых является внезапная разбалансировка ротора (например, обрыв лопатки), сохраняющаяся в течение некоторого промежутка времени, может привести к многократному возрастанию скорости вращения ротора за счет обкатки ротора.

В настоящей работе показано, что в турбомашинах, установленных на транспортных средствах, касание элементами ротора (в подшипниках, в лаби-

ринтовых уплотнениях) может иметь место и при кинематических воздействиях большой интенсивности.

Рассмотрим механическую систему, состоящую из абсолютно твердых тел. B_j ($j = 0, 1, 2, \dots, m$), которые соединены друг с другом произвольным образом расположенными N опорами таким образом, что исключены линейные и угловые относительные смещения тел без деформаций опор. Предположим, что несущему телу сообщается некоторое возмущение, определяющее его движение. В связи с этим возникает задача об исследовании движения несомых тел относительно несущего. Вывод уравнений движения приведен в [6, 7]

$$A_j \ddot{\bar{q}}_j = \bar{Q}_j^R + \bar{Q}_j^I + \bar{P}_j^I, \quad (j = 1, 2, \dots, m), \quad (1)$$

Здесь A_j - матрица инерции системы; \bar{Q}_j^R - матрица-столбец обобщенных сил, обусловленных усилиями в амортизаторах; \bar{Q}_j^I - матрица-столбец обобщенных сил инерции, обусловленных поступательным движением несущего тела; \bar{P}_j^I - матрица-столбец обобщенных сил инерции, обусловленных вращением несущего тела. Введем матрицу-столбец обобщенных координат всей системы размерностью $6m$

$$\bar{q} = \{\bar{q}_1, \bar{q}_2, \dots, \bar{q}_m\}$$

и запишем уравнения (1) в матричной форме

$$A \ddot{\bar{q}} = \bar{Q}^R + \bar{Q}^I + \bar{P}^I,$$

Решение этих уравнений и исследование колебаний систем с конечным числом несомых тел и с произвольным числом опор, имеющих нелинейные динамические характеристики, проводится численным методом [7]. Приведенная методика нашла практическое применение для расчета амортизации основного энергетического оборудования, установленного на транспортных платформах (например, на судах). Платформа может подвергаться кинематическим воздействием, значительным по величине и кратковременной продолжительности, которые определяют линейную и угловую скоростями движения платформы.

Авторы полагают, что предложенная методика может быть применима для выявления процесса касания ротора статорных элементов и возможности обкатки ротора по статору.

В качестве примера рассмотрена система, состоящая из двух тел (статора турбомашин и ротора), которая расположена на подвижной платформе с помощью системы амортизации. Динамическая характеристика опоры (подшипника) между статором и ротором принята в виде нелинейной функции. Жесткость опоры при штатном режиме определяется жесткостью масляной пленки. При касании шейки ротора поверхности подшипника жесткость определяется матери-

алом вкладыша и далее жесткостью цапфы. Результаты многочисленных расчетов показали, при соответствующих воздействиях, возможны ситуации когда ротор ударяется о тело подшипника, находится в соприкосновении в течение некоторого промежутка времени и. Касание повторяется как в промежутке времени воздействия, так и после его окончания.

Литература

1. Артоболевский И.И., Костицын В.Т., Раевский Н.П. Об одном состоянии вала, вращающегося в подшипнике без смазки с зазором. Изв. АН СССР, отделение технических наук, № 2, 1948, с. 168 – 172.
2. Щегляев А.В., Костюк А.Г. Действие внезапной разбалансировки на ротор турбогенератора. Теплоэнергетика. - 1969 , с. 9 – 16.
3. .Олимпиев В.И. Об обкатке неуравновешенного гибкого ротора по статору. Машиноведение. -1976. -№ 1, с.52 -56.
4. Позняк Э.Л. Крутильный удар в валопроводе при внезапной и сильной разбалансировке. Машиноведение. – 1978 -№ 5, с. 66 – 74.
5. Костюк А.Г., Шатохин В.Ф. Расчет переходных колебаний валопровода при внезапной разбалансировке. Сборник МЭИ, 1972, № 99, с.120 -128.
6. *Самсонов Ю.П., Булахтин К.В. Режимы обкатки ротора при длительном контакте со статором. Донецк, Донецкий национальный университет. 2010.*
7. *Самсонов Ю.П., Мишенков Г.В. К расчету сложных амортизированных систем с нелинейными динамическими характеристиками опор. В кн. Расчеты на прочность. -М.Машиностроение, 1977.*

О ВЫБОРЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ БОКОВОЙ РУЧКИ УПРАВЛЕНИЯ

Самсонович С.Л., Макарин М.А., Шошин М.П.

(Москва)

Безопасность полета самолета, оснащенного электродистанционной системой управления и боковыми ручками управления (БРУ) во многом зависит от кинематической схемы БРУ и системы связи с органами управления.

В настоящее время боковые ручки используются на таких самолетах как: F-16, "Rafale", пассажирских А-320, А340. Боковые ручки имеют некоторые преимущества по сравнению с традиционными штурвалами. К преимуществам боковых ручек можно отнести: уменьшенную массу системы управления, общее улучшение эргономики кабины, в частности: улучшенный обзор панели приборов и индикаторов, а также более удобный доступ к рабочему месту пилота. Однако, в существующих конструкциях БРУ имеется серьезный недостаток, а именно: БРУ являются пассивными органами управления и не дают возможности

иметь актуальную тактильную обратную связь и реализовать пересиливание в случае управления полетом двумя пилотами.[1] В традиционных штурвалах этот вопрос решает механическая проводка, а в конструкциях БРУ он остается открыт.

Для устранения данного недостатка различными фирмами разрабатываются активные БРУ, в состав которых входят приводы различной природы. Авторами был проведен выбор конструктивно-кинематической схемы методом морфологического синтеза.[2,3] Рассматривались варианты с соосным расположением элементов, с элементами лежащими на пересекающихся и скрещивающихся осях. В результате сравнения 128 вариантов расположения исполнительных механизмов были выбраны 5 вариантов, которые представляют собой комбинации расположения продольных, поперечных или рычажных механизмов в карданном шарнире.

В результате синтеза было установлено, что вариант карданного шарнира со скрещивающимися осями, вдоль которых расположены приводы, имеет ряд преимуществ, а именно: компактность, возможность установки приводов вращательного типа, возможность реализации механической проводки. Для кинематических звеньев рассматривались: различные типы электродвигателей, датчиков и механических передач. В результате, были разработаны электромеханические приводы, в которых используются: вентильный электродвигатель для обеспечения быстродействия и большого ресурса, редуктор на основе волновой передачи с телами качения для обеспечения высокого передаточного числа в малых габаритах и датчик положения на основе вращающихся трансформаторов для точного позиционирования выходного звена. Для экспериментальных исследований данной схемы была разработана КД, по которой изготовлены макетные образцы.

Для определения динамических возможностей и требуемых управляющих воздействий, была разработана твердотельная модель устройства в среде Solidworks, по параметрам которой составлена математическая модель в среде Simulink. [4]

Анализ моделей позволяет исследовать законы управления исполнительными двигателями для обеспечения требуемой динамики выходного элемента (стержня рукоятки), варьировать коэффициенты усиления, а также частотные характеристики устройства.

Таким образом, для макетного образца БРУ на основе морфологического синтеза была выбрана кинематическая схема на основе карданного шарнира, а исполнительные элементы представляют собой электромеханические приводы на основе волновой передачи, для обеспечения точного позиционирования выходного элемента. В конструкции БРУ предусмотрена возможность использования механической проводки, для обеспечения синхронного действия пары боковых ручек в случае нештатной ситуации.

Литература

1. Ю.П. Яшин, Л.Е. Зайчик, В.В. Родченко «Aircraft flight safety» International conference proceedings-1993, стр 361.
2. С.В. Акимов «Введение в морфологические методы исследования и моделирование знаний предметной области» электронное издание <http://www.structuralist.narod.ru/articles/morphmethod/morphmethod.htm>
3. С.Л. Самсонович «Основы конструирования электрических, пневматических и гидравлических исполнительных приводов летательных аппаратов.» Москва, МАИ. 2002
4. А.В. Борисевич «Теория автоматического управления: элементарное введение с применением MATLAB» стр.83.

К АНАЛИЗУ РЕГИСТРАЦИЙ ИСТОРИИ ЗАМЕДЛЕНИЯ В МИШЕНИ ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРУЕМОГО СТЕРЖНЯ

Сотский М.Ю.

(Москва)

Приведены принципы анализа опытных данных, регистрируемых с применением измерительных стержней, снабженных пьезоэлектрическими акселерометрами для обеспечения непрерывной электрической регистрации замедления деформируемого ударника.

Показаны особенности обработки для металлических сред модернизированного частного варианта технологии регистрации замедления ударника при его движении в исследуемой среде в условиях обращенного удара со скоростями в диапазоне от 200 м/с до 500 м/с [1].

Представлены предложения для разработки методического обеспечения с целью получения информации о параметрах движения в прочных средах удлиненных пластически деформируемых ударников на основе экспериментальных данных о замедлении ударника относительно прочной среды в процессе удара.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-08-08319-а).

Литература

1. Registration and analysis of object's acceleration history under projectile or energetic material impact / *M. Yu. Sotskiy, V.A. Veldanov, V. S. Kozlov, Yu. M. Sotskiy, A. Yu. Dauriskikh* // Proceedings 10-th International Symposium on Special Topics in Chemical Propulsion and Energetic Materials. Poitiers. France. 2-6 June 2014. http://10iscp.conference.univ-poitiers.fr/sites/10iscp.conference.univ-poitiers.fr/IMG/pdf/10-ISICP-Technical-Program_2014-05-28-word97-YB.pdf (дата обращения: 02.12.2014 г.).

МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ НАУЧНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС КАФЕДРЫ СМ-4 МГТУ ИМ. Н.Э. БАУМАНА

*Сотский М.Ю., Велданов В.А., Гелин Д.В.,
Марков В.А., Пусев В.И., Селиванов В.В.*

(Москва)

Представлен научно-экспериментальный комплекс «Фундаментальные и прикладные исследования физики быстропротекающих процессов». Модернизированный комплекс содержит два кластера оборудования, каждый из которых объединяет приборный и технологический интерфейс вокруг двух уникальных экспериментальных установок: цилиндрической камеры для исследования взрывных процессов и мульткалиберной баллистической установки для исследования высокоскоростных ударных процессов.

Показаны модели и особенности модулей, составивших испытательный комплекс для фундаментальных и прикладных исследований физики быстропротекающих ударных процессов.

Отмечена актуальность применения представленного технологического комплекса при решении задач отладки методик для непрерывной регистрации замедлений ударников в процессе соударения с упругопластической, в том числе металлической, средой при ударе со скоростями в диапазоне от 200 м/с до 500 м/с.

Продемонстрировано соответствие модернизированного комплекса современному мировому уровню оборудования баллистических технологических испытательных комплексов [1-3].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 15-08-07869-а и 15-08-08319-а).

Литература

1. Forrestal M.J., Frew D.J., Hickerson J.P., Rohwer T.A. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurement // Int. J. Impact Engng. 2003. Vol. 28. P. 479–497.
2. Ultra-high g deceleration-time measurement for the penetration into steel target/ Wendong Zhang, Lujiang Chen, Jijun Xiong, Youchun Ma // Int. J. Impact Engng. 2007. Vol. 34. P. 436 – 447.
3. Kinetic energy perforation of concrete slabs: investigation of embedded high G-load sensing / J-M. Sibeaud, A. Delmas, A. Hottelot and D-P. Zappa // Proceedings 27-th International Symposium on Ballistics. Freiburg. Germany. April 22-26. Vol. 2. DEStech Publications, 2013. P.1557-1567.

РАСЧЕТ ТРЕХСЛОЙНЫХ СТЕРЖНЕЙ ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ С ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИМ ЗАПОЛНИТЕЛЕМ

Старовойтова Е.Э.

(Гомель)

Исследован изгиб упругопластического трехслойного стержня со ступенчато-переменной границей нижнего несущего слоя и с жестким теплоизолирующим заполнителем. Система координат x, y, z связывается со срединной плоскостью заполнителя. Для описания кинематики пакета используется гипотеза «ломаной» нормали: в тонких несущих слоях 1, 2 справедливы гипотезы Кирхгофа, в несжимаемом по толщине сравнительно толстом заполнителе 3 нормаль остается прямолинейной, не изменяет своей длины, но поворачивается на некоторый дополнительный угол $\psi(x)$. Деформации считаются малыми. На внешний слой 1 стержня действует распределенная силовая нагрузка $q(x), p(x)$. Через $w(x)$ и $u(x)$ обозначены прогиб и продольное перемещение срединной плоскости заполнителя. На торцах предполагается наличие жестких диафрагм, препятствующих относительному сдвигу слоев, но не мешающих деформированию из своей плоскости. Для описания ступенчато-переменной толщины используется функция Хевисайда $H_0(x)$. Деформации малые.

