

*ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ – DEFORMATION AND FAILURE OF COMPOSITE MATERIALS AND STRUCTURES
ИМАШ РАН, Москва, Россия, 10-13 ноября 2014 г.*

Российская академия наук



Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления

при финансовой поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований

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

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

первой международной конференции

**Деформирование и разрушение композиционных
материалов и конструкций**

**Deformation and Failure of Composite
Materials and Structures**

(DFCMS-2014)

10-13 ноября 2014 г.

Москва
2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	8
Думанский А.М Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; alduman@rambler.ru	
СИНТЕЗ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ И МОДЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ. ОПЫТ И ДОСТИЖЕНИЯ ХАРЬКОВСКОГО АВИАЦИОННОГО ИНСТИТУТА	9
Я.С.Карпов Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина; carpov.cm@mail.ru	
ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ СЛОИСТЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗГИБНЫХ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ ТЕСТ-ОБРАЗЦОВ	10
В.Н. Паймушин, В.А. Фирсов, А. Г. Егоров, В.М. Шишкин Казанский национальный исследовательский технический университет, Казань, Россия; vpajmushin@mail.ru Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия Вятский государственный университет, Киров, Россия	
ЭФФЕКТ УПРОЧНЕНИЯ АРАМИДНОГО ВОЛОКНА РУСАР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКОЙ.	11
Шебанов С.М. Новиков И.К. Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН, shebanov_s@mail.ru Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия	
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ВЯЗКОУПРУГИХ КОМПОЗИТОВ	12
Алексеева С.И., Викторова И.В. ИМАШ РАН, Москва, Россия	
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА	13
С.Л. Васильев, А.В. Артемьев, С.А. Юргенсон Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия sjurg@yandex.ru	
СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ КОСОУГОЛЬНО-АРМИРОВАННОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА	14
А.М. Думанский, М.А. Алимов, А.А.Радченко Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; alduman@rambler.ru	
О ЗАМКНУТОМ РЕШЕНИИ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ ДЛЯ КОНЕЧНОЙ ОРТОТРОПНОЙ ПОЛОСЫ СО СТАТИЧЕСКИМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ НА ПРОДОЛЬНЫХ КРОМКАХ	15
К.Д. Харченко, С.А. Лурье Московский Авиационный Институт, Москва, Россия; kirill19Obninsk@yandex.ru Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия	
МАСШТАБНОЗАВИСИМЫЕ МОДЕЛИ СТЕРЖНЕЙ	16
С. А. Лурье, Е. И. Попова Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия Московский Авиационный Институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия	
ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ И СХЕМЫ АРМИРОВАНИЯ НА ВЯЗКОУПРУГИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИСТЕКЛОПЛАСТИКА	17
А.А. Баранов, Н.С. Обухова, С.В. Ворвуль, И.Н.Мишин, Е.Р. Лепикаш ОАО «ОНПП «Технология», Обнинск, Россия; lepikash@technologiya.ru	
ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ТРЕХСЛОЙНОЙ КОМПОЗИЦИОННОЙ ПОЛОСЫ ПРИ ОСАДКЕ МЕЖДУ ПЛОСКИМИ ШТАМПАМИ	18
Е.А. Лямина Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; lyamina@inbox.ru	