Уравнения равновесия трехслойного стержня в усилиях и силовые граничные условия следуют из принципа возможных перемещений Лагранжа: $\delta A = \delta W$. В слоях стержня используются физические уравнения состояния теории малых упругопластических деформаций Ильюшина. В итерационном виде система уравнений равновесия в перемещениях будет следующей:

$$(a_1 + a_{10}H(x-x_0))u_{,xx}^{(n)} + (a_6 + a_{60}H(x-x_0))\psi_{,xx}^{(n)} - (a_7 + a_{70}H(x-x_0))w_{,xxx}^{(n)} = -p + p_{\omega}^{(n-1)}$$

$$(a_6 + a_{60}H(x-x_0))u_{,xxx}^{(n)} + (a_2 + a_{20}H(x-x_0))\psi_{,xx}^{(n)} - (a_3 + a_{30}H(x-x_0))w_{,xxx}^{(n)} - a_5\psi = h_{\omega}^{(n-1)}$$

$$(a_7 + a_{70}H(x-x_0))u_{,xxx}^{(n)} + (a_3 + a_{30}H(x-x_0))\psi_{,xxx}^{(n)} - (a_4 + a_{40}H(x-x_0))w_{,xxxx}^{(n)} = -q + q_{\omega}^{(n)}.$$

Для ее решения применён метод упругих решений Ильюшина. Нелинейность материалов слоев учитывают добавки в правых частях уравнений с индексом « ω ».

Величины с индексом $(n-1)$ соответствуют неупругим составляющим и на первом шаге ($n=1$) принимаются равными нулю, а в дальнейшем вычисляются по результатам предыдущего приближения и носят название *дополнительных внешних нагрузок*. Полученная система дифференциальных нелинейных уравнений имеет разрывные коэффициенты за счет функции Хевисайда. Ее решение необходимо проводить отдельно для каждой из областей непрерывности. Полученные решения сшиваются в точке нерегулярности несущего слоя. Искомое решение будет

$$\begin{aligned}\Psi^{(n)}(x) &= \Psi_1^{(n)}(x) + (\Psi_2^{(n)}(x) - \Psi_1^{(n)}(x))H(x - x_0), \\ u^{(n)}(x) &= u_1^{(n)}(x) + (u_2^{(n)}(x) - u_1^{(n)}(x))H(x - x_0), \\ w^{(n)}(x) &= w_1^{(n)}(x) + (w_2^{(n)}(x) - w_1^{(n)}(x))H(x - x_0).\end{aligned}$$

Здесь перемещения с нижним индексом 1 соответствуют решению в первой области, до смены жесткости нижнего несущего слоя, перемещения с индексом 2 – решению во второй области с новой жесткостью:

$$\begin{aligned}\Psi_1^{(n)}(x) &= C_{21}^{(n)} \operatorname{sh}(\beta_1 x) + C_{31}^{(n)} \operatorname{ch}(\beta_1 x) + \\ & \frac{1}{\beta_1} \left[\operatorname{sh}(\beta_1 x) \int g_1^{(n)}(x) \operatorname{ch}(\beta_1 x) dx - \operatorname{ch}(\beta_1 x) \int g_1^{(n)}(x) \operatorname{sh}(\beta_1 x) dx \right], \\ w_1^{(n)}(x) &= \frac{1}{\alpha_{21}} \left[\alpha_{11} \int \Psi_1^{(n)} dx - a_7 L_3^{-1} (p - p_\omega^{(n-1)}) + a_1 L_4^{-1} (q - q_\omega^{(n-1)}) + \frac{a_1 C_{11}^{(n)}}{6} x^3 \right] + \\ & + \frac{C_{41}^{(n)}}{2} x^2 + C_{51}^{(n)} x + C_{61}^{(n)}, \\ u_1^{(n)}(x) &= \gamma_{31} \Psi_1^{(n)} + \frac{1}{\alpha_{21}} \left[-a_4 L_2^{-1} (p - p_\omega^{(n-1)}) + a_7 L_3^{-1} (q - q_\omega^{(n-1)}) + \frac{a_7}{2} C_{11}^{(n)} x^2 \right] + C_{71}^{(n)} x + C_{81}^{(n)}, \\ \Psi_2^{(n)}(x) &= C_{22}^{(n)} \operatorname{sh}(\beta_2 x) + C_{32}^{(n)} \operatorname{ch}(\beta_2 x) + \\ & \frac{1}{\beta_2} \left[\operatorname{sh}(\beta_2 x) \int g_2^{(n)}(x) \operatorname{ch}(\beta_2 x) dx - \operatorname{ch}(\beta_2 x) \int g_2^{(n)}(x) \operatorname{sh}(\beta_2 x) dx \right], \\ w_2^{(n)}(x) &= \frac{1}{\alpha_{22}} \left[\alpha_{12} \int \Psi_2^{(n)} dx - a_{71} L_3^{-1} (p - p_\omega^{(n-1)}) + a_{11} L_4^{-1} (q - q_\omega^{(n-1)}) + \frac{a_{11} C_{12}^{(n)}}{6} x^3 \right] + \\ & + \frac{C_{42}^{(n)}}{2} x^2 + C_{52}^{(n)} x + C_{62}^{(n)}, \\ u_2^{(n)}(x) &= \gamma_{32} \Psi_2^{(n)} + \frac{1}{\alpha_{22}} \left[-a_{41} L_2^{-1} (p - p_\omega^{(n-1)}) + a_{71} L_3^{-1} (q - q_\omega^{(n-1)}) + \frac{a_{71}}{2} C_{12}^{(n)} x^2 \right] + C_{72}^{(n)} x + C_{82}^{(n)}.\end{aligned}$$

Константы интегрирования $C_{11}^{(n)}, \dots, C_{81}^{(n)}; C_{12}^{(n)}, \dots, C_{82}^{(n)}$ следуют из условий закрепления стержня и требований по сопряжению решений в точке нерегулярности.

$$\left\langle \Psi_2^{(n)}(x) - \Psi_1^{(n)}(x) \right\rangle \Big|_{x=x_0} = 0, \quad \left\langle \Psi_2^{(n)}, x(x) - \Psi_1^{(n)}, x(x) \right\rangle \Big|_{x=x_0} = 0,$$

$$\begin{aligned} \left\langle \Psi_2^{(n)}(x) - \Psi_1^{(n)}(x) \right\rangle \Big|_{x=x_0} &= 0, \quad \left\langle w_2^{(n)}(x) - w_1^{(n)}(x) \right\rangle \Big|_{x=x_0} = 0, \\ \left\langle w_2^{(n)}(x) - w_1^{(n)}(x) \right\rangle \Big|_{x=x_0} &= 0, \quad \left\langle w_2^{(n)}(x) - w_1^{(n)}(x) \right\rangle \Big|_{x=x_0} = 0, \\ \left\langle u_2^{(n)}(x) - u_1^{(n)}(x) \right\rangle \Big|_{x=x_0} &= 0, \quad \left\langle u_2^{(n)}(x) - u_1^{(n)}(x) \right\rangle \Big|_{x=x_0} = 0. \end{aligned}$$

Численные результаты получены для металлополимерного стержня единичной длины с материалами слоев Д16Т–фторопласт–Д16Т. В стандартном пакете геометрические характеристики $c = 0,09$, $h_1 = h_2 = 0,03$, $h_{20} = 0,02$, $h_{21} = 0,01$. Координата начала смены жесткости нижнего слоя $x_0 = 0,5$. Интенсивности нагрузок $p = 0$, $q = -10$ МПа. Торцы стержня жестко заделаны. Функция пластичности для несущих слоев ($k = 1, 2$) и функция физической нелинейности для заполнителя приняты в виде:

$$\omega(\varepsilon_u) = \begin{cases} 0, & \varepsilon_u \leq \varepsilon_y; \\ A(1 - \varepsilon_y / \varepsilon_u)^\alpha, & \varepsilon_u > \varepsilon_y. \end{cases}$$

Входящие сюда константы для сплава Д16Т: $A = 0,96$, $\alpha = 2,34$, $\varepsilon_y = 0,735$. Для фторопласта: $A = 0,905$, $\alpha = 1,48$, $\varepsilon_y = 3,3\%$, ε_y – аналог предела текучести.

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 $\Sigma = \sigma_y(\bar{\mathbf{e}}_i \bar{\mathbf{e}}_j)$, определенного в актуальном состоянии.

В качестве аргументов функции потенциальной энергии деформации примем компоненты тензора меры деформации Фингера, т.е. : $W = W(\mathbf{B}_y)$

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:

$$\iiint_{V_{k+1}} {}^{k+1}\Sigma \cdot \delta {}^{k+1}\mathbf{d} dV = \iiint_{V_{k+1}} {}^{k+1}\bar{\mathbf{f}} \cdot \delta \bar{\mathbf{u}} dV + \iint_{S_{k+1}^{\sigma}} {}^{k+1}\bar{\mathbf{t}}_n \cdot \delta \bar{\mathbf{u}} dS,$$

где V_{k+1} – текущий объем; S_{k+1}^{σ} – часть его поверхности, на которой заданы усилия;

$\bar{\mathbf{f}}$, $\bar{\mathbf{t}}_n$ – 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 $\Delta^k\bar{\mathbf{u}} = \Delta^k x_i \bar{\mathbf{e}}_i$, с помощью которого определяется конфигурация следующего

шага: ${}^{k+1}\bar{\mathbf{R}} = {}^k\bar{\mathbf{R}} + \Delta\bar{\mathbf{u}}$.

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: $W = U_1(I_{1\mathbf{B}} - 3) + U_2(I_{2\mathbf{B}} - 3) + \frac{K}{2}(J - 1)^2$,

Здесь U_1, U_2 – постоянные материала.

Тогда тензор напряжений Коши-Эйлера примет вид:

$$\Sigma = 2U_1 J^{-\frac{5}{3}} \left[\mathbf{B} - \frac{1}{3} I_{1\mathbf{B}} \cdot \mathbf{I} \right] + 2U_2 J^{-\frac{7}{3}} \left[I_{1\mathbf{B}} \mathbf{B} - \frac{1}{3} I_{1\mathbf{B}}^2 \cdot \mathbf{I} - \frac{2}{3} \mathbf{B}^2 \right] + K(J - 1) \cdot \mathbf{I}$$

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.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№, 15-01-08733, 15-01-05686.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В НЕПОДВИЖНОМ ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ СЛОЕ АДсорбЕНТА

Тарасова А.Н.

(Москва)

Работа посвящена математическому моделированию процессов, протекающих на стадии сорбции работы экспериментальной установки для регенерации атмосферы в герметично замкнутых объемах (космические аппараты, корабли и станции, подводные лодки, капсулы и т.п.). Представлено описание устройства и принципа функционирования разработанной модельной установки.

Предложена адекватная математическая модель динамики неравновесной изотермической адсорбции углекислого газа при фильтрации несжимаемой газовой смеси через неподвижный осесимметричный слой сорбента. Допущение об изотермичности слоя позволило выявить влияние определяющих параметров на процессы массопереноса, не осложненные тепловыми эффектами. Показано, что полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений является жесткой, поскольку соответствует физическим процессам, протекающим с существенно различными скоростями. Разработан алгоритм построения численного решения данной задачи с использованием продольного варианта метода пря-

мых, метода продолжения решения по наилучшему параметру и неявных многошаговых формул дифференцирования назад с адаптивным контролем порядка формул и величины шага интегрирования. Особенностью указанного алгоритма решения является применение к исследуемой системе уравнений аналитического λ -преобразования, улучшающего ее спектральные характеристики, а, следовательно, смягчающего жесткость задачи. Численная реализация разработанного алгоритма и визуализация результатов расчетов осуществлены в среде вычислительной математики MATLAB. Тестирование алгоритма выполнено с использованием ряда аналитических решений модельных задач. Показано, что максимальная абсолютная погрешность расчетов имеет одинаковый порядок с контролируемой в MATLAB системной переменной *AbsTol* и не превосходит 10^{-6} .

В целях изучения характера протекания сорбции углекислого газа при варьировании определяющих параметров процесса был реализован вычислительный эксперимент, план которого составлен с учетом экспертной информации и результатов натурных испытаний на модельной установке. Проведены параметрические расчеты сорбции углекислого газа сорбентом на основе гидроксида железа при варьировании входной концентрации газа, скорости фильтрации газа, значений кинетического коэффициента адсорбции.

Анализ результатов параметрических расчетов показал, что с ростом входной концентрации уменьшается время насыщения слоя, что обусловлено увеличением плотности тока вещества, подводимого к слою сорбента. Это в свою очередь проявляется в более быстром продвижении профилей концентраций свободного и поглощенного углекислого газа и увеличением крутизны выходных кривых (изменение по времени концентрации CO_2 в потоке воздуха на выходе из слоя). Увеличение скорости на входе в слой приводит, в целом, к тем же эффектам, что и рост входной концентрации, что также объясняется увеличением плотности тока. 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. С ростом кинетического коэффициента увеличивается крутизна профилей и, соответственно, выходных кривых. При фиксированной толщине слоя малые значения кинетического коэффициента приводят к проскоку концентрации, как и в случае достаточно высоких значений скорости потока.

Выполнены верификация и валидация разработанного математического обеспечения путем сопоставления расчетных и экспериментальных данных, полученных на модельной установке. Показано, что вычислительный эксперимент достаточно корректно воспроизводит основные особенности процесса изотер-

мической адсорбции. Максимальная относительная погрешность не превышала 12% для рабочих диапазонов изменения входных параметров. Дальнейшие исследования процесса сорбции будут направлены на изучение эффектов, обусловленных неизотермичностью адсорбционного слоя.

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДИСКРЕТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

Тарасова Т.В., Белаишова И.С., Кузьмин С.Д.

(Москва)

Развитие современных отраслей промышленности невозможно без повышения долговечности и надежности выпускаемых изделий при одновременном снижении их материалоемкости и себестоимости. В процессе эксплуатации оборудования наиболее интенсивным механическим и тепловым воздействиям подвергается поверхностный слой деталей машин, выход из строя деталей в ряде случаев обусловлен недостаточной сопротивляемостью поверхности изнашиванию [1]. Одним из эффективных путей решения этой задачи является разработка и внедрение прогрессивных методов поверхностного упрочнения, основанных на локальном воздействии высококонцентрированных источников энергии (лазерным и электронным лучами, плазменной струей). Под действием излучения происходит резкое повышение энергии электронов в поверхностном слое, при этом часть поглощенной энергии электроны передают атомам решетки, увеличивая, тем самым, уровень тепловых колебаний, а следовательно, и температуру обрабатываемой поверхности. В процессе сверхскоростного нагрева и охлаждения в сталях происходят фазовые превращения, приводящие, при правильно подобранных режимах обработки, к упрочнению поверхности.

Для изделий, работающих в условиях трения и подверженных износу перспективно выглядит технология дискретного лазерного упрочнения. Дискретное упрочнение или упрочнение в соответствии с принципом Шарпи подразумевает получение поверхности, в которой мягкая пластичная основа - матрица равно заполнена твердыми включениями, на которые в процессе эксплуатации и ложится основная нагрузка. Данная методика позволяет получить поверхность, по характеристикам схожую с классическими антифрикционными сплавами, такими как Б83, БрО10 [2], но отличающимися от них более благоприятной формой твердых включений. В целом при сложных условиях внешнего нагружения (совместном воздействии высоких температур, механических нагрузок и абразивных сред) упрочненные покрытия дискретного строения могут обладать более высокой эксплуатационной надежностью в сравнении с покрытиями сплошного упрочнения.

Наиболее важная триботехническая характеристика, определяющая работоспособность пары трения при повышенных нагрузках - коэффициент трения. Основным параметром, определяющим значение коэффициента трения для различных нагрузок, помимо твердости упрочненных и неупрочненных зон, является относительная площадь упрочненной поверхности или коэффициент заполнения (K_3). Коэффициент заполнения определяется по формуле:

$$K_3 = \frac{S_y}{S_{обр}}$$

где S_y - суммарная площадь зон упрочнения;

$S_{обр}$ - площадь образца

В проведенных экспериментах использовались различные стали и сплавы, обработанные дискретно лазерным излучением [3-8].

Образцы из стали марки 20Х13 подвергали лазерной цементации с помощью импульсного лазера с коэффициентом перекрытия 0,75. Обработку проводили при значениях коэффициентов заполнения поверхностей 0,3; 0,6 и 1,0 (твердость упрочненных зон составляла 6800 МПа, твердость неупрочненной лазером поверхности 5200 МПа). В местах перекрытия упрочненных зон не наблюдалось повышенного изнашивания материала, вследствие того, что падение твердости материала в местах наложения упрочненных зон или не происходило, или было очень незначительно. При гетерогенном упрочнении поверхности износостойкость снижается с уменьшением коэффициента заполнения. Наименьший износ образцов и сопряжений наблюдается при значении коэффициента заполнения $K_3=1$ [5].

При лазерном легировании сплавов алюминия (твердость упрочненных участков составляла 6200 МПа, твердость неупрочненной поверхности 910 МПа) максимальная износостойкость была получена при коэффициенте заполнения поверхности равным 0,6.

Результаты измерений коэффициента трения поверхностей алюминиевых сплавов в парах трения сталь-алюминиевый сплав показали, что лазерное поверхностное легирование позволяет в 3-4 раза снизить коэффициент трения обработанной поверхности [3,4].

Образцы из стали 40Х, подвергнутые лазерному легированию бором (твердость зон после лазерного воздействия 15100 МПа, твердость необработанной лазером поверхности 217 МПа) показали наименьший коэффициент трения при $K_3=0,6$ [6].

Таким образом, в ряде случаев дискретное упрочнение поверхности снижает коэффициент трения и увеличивает износостойкость. Вместе с тем, несмотря на значительное количество опубликованных работ, в настоящее время нет общепризнанных рекомендаций по выбору параметров покрытий

дискретного типа, их физико-механических и геометрических характеристик, обеспечивающих высокие показатели износостойкости рабочих поверхностей.

Литература

1. Григорьев С.Н. Решение задач технологического перевооружения машиностроения // ИТО: Инструмент – технология – оборудование. 2008. № 10. С. 14-19.

2. Потехин, Б.А., Глуценко А.Н., Илюшин В.В. Свойства баббита марки Б83 // Технология металлов. № 3. 2006. С. 17-22.

3. Тарасова Т.В., Гвоздева Г.О., Тихонова Е.П. Перспективы использования лазерного излучения для поверхностной обработки цветных сплавов // Вестник МГТУ Станкин. 2012. №2. С.140-143

4. Александров В.Д. Поверхностное упрочнение алюминиевых сплавов. М.: Техполиграфцентр, 2002. 337 с.

5. Тарасова Т. В. Перспективы использования лазерного излучения для повышения износостойкости коррозионно-стойких сталей/ *Металловедение и термическая обработка металлов.* - 2010. - N 6. - С. 54-58.

6. Бурякин А.В. Разработка технологии лазерного легирования сталей бором и азотом: Автореф. дис.канд. техн. наук. М., 1983. 17 с.

7. Т. Tarasova, A. Nazarov, Yu. Shalapko. Abrasive and fretting wear resistance of refractory cobalt alloy specimens manufactured by the method of selective laser melting // *Journal of Friction and Wear.* 2014. Vol 35. № 5. pp. 365-373.

8. М. Doubenskaia, М. Pavlov , S. Grigoriev , E. Tikhonova, I. Smurov . Comprehensive Optical Monitoring of Selective Laser Melting // *Journal of Laser Micro Nanoengineering.* – 2012. – Т. 7, № 3. – С. 236-243.

ДИФРАКЦИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПЛОСКИХ СДВИГОВЫХ ВОЛН НА СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ В УПРУГОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ

Тарлаковский Д.В., Шукуров А.М.

(Москва, Карши)

В упругом однородном изотропном полупространстве $z \geq 0$ на расстоянии h от плоскости $z=0$ на оси O_2z (точка O_2 лежит на границе полупространства) расположен центр O сферической полости единичного радиуса ($h > 1$). Используются две основные системы координат: сферическая r, θ, ϑ с центром в точке O и цилиндрическая ρ, ϑ, z с началом в точке O_2 .

В момент времени $\tau = 0$ фронт плоской нестационарной сдвиговой волны (S -волны) с заданной ненулевой компонентой ψ_s векторного потенциала каса-

ется поверхности полости, что соответствует вращательному движению среды вокруг оси O_2z . При этом отлична от нуля только одна компонента w вектора перемещения и закон Гука имеет следующий вид (η - безразмерный параметр, связанный с упругими постоянными Ламе):

$$\sigma_{r\vartheta} = \frac{1}{\eta^2} \left(\frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \right), \quad \sigma_{\vartheta\vartheta} = \frac{1}{\eta^2 r} \left(\frac{\partial w}{\partial \theta} - w \operatorname{ctg} \theta \right), \quad \sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{\vartheta\vartheta} = \sigma_{r\theta} \equiv 0.$$

С учетом осевой симметрии задачи движение среды описывается следующим уравнением относительно потенциала перемещений, соответствующих дополнительно напряженно-деформированному состоянию, вызванному наличием полости (все его компоненты записываются без дополнительных индексов; точками обозначены производные по времени):

$$\eta^2 \ddot{\Psi} = \Delta \Psi - \frac{\Psi}{r^2 \sin^2 \theta}, \quad (1)$$

где Δ - оператор Лапласа.

Плоская граница полупространства является свободной или жесткой стенкой, что соответствует следующим граничным условиям:

$$\left(\sigma_{\vartheta z} + \sigma_{\vartheta z}^* \right) \Big|_{z=0} = 0 \quad \text{или} \quad \left(w + w^* \right) \Big|_{z=0} = 0,$$

Здесь $w^* = w_s + w^{(0)}$ и $\sigma_{\vartheta z}^* = \sigma_{\vartheta z s} + \sigma_{\vartheta z}^{(0)}$ - суммарные перемещения и напряжения, определяемые потенциалами $\Psi^{(0)}$ и Ψ_s ; w и $\sigma_{\vartheta z s}$ - перемещение и напряжение, порожденные потенциалом Ψ ; индексами «s» и «0» отмечены компоненты напряженно-деформированного состояния в набегающей и отраженной от плоскости волнах.

На поверхности полости граничное условие имеет следующий вид:

$$\left(\sigma_{r\vartheta} + \sigma_{r\vartheta}^* \right) \Big|_{r=1} = 0, \quad \sigma_{r\vartheta}^* = \sigma_{r\vartheta s} + \sigma_{r\vartheta}^{(0)}.$$

Начальные условия однородные. На бесконечности возмущения отсутствуют.

Решение строится с использованием интегрального преобразования Лапласа по времени τ . В пространстве изображения с учетом отсутствия возмущения на бесконечности решение уравнения (1) разыскивается в виде суммы двух рядов по полиномам Гегенбауэра $C_{n-1}^{3/2}(x)$. Первый из них соответствует расходящимся от полости волнам, а второй - сходящимся волнам в дополнительной сферической системе координат r_1, θ_1, ϑ , полученной переносом вдоль оси O_2z центра O исходной сферической системы в точку O_1 , симметричную точке O относительно плоскости $z=0$.

В результате задача сводится к бесконечной системе линейных алгебраических уравнений относительно функций $A_n^l(s)$, которая записывается в виде матричного уравнения:

$$\mathbf{M}\mathbf{A}y^2 + \mathbf{F}^{(1)}\mathbf{A}x - \mathbf{F}^{(2)}\mathbf{A}xy^2 = \mathbf{p}^{(1)}y + \mathbf{p}^{(2)}xy + \mathbf{p}^{(3)}y^3 + \mathbf{p}^{(4)}xy^3 \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{M}(s)$ - бесконечная диагональная матрица с элементами $M_n(s)$; $\mathbf{F}^{(l)}(s)$ ($l=1,2$) - бесконечные матрицы с компонентами $F_{mp}^{(l)}(s)$; $\mathbf{p}^{(k)}(s)$ ($k=1,4$) и $\mathbf{A}(s)$ - бесконечные векторы-столбцы с элементами $p_n^{(k)}(s)$ и $A_n^l(s)$.

Решение этой системы уравнений разыскивается в виде ряда по экспонентам $x = \exp(-2h\eta s)$, $y = \exp(-\eta s)$:

$$\mathbf{A}(s) = \sum_{i,j=0}^{\infty} \mathbf{a}_{ij}(s) x^i y^{-j+1}, \quad (3)$$

где $\mathbf{a}_{ij}(s)$ - бесконечные векторы-столбцы с элементами $a_{ij}^{(m)}(s)$.

Подставляя (3) в (2) и приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях переменных x и y в левой и правой частях (ряд в правой части содержит только один ненулевой член), получаем рекуррентные соотношения относительно функций $a_{ij}^{(m)}(s)$ и соответствующие начальные условия к ним. Эти соотношения позволяют определить все искомые изображения без использования редукции бесконечной системы уравнений. Анализ рекуррентных соотношений показывает, что изображения есть рациональные функции параметра преобразования Лапласа, что дает возможность вычислять их оригиналы, а, следовательно, и оригиналы коэффициентов для перемещений и напряжений в среде с помощью теории вычетов.

Приводятся примеры расчетов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ НШ-2029.2014.8.

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТОУПРУГИЕ ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ТОЛСТОСТЕННОГО ЦИЛИНДРА

Тарлаковский Д.В., Щербаков В.А.

(Москва)

В качестве модели сплошной среды рассматривается однородный изотропный проводник в виде толстостенного цилиндра с внешним и внутренним ради-

усами r_0 и r_1 , соответственно. Используется цилиндрическая система координат $r\theta z$ с центром O на оси цилиндра. Полагается, что движение плоское и симметрично относительно оси.

Процесс деформирования описывается связанной системой уравнений электромагнитоупругости, которая включает в себя уравнения Максвелла, линеаризованный обобщенный закон Ома и уравнения движения с правой частью в виде силы Лоренца. Эта система сводится к одному гиперболическому уравнению относительно радиального перемещения u_r . Кроме того, учитывается влияние плотностей тока и поверхностных зарядов, а также электрических и магнитных полей (с векторами напряженностей \mathbf{E} и \mathbf{H}), поведения которых описываются линеаризованным обобщенным законом Ома и уравнениями Максвелла. Все параметры и соотношения приводятся к безразмерному виду.

Начальные условия полагаются нулевыми, а на границах толстостенного цилиндра заданы параметры радиальные компоненты напряженности электрического поля

$$E_r|_{r=r_0} = e_0(\tau), \quad E_r|_{r=r_1} = e_1(\tau),$$

а также напряжения или перемещения

$$\sigma_{rr}|_{r=r_0} = P_0(\tau), \quad \sigma_{rr}|_{r=r_1} = P_1(\tau) \quad (u_r|_{r=r_0} = V_0(\tau), \quad u_r|_{r=r_1} = V_1(\tau)),$$

где τ - время.

К полученной начально-краевым задачам применяется преобразование Лапласа по времени. Затем изображения раскладываются в степенные ряды по малому параметру, характеризующему связь электромагнитного и механического полей. Получены явные формулы для изображений коэффициентов разложений компонент напряженно-деформированного состояния и электромагнитного поля.

Для перехода в пространство оригиналов используется асимптотическое представление решения в окрестности начального момента времени.

Приводятся примеры расчетов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта 15-08-00788) и гранта Президента РФ НШ-2029.2014.8.

О ВЛИЯНИИ РАДИАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СЛОЕВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В МНОГОСЛОЙНОМ УПРУГОМ ЦИЛИНДРЕ

Токова Л.П., Ясинский А.В.

(Львов)

Исследование влияния на напряженное состояние многослойных цилиндрических тел физических и геометрических свойств их составляющих лежит в основе улучшения эксплуатационных характеристик таких элементов конструкций [1], расчета возникающих в них остаточных напряжений [2] и других комплексных исследований [3]. Подавляющее большинство методов исследования термоупругого поведения многослойных тел, в частности цилиндров, основаны на двух основных подходах. Один из данных подходов, называемый методом сопряжения [1], заключается в формулировке задач теории упругости и термоупругости для каждого слоя с применением дальнейшего «сшивания» решений на поверхностях сопряжения слоев при использовании заданных условий контакта. При использовании второго подхода, многослойное тело рассматривают как неоднородное с кусочно-изменяемой зависимостью свойств материала от координат, на основании чего формулируют неклассические задачи термомеханики для тела, как единого целого, с применением методов теории обобщенных функций [4]. Заметим, что в случае учета неоднородности слоев, реализация обоих подходов требует применения эффективной методики решения прямых задач теории упругости и термоупругости для произвольной зависимости свойств слоев от координат.

Одним из эффективных подходов к решению задач теории упругости и термоупругости для неоднородных тел является метод, предложенный и разработанный профессором В. М. Вигаком (г. Львов) и его учениками [5, 6]. Этот подход заключается в применении метода непосредственного интегрирования уравнений равновесия и сведения на этой основе уравнений сплошности к решению интегральных уравнений Вольтерры второго рода с сопутствующими интегральными условиями. В предложенной работе указанный подход применен к построению решения одномерной задачи упругости и термоупругости для сплошного многослойного цилиндра, упругие свойства слоев которого, находящиеся в идеальном термомеханическом контакте, произвольно зависят от радиальной координаты. С использованием метода обобщенных функций [4] задача сведена к интегральному уравнению Вольтерры второго рода, решение которого построено при помощи резольвентного ядра. На этой основе получены компактные формулы расчета напряжений, удобные для практического применения к цилиндрическим телам с любым количеством слоев и произвольной зависимости их свойств от радиальной координаты. Рассмотрены типичные случаи ради-

альной неоднородности материалов слоев и проанализировано ее влияние на распределение температурных напряжений в цилиндре, в частности – сочетания упругих свойств (разрывности, негладкости и гладкости) на поверхностях контакта.

Работа выполнена при финансовой поддержке совместного гранта НАН Украины и РФФИ (проект 0114U005082).

Литература

1. Ke L.-L., Wang Y.-S. A linear multi-layer model and its applications in fracture and contact mechanics of elastic functionally graded materials // *Functionally graded materials* / Ed. N.J. Reynolds. – New York: Nova Science Pub., 2012. – P. 1 – 92.
2. Игнатков Д.А. Остаточные напряжения в неоднородных деталях. – Кишинев: Штиинца, 1992. – 302 с.
3. Кушнір Р.М., Попович В.С., Ясінський А.В. Оптимізація та ідентифікація в термомеханіці неоднорідних тіл // *Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл* / Під заг. ред. Я. Й. Бурака, Р. М. Кушніра. – Львів: СПОЛОМ, 2011. – Т. 5. – 256 с.
4. Подстригач Я.С., Ломакин В.А., Коляно Ю.М. Термоупругость тел неоднородной структуры. – М.: Наука, 1984. – 378 с.
5. Вігак В.М., Калиняк Б.М. Зведення одновимірних задач пружності та термопружності для неоднорідних та термочутливих тіл до інтегральних рівнянь другого роду // *Доп. НАН України*. – 1998. – № 11. – С. 60–67.
6. Tokovyy Y., Ma C.-C. Steady-state heat transfer and thermo-elastic analysis of inhomogeneous semi-infinite solids // *Heat Conduction – Basic Research* / Ed. V.S. Vikhrenko. – Rijeka: InTech, 2011. – P. 249-268.

ПРИКЛАДНОЕ ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Третьякова О. Н., Шевченко Г.Ю.

(Москва)

Лазерная техника активно развивается, появляются новые надежные и эффективные лазерные источники. Это позволяет реализовывать недостижимые ранее технологические режимы и эффективно внедрять в производство перспективные технологии. Одной из таких технологий является лазерное управляемое термораскалывание (ЛУТ). Данный метод является одним из наиболее эффективных для разделения хрупких неметаллических материалов, а потому активно применяется, например, в такой интенсивно развивающейся области как производстве светодиодов.

Неотъемлемой составной частью лазерных установок является система управления, которая должна учитывать специфику технологии и содержать весь необходимый для работы инструментарий. Авторами работы [1] предложен усовершенствованный метод ЛУТ с применением двух лазерных источников. Для реализации указанного метода под руководством профессора В.С. Кондратенко на НПЦ «Лазеры и аппаратура ТМ» была создана технологическая установка МЛП1-1060/355 для высокоточного разделения пластин из хрупких материалов с применением усовершенствованного метода ЛУТ с применением двух лазерных источников (CO₂ лазера и УФ - лазера) и разработано программное обеспечение АСУ ТП *LaserCNC* на языке программирования C++. Автоматизированная система управления технологическим процессом АСУ ТП позволяет максимально использовать возможности оборудования. Кроме того, разработанное программное обеспечение *LaserCNC* системы управления технологической установкой дает возможность сокращать издержки по времени на подготовку оборудования. Установка и программное обеспечение были успешно испытаны и показали свою эффективность в целом ряде задач, в том числе при разделении сапфировых пластин.

Следует отметить, что разработанное прикладное программное обеспечение АСУ ТП *LaserCNC* имеет блочную структуру и обладает достаточной универсальностью, что позволяет использовать его не только для конкретной новой установки МЛП1-1060/355 [2], но и для установок, имеющих различные кинематические системы [3] и использующих различное технологическое оборудование для резки и термообработки материалов с различными физическими свойствами [4].

Литература

1. Кондратенко В.С. Наумов А.С. Способ резки пластин из хрупких материалов // Патент РФ № 2404931 по заявке № 2009132338/08 от 28.08.2009. Оpubл. 27.11.2010. Бюл. 33.
2. Кондратенко В.С., Третьякова О.Н., Наумов А.С., Шевченко Г.Ю., Зобов А.К. Новые методы и средства управления промышленным оборудованием на базе технологии лазерного управляемого термораскалывания // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014, № 6, С. 43-46.
3. Кондратенко В.С., Комов В.Г., Миленский М.Н., Третьякова О.Н., Шевченко Г.Ю. Разработка прикладного программного обеспечения для создания лазерного технологического оборудования с вспомогательными кинематическими осями // Приборы, 2013, № 5, С. 26-34.
4. Третьякова О.Н., Шевченко Г.Ю. Создание управляющих программ для автоматизации процессов лазерного управляемого термораскалывания полупроводниковых и диэлектрических материалов // Вестник МАИ, 2011, т.18, №6, С.53-67.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ В УСЛОВИЯХ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРЕВА

Формалев В.Ф., Кузнецова Е.Л., Пигачкова Е.А.

(Москва)

В условиях аэрогазодинамического нагрева гиперзвуковых летательных аппаратов (ЛА) тепловая защита, изготовленная из композиционных материалов (КМ) таких как стеклопластики, асбопластики, углерод-углеродные пластики и т.п. подвергаются фазовым превращениям (пиролизу) связующих с образованием пиролизных газов и пористого коксового остатка, причем пиролизные газы фильтруются через пористый остаток и вдуваются в высокотемпературный пограничный слой. Возникает сложный теплообмен внутри КМ, причем каждый вид теплообмена поглощает тепловую энергию, а именно: эндотермические химические реакции в зоне разложения связующего, конвективный теплообмен при фильтрации газов, охлаждения и увеличения толщины газодинамического пограничного слоя, поглощение теплоты теплоемкостью.

Возникает комплексная проблема, описываемая нелинейными соотношениями. При частичной линеаризации получено аналитическое решение всей комплексной проблемы теплопереноса с учетом фильтрации, подвижной зоны пиролиза, распределения плотности КМ в зоне пиролиза с определением в ней давления торможения пиролизных газов, создающего значительный перепад давления между зоной разложения связующего КМ и давлением газодинамического потока на наружной границе. Превысив предел прочности пористого остатка, давление в зоне пиролиза может разорвать пористый коксовый остаток. В этом случае изделие погибает.

Разработан и включен в математическую модель новый экспоненциальный закон разложения связующих КМ, основанный на использовании температур и плотностей начала и окончания разложения связующих КМ. Полученные результаты моделирования показывают возможность использования математической модели при решении задач о тепловой защите гиперзвуковых ЛА.

О ПОДБОРЕ ПАРАМЕТРОВ ЧИСЛЕННЫХ СХЕМ МКЭ РЕШЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

Чекмарев Д.Т., Садовский В.В.

(Нижний Новгород)

В [1,2] предложен новый способ построения численных схем МКЭ решения двумерных и трехмерных задач механики сплошных сред. Метод основан на проектировании ажурных схем [3] линейных конечных элементов большей размерности соответственно на двумерную или трехмерную КЭ сетку. На примере линейной задачи теории упругости рассмотрен процесс построения 4-узлового двумерного и 8-узлового трехмерного конечных элементов. Полученные конечные элементы близки к известным полилинейным элементам и превосходят их по эффективности. Схемы содержат параметры, позволяющие регулировать сходимость численных решений.

Численная схема решения плоской задачи теории упругости получается путем проектирования трехмерной ажурной схемы на плоскость x_1Ox_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 сходимость численных решений. Более подробно способ построения и свойства полученного параметрического семейства схем описаны в [1].

Аналогично (см. [2]) строится 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. 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.

Похожие схемы МКЭ с регулируемым учетом моментных усилий в элементах рассмотрена в [4].

Исследуется проблема подбора параметров данных численных схем. Показано, что данные параметры являются значимыми при расчете тонкостенных конструкций при небольшом числе элементов по толщине пластины или оболочке. На тестовой задаче о колебаниях цилиндрической панели приводится пример подбора параметров двумерной и трехмерной схем.

Для решения проблемы оптимального выбора параметров предлагается использовать нейросетевые технологии [5]. Метод настройки схемы МКЭ с применением нейронных сетей описан в [6].

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

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 14-01-00660 а).

Литература

1. 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.
2. Чекмарев Д.Т., Об одном способе построения двумерных 4-узловых и трехмерных 8-узловых конечных элементов для решения задач теории упругости // Учен. зап. Казан. Ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. 2013.- Т. 155, Кн. 3.- С. 150-158
3. 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.
4. Баженов В.Г., Кибец А.И., Тулинцев О.В. Применение моментной схемы МКЭ для анализа нелинейных трехмерных задач динамики массивных и оболочечных элементов конструкций // Прикладные проблемы прочности и пла-

стичности. Методы решения. Нижний Новгород: изд-во Нижегород. ун-та, 1991. Вып. 47. С. 46-53.

5. Васильев А.Н., Тархов Д.А. Нейросетевое моделирование. Принципы. Алгоритмы. Приложения. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 528 с.

6. Чекмарев Д.Т. Применение нейросетевого моделирования к построению эффективных численных схем МКЭ // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2014, № 2. С. 41-47

О ЗАДАЧАХ УСТОЙЧИВОСТИ УПРУГИХ ОБОЛОЧЕК ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ

Шклярчук Ф.Н.

(Москва)

Обсуждаются различные подходы и использование различных соотношений для деформаций при решении задач устойчивости упругих систем [1 – 4].

Рассматривается тонкая упругая оболочка вращения, полностью или частично погруженная в тяжелую жидкость. Обозначения: s , θ – дуга меридиана ($0 \leq s \leq l$) и угловая координата параллели ($0 \leq \theta \leq 2\pi$); $R(s)$ – радиус поперечного сечения оболочки; $R_s(s)$ – радиус кривизны меридиана; $R_\theta(s) = R / \sin \phi$, $\sin \phi = dx / ds$; x – ось оболочки, параллельная ускорению поля силы тяжести g . Под действием внешнего гидростатического давления $p(s) = p_0 - \rho g x$ оболочка находится в невозмущенном осесимметричном напряженно-деформированном состоянии с усилиями в срединной поверхности $N_s^0(s)$, $N_\theta^0(s)$. Для анализа устойчивости оболочки в возмущенном состоянии с малыми дополнительными перемещениями $u(s, \theta)$, $v(s, \theta)$, $w(s, \theta)$ будем использовать принцип возможных перемещений [1]

$$\delta\Pi^{(1)} + \delta\Pi^{(2)} = \delta A^{(3)},$$

где

$$\begin{aligned} \delta\Pi^{(1)} &= \frac{1}{2} \iint_S \left\{ B \left[(\varepsilon_s + \varepsilon_\theta)^2 - 2(1-\mu) \left(\varepsilon_s \varepsilon_\theta - \frac{1}{4} \gamma_{s\theta}^2 \right) \right] + \right. \\ &\quad \left. + D \left[(\kappa_s + \kappa_\theta)^2 - 2(1-\mu) (\kappa_s \kappa_\theta - \kappa_{s\theta}^2) \right] \right\} dS; \\ \delta\Pi^{(2)} &= \frac{1}{2} \iint_S \left[N_s^0 (\gamma_s^2 + \vartheta_s^2) + N_\theta^0 (\gamma_\theta^2 + \vartheta_\theta^2) \right] dS; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_s &= \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{w}{R_s}, \varepsilon_\theta = \frac{\partial v}{R\partial\theta} + \frac{\cos\phi}{R}u + \frac{\sin\phi}{R}w, \gamma_{s\theta} = \gamma_s + \gamma_\theta, \\ \kappa_s &= \frac{\partial\vartheta_s}{\partial s}, \kappa_\theta = \frac{\partial\vartheta_\theta}{R\partial\theta} + \frac{\cos\phi}{R}\vartheta_s, \kappa_{s\theta} = \frac{\partial\vartheta_s}{R\partial\theta} - \frac{\cos\phi}{R}\vartheta_\theta + \frac{\sin\phi}{R}\frac{\partial v}{\partial s}, \\ \gamma_s &= \frac{\partial v}{\partial s}, \gamma_\theta = \frac{\partial u}{R\partial\theta} - \frac{\cos\phi}{R}v, \vartheta_s = \frac{u}{R_s} - \frac{\partial w}{\partial s}, \vartheta_\theta = \frac{\sin\phi}{R}v - \frac{\partial w}{R\partial\theta}, \\ B &= \frac{Eh}{1-\mu^2}, D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}, \iint_S (\dots) dS = \int_0^l \int_0^{2\pi} (\dots) R d\theta ds.\end{aligned}$$

Вариация работы внешнего гидростатического давления в возмущенном состоянии $\tilde{p} = p - \rho g(u \sin\phi - w \cos\phi)$ с учетом углов поворота нормали и изменения площади деформированной поверхности оболочки ($d\tilde{S} = (1 + \varepsilon_s + \varepsilon_\theta) dS$) определяется как

$$\begin{aligned}\delta A_p &= - \iint_S \tilde{p} (\delta w + \vartheta_s \delta u + \vartheta_\theta \delta v) (1 + \varepsilon_s + \varepsilon_\theta) dS \approx \\ &\approx \iint_S (p_s \delta u + p_\theta \delta v + p_v \delta w) dS - \iint_S p \delta w dS;\end{aligned}$$

$$p_s = -p\vartheta_s, p_\theta = -p\vartheta_\theta, p_v = -p(\varepsilon_s + \varepsilon_\theta) + \rho g(u \sin\phi - w \cos\phi).$$

После преобразования [5] получаем:

$$\delta A_p^{(3)} = \iint_S (p_s \delta u + p_\theta \delta v + p_v \delta w) dS = \int_0^{2\pi} [pRw\delta u]_{s=0}^{s=l} d\theta - \delta\Pi^{(3)};$$

$$\begin{aligned}\Pi^{(3)} &= \frac{1}{2} \iint_S \left\{ p \left[\frac{u^2}{R_s} + \frac{w^2}{R_\theta} + \left(\frac{1}{R_s} + \frac{1}{R_\theta} \right) w^2 + 2 \frac{\partial v}{R\partial\theta} w \right] + \right. \\ &\quad \left. + \rho g w^2 \cos\phi + \frac{2}{R} \frac{\partial}{\partial s} (pRu) w \right\} dS.\end{aligned}$$

Если оболочка замкнута ($R(0) = R(l) = 0$) или если она имеет неподвижные крышки при $s=0$ и $s=l$, соединенные с оболочкой без зазора ($w(0) = w(l) = 0$), то гидростатическое давление для такой оболочки в целом будет консервативной нагрузкой ($\delta A_p^{(3)} = -\delta\Pi^{(3)}$), [2]. Тогда оболочка под действием гидростатического давления будет устойчивой, если ее полная потенциальная энергия в возмущенном состоянии при любых возможных перемещениях будет положительно определенной, т.е. при $\Pi[u, v, w] = \Pi^{(1)} + \Pi^{(2)} + \Pi^{(3)} > 0$.

В качестве примера исследуем возможность потери устойчивости длинной цилиндрической оболочки ($R_s \rightarrow \infty$, $R_0 = R = const$, $\phi = \pi/2$, $s \rightarrow x$) под действием постоянного внешнего давления p_0 по «балочной» форме

$$u = u_1(x) \cos \theta, v = v_1(x) \sin \theta, w = w_1(x) \cos \theta.$$

Для цилиндрической оболочки с нерастяжимым контуром поперечного сечения ($\epsilon_0 = 0 \rightarrow v_1 = -w_1$) как балки Тимошенко со свободными торцами, закрытыми плоскими недеформируемыми крышками:

$$N_x^0 = -p_0 R / 2, N_0^0 = -p_0 R;$$

$$\Pi^{(1)} = \frac{1}{2} \pi R \int_0^l \left\{ B \left[u_1'^2 + \frac{1}{2} (1-\mu) (w_1 + u_1 / R)^2 \right] + D w_1''^2 \right\} dx,$$

$$\Pi^{(2)} = -\frac{1}{2} \pi R^2 p_0 \int_0^l (w_1'^2 + u_1^2 / R^2) dx, \Pi^{(3)} = \pi R p_0 \int_0^l u_1' w_1 dx.$$

Вариация работы всестороннего гидростатического давления, действующего на боковую поверхность оболочки и на крышки при $x=0$ и $x=l$, которые, соответственно, совершают повороты и поперечные перемещения $u_1(0)/R$, $\delta w_1(0)$ и $u_1(l)/R$, $\delta w_1(l)$, записывается в виде

$$\delta \hat{A}^{(3)} = -\delta \Pi^{(3)} + \pi R p_0 [w_1 \delta u_1]_{x=0}^{x=l} - \pi R p_0 [u_1 \delta w_1]_{x=0}^{x=l} = -\delta \hat{\Pi}^{(3)};$$

$$\hat{\Pi}^{(3)} = -\pi R p_0 \int_0^l u_1 w_1' dx.$$

Полная потенциальная энергия оболочки с крышками под действием всестороннего гидростатического давления в возмущенном состоянии:

$$\Pi = \Pi^{(1)} + \Pi^{(2)} + \hat{\Pi}^{(3)} = \frac{1}{2} \pi R \int_0^l \left[B u'^2 + C (w_1' + u_1 / R)^2 + D w''^2 \right] dx,$$

где $C = Gh - p_0 R$, $Gh = B(1-\mu)/2$.

При $C > 0$ оболочка (балка) устойчива при любых формах изгиба с поперечным сдвигом ($\Pi > 0$). При $C \leq 0$ может произойти потеря устойчивости свободной балки по форме чистого сдвига ($u_1 \equiv 0$, $w_1' = const$). Однако условие $C = 0$ практически для реальных материалов недостижимо из-за появления больших пластических деформаций или потери устойчивости по оболочечным формам с $n \geq 2$ волнами в окружном направлении.

Литература

1. Новожилов В.В. Основы нелинейной теории устойчивости. – Л. – М.: Гостехиздат, 1948. – 211 с.

2. Болотин В.В. Неконсервативные задачи теории упругой устойчивости. – М.: Физматгиз, 1961. – 339 с.

3. Шклярчук Ф.Н. К расчету деформированного состояния и устойчивости геометрические нелинейных упругих систем // Изв. РАН. МТТ. – 1998. – №1. – С. 140-146.

4. Паймушин В.Н., Шалашилин В.Н. Непротиворечивый вариант теории деформаций сплошных сред в квадратичном приближении // Докл. РАН. – 2004. – Т. 396. – № 4. – С. 492-495.

5. Григолюк Э.И., Шклярчук Ф.Н. Уравнения возмущенного движения тела с тонкостенной упругой оболочкой, частично заполненной жидкостью // ПММ. – 1970. – Т. 34. – Вып. 3. – С. 401-411.

ПОДХОДЫ И ЧАСТНЫЕ ВОПРОСЫ АНАЛИЗА ПОВЕДЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ТИПА РАССЛОЕНИЙ

Щугорев В.Н., Касьянов К.Г.

(Москва)

Наличие дефектов типа расслоений присуще композитным материалам. Сама структура конструкционных элементов из слоистых и волокнистых композитов подразумевает низкую межслойную прочность при соответствующих нагрузках: в первую очередь сдвиговых и сжимающих.

Для конструкций и деталей из композитных материалов, содержащих расслоения и отслоения внешнего слоя, возможны различные критерии потери несущей способности, такие как:

- недопустимые максимальные перемещения (стрелы прогиба) отслоившегося участка;
- превышение фактическими (расчетными или определенными экспериментально) значениями эквивалентных напряжений в материале допускаемых значений.

Стойкость таких элементов к внешним воздействиям определяется следующими факторами:

- геометрическими параметрами образца;
- межслойной прочностью материала, обычно характеризующейся параметром (группой параметров), называемым работой разрушения;
- прочими макропараметрами материала (модули упругости, коэффициенты Пуассона и т.д).

Среди внешних воздействий, при которых рассмотрение поведения расслоений становится особенно актуальным, стоит отметить:

- ударное воздействие;
- циклическое нагружение.

Наглядно классификация рассматриваемых объектов может быть представлена в виде схемы

При этом стоит различать две принципиально различных группы дефектов типа расслоений: отслоения внешнего слоя и расслоения “в глубине” материала.

Кроме того, решающее значение может иметь тип нагружения: силовое или деформационное.

Целью анализа дефектов типа расслоений является проверка критериев потери несущей способности элемента с учетом следующих особенностей:

- дефект может развиваться во времени: соответственно время должно быть включено как параметр в соотношения, описывающие процесс;
- неограниченный рост дефекта не обязательно означает потерю несущей способности;
- рост дефекта может останавливаться.

Основные инструменты анализа: аналитический подход, предложенный В.В. Болотиным и метод конечных элементов. Основные параметры, соотношение которых определяет состояние системы “тело с расслоением-нагрузка” являются по природе обобщенными силами, т.е. производными от потенциальной энергии. На их вычислении и сравнении основан аналитический подход. Как правило, эти силы называются “сила, продвигающая дефект” и “сила сопротивления росту”.

МКЭ позволяет относительно просто, для систем с множественными геометрическими особенностями (в том числе, трещинами) вычислить данные параметры.

Анализ начинается с построения алгоритма оценки в каждом из случаев классификации. На данный момент для случаев, приведенных на рисунке 1, такие алгоритмы уже построены. В качестве отдельных блоков в данные алгоритмы включены: оценка обобщенных сил по МКЭ, пошаговые циклы для случаев циклического нагружения.

Успешно решен ряд задач, входящих в предложенные алгоритмы: потеря устойчивости и последующий рост отслоения внешнего слоя, рост дефекта в балочном образце при падении груза. Верификация результатов проводилась сравнением результатов, полученных с применением МКЭ и результатов полностью аналитического решения.

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 механика.» Избранные тезисы докладов. (Нижн. Новг. 24-30 авгу-

ста 2011). Нижний новгород. Издательство Нижегородского госуниверситета 2011. С.218-219

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА ГРУБЫХ ПОСАДОК САМОЛЁТА

Щугорев В.Н., Касьянов К.Г.

(Москва)

Распространённая на сегодняшний день методика оценки возможных повреждений и принятия решения о дальнейшей судьбе самолёта, после совершения им грубой посадки, фактически основывается на одном параметре: максимальной вертикальной перегрузке самолёта во время посадки. Перегрузка измеряется штатным прибором инерционного типа АДИС-2-3 во время каждой посадки с определённой частотой опросности. Однако, до сих пор не было проведено детальных исследований надёжности показаний прибора в условиях посадки самолёта. Ещё одной существенной проблемой является вопрос о том, на сколько точно можно судить о нагруженности каждого критически важного элемента конструкции самолёта по показаниям одного единственного средства измерения. Недостаточное знание ответов на эти вопросы увеличивает вероятность допустить эксплуатацию воздушного судна с опасными повреждениями.

В настоящей работе проведено исследование вышеупомянутых проблем на примере среднемагистрального пассажирского самолёта Ту-204СМ. Исследование включает численное моделирование динамики посадки упруго-массовой модели планера самолёта с шасси [1]. В расчёте используется модель датчика АДИС-2-3, чья АЧХ соответствует параметрам реального прибора. Решение уравнений движения с различными начальными условиями проводилось в системе MSC.Adams.

Моделирование всех существенных нелинейных процессов амортизационной системы, а также пространственного взаимодействия самолёта с ВПП позволило детально проанализировать работу датчика ускорения и оценить точность его показаний. Выявлены некоторые случаи грубых посадок, детектирование которых может быть ненадёжно при использовании критерия, основанного лишь на величине максимальной перегрузки.

Литература

1. Рыбин А.В. Исследование динамики посадки пассажирского самолёта // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2014, № 74, эл. адрес: <http://mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49196>

ДИНАМИКА УПРУГИХ ОБОЛОЧЕК С ТОЧЕЧНЫМИ СВЯЗЯМИ И СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ МАССАМИ

Яганов В.М.

(Москва)

Предсказать динамическое поведение тонкостенной конструкции, значит заранее рассчитать ее спектр резонансных частот. Ставится задача по определению собственных частот и форм колебаний упругой изотропной цилиндрической оболочки, находящейся под внешним (или внутренним) стационарным давлением P , опертой боковой поверхностью упруго в L и жестко в точках, а также несущей сосредоточенных масс. Жесткие точечные опоры шарнирного или защемленного типа. Расположение масс и опор произвольное. Граничные условия на торцах однородные.

Задача решается в вариационной постановке. Перемещения оболочки подчиняются закону:

$$\bar{U}^0(x_1, x_2, t) = \bar{U}(x_1, x_2) \cdot e^{i\omega t} \quad (1)$$

где x_1, x_2 - координатные линии на срединной поверхности, $\bar{U}(x_1, x_2)$ - вектор собственных форм, компоненты которого (u, v, w) направлены соответственно по касательной к образующей, по касательной к направляющей и по нормали к поверхности оболочки, ω - собственная частота.

Согласно принципу виртуальных перемещений, приравняем нулю сумму всех активных сил, включая силы инерции на возможных перемещениях:

$$\delta A_\sigma + \delta A_1 + \delta A_p + \delta A_m = 0$$

где $\delta A_\sigma, \delta A_1, \delta A_p, \delta A_m$ - виртуальные работы соответственно внутренних сил оболочки, упругих опор, давления и сил инерции с учетом присоединенных масс.

Подставляя в последнее уравнение физические и геометрические соотношения, а также (1), получим в символьном виде вариационное уравнение

$$\delta(G(\bar{U}(x_1, x_2), \omega^2)) = 0 \quad (2)$$

где $\bar{U}(x_1, x_2)$ должны удовлетворять краевым условиям, а также

$$\bar{U}(x_1^i, x_2^i) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, S) \quad (3)$$

где x_1^i, x_2^i - координаты $i^{\text{й}}$ жесткой опоры.

Если опора не шарнирного типа, т.е. имеются защемления по одному или двух направлениях, то к условию (3) добавятся аналогичные ограничения на первые производные нормальной компоненты вектора $\bar{U}(x_1, x_2)$ по этим направлениям.

Таким образом, задача о собственных колебаниях оболочки сводится к проблеме минимизации полной энергии механической системы (2) по полям перемещений при дополнительных кинематических ограничениях в жестких точечных опорах типа (3).

Условный экстремум ищется методом неопределенных множителей Лагранжа с одновременным использованием метода Рунге. Искомые перемещения оболочки представляются в виде конечных рядов по известным балочным и тригонометрическим функциям, являющимися собственными формами для оболочки свободной от связей и сосредоточенных масс.

Способ учета жестких опор ставит задачу о собственных значениях в невырожденной постановке, т.к. размерность системы линейных алгебраических

уравнений превышает ранг ее матрицы. К невырожденной постановке задача приводится путем исключения линейно зависимых обобщенных координат системы с помощью специальных невырожденных преобразований одновременно матриц жесткости и масс.

Контрольные расчеты показали удовлетворительную сходимость метода, достаточную точность получаемых результатов. Предлагаемый подход не требует предварительного определения реакций опор и частот свободной оболочки [1], а также перестройки численного алгоритма при изменении координат точечных связей и их количества, что является важным на стадии проектирования. Кроме того, с помощью жестких опор и жестких защемлений можно усложнять краевые условия на торцах оболочки, что представляет практический интерес при расчете реальных конструкций.

Литература

1. Малютин И.С. «Устойчивость и колебания цилиндрической оболочки с точечным закреплением поверхности», Изв. АН СССР, Механика твердого тела, 1976 г., № 2.

Именной указатель

- Айгубова А.Ч.*, 4
Айзикович С.М., 120
Акимов Е.В., 131
Аменицкий А.В., 94
Андреев П.С., 6
Антуфьев Б.А., 7
Астапов А.Н., 7
Бадриев И.Б., 10
Баженов В.Г., 12, 14
Балафендиева И.С., 16
Белашова И.С., 17, 196
Белов А.А., 94
Белов Г.В., 19, 20, 21
Белосточный Г.Н., 21
Березной Д.В., 24, 26
Березовский А.В., 153
Блохин М.А., 49
Бобылёв А.А., 17
Богословский С.Е., 28
Бочкарёв С.А., 30
Булавкина Т.А., 32
Бутенко А.В., 97
Варавин Д.А., 12
Васильченко А.Г., 34, 37, 39
Велданов В.А., 41, 43, 189
Вестяк А.В., 45
Воробьев С.А., 47
Габсаликова Н.Ф., 24
Габсаттаров Р.М., 78
Гаврюшин С.С., 49
Гайнуллина Л.Р., 26
Гелли Д.В., 189
Гетманов А.Г., 50
Гимадиев Р.Ш., 54
Гимадиева Т.З., 54
Гнездилов В.А., 52
Горбатенко К.И., 58
Горшков А.А., 56, 57, 58, 131
Горшков-Кантакузен В.А., 59
Горячева И.Г., 61
Грибков В.А., 63
Григорьев В.Г., 52
Гришанина Т.В., 64
Гусаров А.П., 19, 20, 21
Гюнал И., 65, 159
Давыдов Р.Л., 68
Давыдов С.А., 67
Данг Куанг Занг, 89
Данилин А.Н., 71, 72
Даурских А.Ю., 43
Денисов С. Л., 135
Джаббаров О.Р., 74
Дибирова К.С., 75
Дмитриев В.Г., 153
Евтух Е.С., 77
Егоров С.В., 78, 79
Ерофеев В.И., 80
Ершова А.Ю., 81
Жаворонок С.И., 28
Жигилий В.С., 82
Жигилий С.В., 82
Жук В.М., 168
Задорина Е.Н., 4, 75
Зайкина Ж.В., 84
Зайцев В.Н., 86
Земсков А.В., 67, 90
Зиле А.З., 91
Ивкин Е.И., 93
Игумнов Л.А., 94, 96
Ипатов А.А., 94
Исаев А.Л., 41
Камилов М.Р., 24
Касьянов К.Г., 211, 213
Каюмов Р.А., 97, 99
Кибец А.И., 12
Кирищина В.В., 173
Коваленко П.В., 173
Козинер Д.Ю., 93
Козлов В.С., 43
Козлов Г.В., 75
Колосов Г.И., 101
Коновалов А.В., 7
Коноплев Ю.Г., 6, 102
Копанева Д.С., 103
Коровайцева Е.А., 56
Королевич В.В., 104, 105, 107
Костриченко А.Б., 86
Котов В.Л., 14
Кочетков А.В., 108
Крупенин А.М., 110
Крылов С.В., 108
Кудинов А.Н., 111
Кузнецов Е.Б., 113
Кузнецова Е.Л., 205

- Кузнецова М. Г., 116
Кузьмин С. Д., 196
Курдюмов Н. Н., 28, 71, 72
Курников И. С., 52
Кутуев С. А., 118
Кухтенкова А. А., 131
Кушнир Р. М., 120
Лалабеков В. И., 121
Ларионова Н. В., 123, 125
Лекомцев С. В., 30
Леоненко Д. В., 127, 128
Леонов С. С., 113
Лесневский Л. Н., 130
Линник Е. Ю., 14
Литвинчук С. Ю., 96
Ломовской В. А., 56, 57, 58, 131
Луковкин Р. О., 131
Лустин А. Д., 79
Ляховецкий М. А., 130
Магомедов Г. М., 75
Мазуренко А. В., 102
Мазурина С. А., 57
Макарин М. А., 186
Макаров М. В., 10
Максимов М. А., 43
Марков В. А., 19, 20, 21, 132, 189
Марков И. П., 96
Мартиросов М. И., 50, 81, 110, 133
Масанский О. А., 123, 125
Медведев Д. Г., 104, 105
Медведский А. Л., 135
Меньшиков А. А., 52
Мищенко Г. В., 136
Мишин Ю. Н., 136
Морозов А. Г., 139
Мотова Е. А., 140
Музеев М. Р., 142
Мурзаханов Г. Х., 144, 225
Мухамедова И. З., 99
Мыльцина О. А., 21
Неклюдова Г. А., 32, 77, 172
Нестеров В. А., 145, 148
Нетребко А. В., 149
Никитина Н. Е., 140, 150
Николаева А. С., 152
Овчинников А. Ф., 19, 20, 21
Огрызков С. Г., 153
Павлов И. С., 80, 155
Паймушин В. Н., 10, 54, 65, 157, 159
Парафесь С. Г., 162
Перельман В. Е., 164
Перфильев А. Ю., 41
Петров А. Н., 94
Пигачкова Е. А., 205
Позорелов М. В., 37
Поддубный А. А., 166
Подкопаева Т. Б., 152
Помельникова А. С., 168
Попов Ю. В., 132
Пусев В. И., 19, 20, 21, 132, 189
Пушкарев А. Г., 139
Пиеничников С. Г., 149
Пыхалов А. А., 169
Рабинский Л. Н., 50
Радин В. П., 84
Радченко С. И., 172
Рогов Д. А., 173
Романов В. И., 12
Рыбин А. В., 175
Рябов А. А., 12
Савицкий Д. М., 176, 178
Садовский В. В., 206
Самедов А. С., 181
Самогин Ю. Н., 136, 183
Самсонов Ю. П., 184
Самсонович С. Л., 121, 186
Саченков О. А., 6, 78, 79, 102
Свечникова Л. А., 123, 125
Секаева Л. Р., 16
Селиванов В. В., 19, 20, 21, 189
Сотский М. Ю., 20, 41, 43, 188, 189
Старовойтов Э. И., 178
Старовойтова Е. Э., 190
Султанов Л. У., 68, 192
Суханов А. С., 148
Тарадай Д. В., 91
Тарасов С. С., 71, 72
Тарасова А. А., 14
Тарасова А. Н., 194
Тарасова Т. В., 196
Тарлаковский Д. В., 45, 67, 74, 89, 90, 118, 198, 200
Токмин А. М., 123, 125
Токова Л. П., 202
Токовий Ю. В., 120
Толмачев К. С., 103
Толстошеев В. А., 125
Третьякова О. Н., 203
Туйсина Е. Б., 99
Туркин И. К., 162
Турьгина И. А., 108
Усубалиев Т. Б., 181

Фахрутдинов Л.Р., 192
Федоров С.В., 43
Федорова И.А., 26
Фетисов Г.П., 103
Фирсов В.А., 65, 159
Формалев В.Ф., 205
Фунг Ван Бинь, 49
Хасанов Р.Ф., 6
Хаширова С.И., 4
Хохлов А.О., 63
Хроматов В.Е., 144, 225
Цой В.Э., 136
Чекмарев Д.Т., 206
Чусова Е.В., 111
Шакирзянов Ф.Р., 97
Шевченко Г.Ю., 203
Шимановский А. О., 116

Шишкин В.М., 65, 159
Шклярчук Ф.Н., 64, 208
Шляпина С.А., 41
Шошин М.П., 186
Шукуров А.М., 74, 198
Шуранова Ю.А., 91
Щеглов Г.А., 131
Щербаков В.А., 200
Щугорев А.В., 84
Щугорев В.Н., 144, 175, 211, 213
Яганов В.М., 214
Яковлев Р.В., 39
Якушев Р.С., 142
Яровая А.В., 166
Ясинский А.В., 202
Яхненко М.С., 169

Содержание

Предисловие	3
<i>Айгузова А.Ч., Задорина Е.Н., Магомедов Г.М., Хаширова С.И.</i> Влияние модификаторов на релаксационные свойства нанокompозитов на основе полиамида 6 и органоглин	4
<i>Андреев П.С., Коноплев Ю.Г., Саченков О.А., Хасанов Р.Ф.</i> Оценка компрессии тазобедренного сустава при ротационной остеотомии проксимального участка бедренной кости	6
<i>Антуфьев Б.А., Коновалов А.В.</i> Динамика передней кромки крыла самолета при частичном повреждении теплозащитного слоя.....	7
<i>Астанов А.Н.</i> Совершенствование структуры высокотемпературных защитных покрытий. Постановка задачи.....	7
<i>Бадриев И.Б., Макаров М.В., Паймушин В.Н.</i> Геометрически нелинейные и линеаризованные задачи о смешанных формах потери устойчивости трехслойных пластин при продольно-поперечном изгибе.....	10
<i>Баженов В.Г., Варавин Д.А., Кибец А.И., Рябов А.А., Романов В.И.</i> Конечно-элементный анализ больших формoизменений сферической оболочки при контактном взаимодействии с жесткой облоймой под действием импульса перегрузки.....	12
<i>Баженов В.Г., Котов В.Л., Линник Е.Ю., Тарасова А.А.</i> Исследование оптимальных форм осесимметричных тел, проникающих в грунтовые среды	14
<i>Балафендиева И.С., Секаева Л.Р.</i> Моделирование строительства транспортных сооружений в физически нелинейном грунте.....	16
<i>Белашова И.С., Бобылёв А.А.</i> Плоские и осесимметричные контактные задачи для упругих тел с функционально-градиентными покрытиями.....	17
<i>Белов Г.В., Гусаров А.П., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В.</i> О деформировании блоков внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов.....	19
<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 высокопористых сотовых конструкций из алюминиевых сплавов.....	20
<i>Белов Г.В., Гусаров А.П., Марков В.А., Овчинников А.Ф., Пусев В.И., Селиванов В.В.</i> Особенности конструкций блоков внутреннего оборудования носовых отсеков летательных аппаратов.....	21
<i>Белосточный Г.Н., Мыльцина О.А.</i> Динамика пологой оболочки постоянного кручения в условиях конвективного теплообмена через основные поверхности с окружающей средой при	

быстропеременных по временной координате температурно-силовых воздействиях.....	21
<i>Бережной Д.В., Габсаликова Н.Ф., Камилов М.Р.</i> Применение метода частиц в задачах механики деформируемого твердого тела.....	24
<i>Бережной Д.В., Гайнуллина Л.Р., Федорова И.А.</i> Расчет удельной энергоемкости маховичных накопителей энергии.....	26
<i>Богословский С.Е., Жаворонок С.И., Курдюмов Н.Н.</i> Численное моделирование контакта авиационной пневматической шины с взлетно-посадочной полосой.....	28
<i>Бочкарёв С.А., Лекомцев С.В.</i> Устойчивость некруговых функционально-градиентных оболочек, содержащих жидкость.....	30
<i>Булавкина Т.А., Неклюдова Г.А.</i> Когнитивный опыт учебной деятельности у студентов технических вузов.....	32
<i>Васильченко А.Г.</i> Аппроксимация стропной системы планирующего парашюта упругой средой.....	34
<i>Васильченко А.Г., Погорелов М.В.</i> Проблемы моделирования пространственных колебаний трехкупольной парашютной системы.....	37
<i>Васильченко А.Г., Яковлев Р.В.</i> Проблемы математического моделирования процесса раскрытия планирующего парашюта, зарифованного слайдером.....	39
<i>Велданов В.А., Исаев А.Л., Перфильев А.Ю., Шлятина С.А.</i> Определение констант в законе сопротивления бетона прониканию металлических ударников.....	41
<i>Велданов В.А., Федоров С.В., Даурских А.Ю., Максимов М.А., Сотский М.Ю., Козлов В.С.</i> Высокоскоростное проникание металлических плоских ударников.....	43
<i>Вестяк А.В., Тарлаковский Д.В.</i> Нестационарное осесимметричное электромагнитное поле в движущихся телах со сферическими границами.....	45
<i>Воробьев С.А.</i> Демпфирующая способность круговой цилиндрической сэндвич-оболочки при её свободных и вынужденных колебаниях.....	47
<i>Гаврюшин С.С., Блохин М.А., Фунг Ван Бинь</i> Анализ лесопильного станка с использованием виртуальной параметрической модели.....	49
<i>Гетманов А.Г., Мартыросов М.И., Рабинский Л.Н.</i> Анализ прочностных характеристик полимерных защитных покрытий на металлических элементах машиностроительных конструкций.....	50
<i>Гнездилов В.А., Григорьев В.Г., Курников И.С., Меньшиков А.А.</i> Частотно-модальный метод исследования устойчивости стержневых конструкций при многофакторных нагружениях.....	52

<i>Гимадиев Р.Ш., Гимадиева Т.З., Паймушин В.Н.</i> Математическое моделирование динамики раздува подкрепленной кольцами эластомерной цилиндрической оболочки.....	54
<i>Горшков А.А., Коровайцева Е.А., Ломовской В.А.</i> Дислокационный вклад в фон внутреннего трения	56
<i>Горшков А.А., Ломовской В.А., Мазурина С.А.</i> Влияние молекулярной массы пэ на интенсивность гистерезисных и релаксационных потерь.....	57
<i>Горбатенко К.И., Горшков А.А., Ломовской В.А.</i> Влияние степени кристалличности на области локальной неупругости в поликарбонате.....	58
<i>Горшков-Кантакузен В.А.</i> К вопросу вычисления коэффициента дарси при турбулентном режиме методом регрессионного анализа.....	59
<i>Горячева И.Г.</i> Моделирование фрикционного взаимодействия эластомеров.....	61
<i>Грибков В.А., Хохлов А.О.</i> О повышении эффективности численного решения задач устойчивости периодических движений.....	63
<i>Гришанина Т.В., Шклярчук Ф.Н.</i> Аэродинамика и аэроупругость мембранных крыльев большого удлинения.....	64
<i>Гюнал И., Паймушин В.Н., Фирсов В.А., Шишкин В.М.</i> Теоретико-экспериментальный метод исследования демпфирующих свойств материалов	65
<i>Давыдов С.А., Земсков А.В., Тарлаковский Д.В.</i> Построение интегральных соотношений между граничными условиями в нестационарных задачах механо диффузии.....	67
<i>Давыдов Р.Л., Султанов Л.У.</i> Алгоритм расчета упругопластических деформаций МКЭ	68
<i>Данилин А.Н., Курдюмов Н.Н., Тарасов С.С.</i> О несущей способности спиральных натяжных зажимов	71
<i>Данилин А.Н., Курдюмов Н.Н., Тарасов С.С.</i> Моделирование субколебаний гибких проводов воздушных линий электропередачи.....	72
<i>Джаббаров О.Р., Тарлаковский Д.В., Шукуров А.М.</i> Нестационарное вращение шара в упругом слое.....	74
<i>Дибирова К.С., Задорина Е.Н., Козлов Г.В., Магомедов Г.М.</i> Упругие свойства нанокompозитов на основе аморфно-кристаллических полимерных матриц	75
<i>Евтух Е.С., Неклюдова Г.А.</i> Исследование контактного взаимодействия колеса и рельса при наезде колеса на стык.....	77
<i>Егоров С.В., Габсаттаров Р.М., Саченков О.А.</i> Устойчивость массивной балки подкрепленной пружинами разной жесткости	78
<i>Егоров С.В., Лустин А.Д., Саченков О.А.</i> Оценка влияния точности посадки валов на вибрации цилиндрического редуктора	79

<i>Ерофеев В.И., Павлов И.С.</i> Нелинейные локализованные волны деформации в двумерной зернистой среде.....	80
<i>Ершова А.Ю., Мартиросов М.И.</i> Экспериментально-теоретические исследования по определению механических свойств дисперсно-упрочненных композитов на полиэфирной основе.....	81
<i>Жигилий В.С., Жигилий С.В.</i> Исследование напряженного состояния при формообразовании тонкостенных сферических оболочковых деталей.....	82
<i>Зайкина Ж.В., Радин В.П., Щугорев А.В.</i> Флаттер плоской панели с упругим подкреплением в сверхзвуковом потоке газа.....	84
<i>Зайцев В.Н., Костриченко А.Б.</i> Оценка влияния герметичного слоя на напряженное состояние композитной оболочки.....	86
<i>Данг Куанг Занг, Тарлаковский Д.В.</i> Осесимметричные волны в упруго-пористом полупространстве, находящемся под действием поверхностных силовых возмущений.....	89
<i>Земсков А.В., Тарлаковский Д.В.</i> Нестационарные механо-диффузионные поля в однородном изотропном слое.....	90
<i>Зиле А.З., Тарадай Д.В., Шуранова Ю.А.</i> Совершенствование методов оценки технического состояния турбоагрегатов с использованием расчетно-экспериментальных методик.....	91
<i>Ивкин Е.И., Козинер Д.Ю.</i> Автоматизированный комплекс высокоинтенсивной направленной ультразвуковой очистки элементов гидравлики и сложнофасонных деталей ГТД.....	93
<i>Игумнов Л.А., Петров А.Н., Ипатов А.А., Аменицкий А.В.</i> Численно-аналитическое исследование волновых процессов в пористых средах.....	94
<i>Игумнов Л.А., Белов А.А., Ипатов А.А.</i> Численное решение краевых задач трехмерной динамической теории поровязкоупругости методом граничных элементов.....	94
<i>Игумнов Л.А., Литвинчук С.Ю., Марков И.П.</i> Применение метода граничных элементов для моделирования нестационарной динамики трехмерных однородных электроупругих и анизотропных упругих тел.....	96
<i>Каюмов Р.А., Шакирзянов Ф.Р., Бутенко А.В.</i> Оценка длительной осадки подземного гаража по двум моделям деформирования и их сравнительный анализ.....	97
<i>Каюмов Р.А., Мухамедова И.З., Туйсина Е.Б.</i> Расчет двутавровой балки с трещиной, находящейся под действием неравномерной циклической нагрузки.....	99

- Колосов Г.И.* Прогнозирование неустойчивости равновесных состояний сжатых композитных цилиндрических оболочек к силовым возмущениям 101
- Копоплев Ю.Г., Мазуренко А.В., Саченков О.А.* Численное исследование вывиха вертлужного компонента имплантата при дисплазии вертлужной впадины 102
- Копанева Д.С., Толмачев К.С., Фетисов Г.П.* Выбор схем мобильных средств передвижения специального назначения и технологии их изготовления..... 103
- Королевич В.В., Медведев Д.Г.* Решение осесимметричной термосиловой плоской задачи для вращающегося анизотропного диска переменной толщины методом интегрального уравнения вольтерра 2-го рода..... 104
- Королевич В.В., Медведев Д.Г.* Расчет термосилового изгиба вращающегося анизотропного диска переменной толщины методом интегрального уравнения вольтерра..... 105
- Королевич В.В.* Анализ вынужденных нерезонансных осесимметричных изгибных колебаний вращающегося анизотропного диска переменной толщины методом интегрального уравнения вольтерра 2-го рода 107
- Кочетков А.В., Крылов С.В., Турыгина И.А.* Численное моделирование динамического аэроупругопластического поведения составной цилиндрической оболочки с газопроницаемым слоем при внутреннем взрывном нагружении..... 108
- Крупенин А.М., Мартыросов М.И.* Поведение трехслойного клина с заполнителем сплошной структуры при входе в жидкость..... 110
- Кудинов А.Н., Чусова Е.В.* Процесс потери устойчивости математической модели вязкоупругого разупрочняющегося материала с экспоненциальным ядром ползучести..... 111
- Кузнецов Е.Б., Леонов С.С.* Нейросетевой подход к решению задачи идентификации параметров модели ползучести 113
- Кузнецова М.Г., Шимановский А.О.* Подбор рациональной формы поперечной перфорированной перегородки резервуара автоцистерны ... 116
- Кутуев С.А., Тарлаковский Д.В.* Определение напряженно-деформированного состояния элементов конструкций из композиционного материала при воздействии нестационарной поверхностной нагрузки..... 118
- Кушинир Р.М., Токовий Ю.В., Айзикович С.М.* Взаимно-однозначные соотношения между упругими перемещениями и напряжениями на границе произвольно-неоднородной полосы..... 120

<i>Лалабеков В.И., Самсонович С.Л.</i> Уточнённая математическая модель расчёта объёма рабочей жидкости в газогидравлическом приводе с вытеснительным источником энергии	121
<i>Ларионова Н.В., Масанский О.А., Свечникова Л. А., Токмин А.М.</i> Анализ тепловых процессов в отливках электрошлакового кокильного литья	123
<i>Ларионова Н.В., Масанский О.А., Свечникова Л.А., Токмин А.М., Толстошеев В.А.</i> Влияние технологических режимов на формирование структуры и свойств слоистых материалов, полученных индукционной наплавкой	125
<i>Леоненко Д.В.</i> Уравнения движения трехслойной цилиндрической оболочки в упругой среде	127
<i>Леоненко Д.В.</i> Локальное нагружение трехслойной цилиндрической оболочки в упругой среде винклера	128
<i>Лесневский Л.Н., Ляховецкий М.А.</i> Макроэнергетический анализ контакта трения алюминиевых сплавов с мдо покрытиями	130
<i>Ломовской В.А., Кухтенкова А.А., Горшков А.А., Акимов Е.В.</i> Локальная неупругость в линейных полимерах	131
<i>Луковкин Р.О., Щеглов Г.А.</i> Динамические характеристики процесса посадки возвращаемого аппарата на посадочном устройстве с краш-опорами	131
<i>Марков В.А., Попов Ю.В., Пусев В.И.</i> Об аналитическом подходе по определению баллистического предела летательных аппаратов при высокоскоростном взаимодействии с тонкими металлическими экранами	132
<i>Мартыросов М.И.</i> Математическое моделирование на основе метода конечных элементов деформирования и разрушения панелей из полимерных композиционных материалов	133
<i>Медведский А.Л., Денисов С.Л.</i> Оценка долговечности упругой пластины при воздействии акустического поля различной пространственной структуры	135
<i>Мишенков Г.В., Самогин Ю.Н., Цой В.Э.</i> Метод квазидиагонализации для расчета собственных частот и форм свободных колебаний линейных механических систем	136
<i>Мишин Ю.Н.</i> Диагностика деформационного состояния конструкций ла тензорезисторами на основе моносulfида самария	136
<i>Морозов А.Г., Пушкарев А.Г.</i> Особенности изготовления быстроходных роторов электрических машин	139

<i>Мотова Е.А., Никитина Н.Е.</i> Ультразвуковая эхо-импульсная диагностика конструкционных материалов при циклическом нагружении.....	140
<i>Музеев М.Р., Якушев Р.С.</i> Численное моделирование взаимодействия движущегося гусеничного транспорта и дорожного полотна.....	142
<i>Мурзаханов Г.Х., Хроматов В.Е., Щугорев В.Н.</i> Оценка индивидуального остаточного ресурса трубопроводов по критериям механики разрушения.....	144
<i>Нестеров В.А.</i> Устойчивость подагливой при трансверсальном сдвиге пластины с неклассическим защемлением контура.....	145
<i>Нестеров В.А., Суханов А.С.</i> Моделирование композитного ферменного стержня базового модуля разгонного блока.....	148
<i>Нетребко А.В., Пшеничников С.Г.</i> Некоторые задачи динамики линейно-вязкоупругих цилиндрических оболочек.....	149
<i>Никитина Н.Е.</i> Влияние циклического нагружения конструкционного материала на его акустические и прочностные свойства.....	150
<i>Николаева А.С., Подкопаева Т.Б.</i> Расчет существующих и перспективных конструкций термобиметаллических оболочечных элементов сложной формы.....	152
<i>Огрызков С.Г. (иеродиакон Роман), Березовский А.В., Дмитриев В.Г.</i> Экспериментальное исследование влияния остаточных напряжений на демпфирование собственных частот колебаний больших колоколов.....	153
<i>Павлов И.С.</i> математические модели кристаллических материалов с отрицательными коэффициентами Пуассона.....	155
<i>Паймушин В.Н.</i> О формах потери устойчивости цилиндрической оболочки при внешнем боковом давлении.....	157
<i>Паймушин В.Н., Фирсов В.А., Гюнал И., Шишкин В.М.</i> Динамические характеристики упругости и демпфирования углепластика.....	159
<i>Парафесь С.Г., Туркин И.К.</i> Учет требования устойчивости системы «руль – привод» при проектировании маневренного беспилотного летательного аппарата.....	162
<i>Перельман В.Е.</i> Влияние альтернативных технологий формования заготовок на структуры получаемых композиционных материалов.....	164
<i>Поддубный А.А., Яровая А.В.</i> Изгиб частично опертой трехслойной пластины.....	166
<i>Помельникова А.С., Жук В.М.</i> Математическое описание кинетики формирования борированного слоя при жидкостном борировании сталей.....	168

<i>Пыхалов А.А., Яхненко М.С.</i> Проектирование сборных вибростойких опор трубопровода ла на основе мкэ и данных тензометрирования.....	169
<i>Радченко С.И., Неклюдова Г.А.</i> Роль музейно-выставочной деятельности в формировании общекультурных компетенций у студентов технических вузов.....	172
<i>Рогов Д.А., Кирюшина В.В., Коваленко П.В.</i> Оптимизация конструкции антенного обтекателя на основе критерия надежности.....	173
<i>Рыбин А.В., Щугорев В.Н.</i> Исследование проблемы детектирования и анализа грубых посадок самолёта.....	175
<i>Савицкий Д.М.</i> Повторное деформирование трехслойного упругопластического стержня в нейтронном потоке.....	176
<i>Савицкий Д.М., Старовойтов Э.И.</i> Деформирование трехслойной цилиндрической оболочки в температурном поле.....	178
<i>Самедов А.С., Усубалиев Т.Б.</i> Планирование эксперимента по формированию защитных покрытий лопаток газовых турбин.....	181
<i>Самогин Ю.Н.</i> Метод квазидиагонализации в расчетах вынужденных колебаний линейных недиссипативных систем.....	183
<i>Самсонов Ю.П.</i> О возможности «обкатки ротора» при кинематическом воздействии.....	184
<i>Самсонович С.Л., Макарин М.А., Шошин М.П.</i> О выборе кинематической схемы боковой ручки управления.....	186
<i>Сотский М.Ю.</i> К анализу регистраций истории замедления в мишени пластически деформируемого стержня.....	188
<i>Сотский М.Ю., Велданов В.А., Гелин Д.В.</i> Модернизированный Научно-экспериментальный комплекс кафедры СМ-4 МГТУ им. Н.Э. Баумана.....	189
<i>Старовойтова Е.Э.</i> Расчет трехслойных стержней переменной жесткости с теплоизолирующим наполнителем.....	190
<i>Султанов Л.У., Фахрутдинов Л.Р.</i> Методика исследования конечных деформаций гиперупругих тел.....	192
<i>Тарасова А.Н.</i> Моделирование процессов массопереноса углекислого газа в неподвижном изотермическом слое адсорбента.....	194
<i>Тарасова Т.В., Белашова И.С., Кузьмин С.Д.</i> Влияние степени дискретного упрочнения поверхности на триботехнические характеристики сталей и сплавов.....	196
<i>Тарлаковский Д.В., Шукуров А.М.</i> Дифракция нестационарных плоских сдвиговых волн на сферической полости в упругом полупространстве.....	198
<i>Тарлаковский Д.В., Щербачков В.А.</i> Нестационарные электромагнитноупругие осесимметричные колебания толстостенного цилиндра.....	200

<i>Токова Л.П., Ясинский А.В.</i> О влиянии радиальной неоднородности слоев.....	202
<i>Третьякова О.Н., Шевченко Г.Ю.</i> Прикладное программное обеспечение для создания нового оборудования для перспективных лазерных технологий.....	203
<i>Формалев В.Ф., Кузнецова Е.Л., Пизачкова Е.А.</i> Математическое моделирование тепломассопереноса в теплозащитных композиционных материалах в условиях аэродинамического нагрева.....	205
<i>Чекмарев Д.Т., Садовский В.В.</i> О подборе параметров численных схем МКЭ решения динамических задач теории упругости	206
<i>Шклярчук Ф.Н.</i> О задачах устойчивости упругих оболочек под действием гидростатического давления.....	208
<i>Щугорев В.Н., Касьянов К.Г.</i> Подходы и частные вопросы анализа поведения дефектов типа расслоений	211
<i>Щугорев В.Н., Касьянов К.Г.</i> Исследование проблемы детектирования и анализа грубых посадок самолёта.....	213
<i>Яганов В.М.</i> Динамика упругих оболочек с точечными связями и сосредоточенными массами.....	214
<i>Именной указатель</i>	216

**МАТЕРИАЛЫ XX МЕЖДУНАРОДНОГО СИМПОЗИУМА
«ДИНАМИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ
МЕХАНИКИ КОНСТРУКЦИЙ И СПЛОШНЫХ СРЕД»**

им. А.Г. Горшкова

Вятичи, 16 – 20 февраля 2015 г.

Подписано в печать 25.01.2015 г.

Формат 60×84 1/16. Бум. офсетная. Гарнитура Times New Roman.

Усл. печ. л. 12,75. Зак. № 6511. Тираж 150 экз.

Отпечатано с готового оригинал-макета в ООО "ТРП"

127137, Москва, ул. Правды, д. 24, стр. 5.