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГАЗОФАЗНОГО ОСАЖДЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КЕРАМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ЭВОЛЮЦИИ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ	19
К.В. Михайловский, С.В. Резник ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия; konst_mi@mail.ru	
ПРОЧНОСТЬ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО СЛОЯ ВНУТРИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПАКЕТОВ С РАЗЛИЧНЫМИ СХЕМАМИ АРМИРОВАНИЯ	20
Л.П. Таирова, А.А. Смердов МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; com-or@yandex.ru	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОМ НАГРЕВЕ	21
Якушкин П.Ю., Забежайлов М.О., Кордо М.Н. ГНЦ РФ ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия; pawel.jakushkin@yandex.ru	
О ВЛИЯНИИ ПЛОЩАДИ КОНТАКТА ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССЫ НА СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ	22
С.В. Серёгин, О.Е. Сысоев ФГБОУ ВПО "КНАГТУ", Комсомольск-на-Амуре, Россия	
АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТКАНЕВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ТРЕХТОЧЕЧНЫЙ ИЗГИБ	23
В.А. Комаров, Е.А. Кишов, Р.В. Чарквиани Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), г. Самара, Россия; vkomarov@ssau.ru , eakishov@yandex.ru , oneram@yandex.ru	
СОЕДИНЕНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ И АГРЕГАТОВ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЗАКОНЦОВОК С КРЕПЕЖНЫМИ МИКРОЭЛЕМЕНТАМИ. ОПЫТ И ДОСТИЖЕНИЯ ХАРЬКОВСКОГО АВИАЦИОННОГО ИНСТИТУТА	24
Я.С. Карпов Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина; carpov.cm@mail.ru	
НАСЛЕДСТВЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР	25
Шебанов С.М. Куриченко А.А. Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН	
ДЕФОРМАЦИИ НАНОКОМПОЗИТА МНОГОСЛОЙНЫЕ УГЛЕРОДНЫЕ НАНОТРУБКИ-ЭПОКСИДНАЯ СМОЛА В НЕЛИНЕЙНОЙ ОБЛАСТИ	26
Шебанов С.М. Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН, shebanov_s@mail.ru	
СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ АНИЗОТРОПНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ЛОПАТОК И СТЕРЖНЕЙ С ПЕРЕМЕННЫМИ ФИЗИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ	27
Нуримбетов А.У. ФГБОУ ВПО Московский авиационный институт (НИУ), Москва, Россия; alibek_55@mail.ru	
ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА СДВИГ В ПЛОСКОСТИ ЛИСТА	28
В.Д. Крылов, В.С. Ерасов, Н.О. Яковлев ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва, Россия; krylov.vladimir@gmail.com	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ НА КОРРОЗИОННЫЙ ИЗНОС	29
Гиниятуллин Р.Р., Якупов Н.М. Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН, Казань, Россия; true_way@mail.ru">Rishat.Giniyatullin true_way@mail.ru	
НЕУПРУГАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ КАК ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ	30
П.Б. Северов, Ю.Г. Матвиенко, В.И. Иванов, А.М. Думанский Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; alpinprom@yandex.ru	

МЕХАНИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАМОТОЧНЫХ КОЛЕЦ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОПРАВКОЙ.	31
Сергеев А.Ю. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия; flash-06@inbox.ru	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ МЕМБРАН	32
Л.У. Харисламова, С.Н. Якупов Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН, Казань, Россия; lejsanh@yandex.ru	
ВЛИЯНИЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ УДАЛЯЕМЫХ ТКАНЕЙ НА СВОЙСТВА ТОНКОСТЕННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ	33
А.А. Ширко, Н.С. Обухова, С.В. Ворвуль, В.А.Каплина, Е.Р. Лепикаш ОАО «ОНПП «Технология», Обнинск, Россия; lepikash@technologiya.ru	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРУЖЕННЫХ ОБРАЗЦОВ В КОРРОЗИОННО-АКТИВНОЙ СРЕДЕ	34
Н.М. Якупов, Р.Р. Гиниятуллин, С.Н. Якупов, А.Р. Нурғалиев Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН, Казань, Татарстан, РФ; Якупов Н.М. yzsrr@kfti.knc.ru	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ АДГЕЗИИ ПЛЕНКИ К ПОДЛОЖКЕ	35
С.Н. Якупов Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН, Казань, Татарстан, РФ; tamas_86@mail.ru	
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗВИТИЯ УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КЕССОНЕ КРЫЛА СРЕДНЕМАГИСТРАЛЬНОГО САМОЛЕТА	36
И.В. Гулевский, В.И. Голован, А.Ю. Захаренкова, С.В. Куликов, В.В. Коновалов, А.В. Панков, В.Г. Слободчиков, В.Е. Стрижиус, М.А. Фетотов, К.С. Щербань Центральный Аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия; scherban@tsagi.ru ЗАО «Аэрокомпозит», Москва, Россия	
ACCELERATED TESTING THE COMPOSITE MATERIAL FOR WIND TURBINE BLADES	37
R.I. Zaynetdinov, I.V.Gadolina Moscow State University of Railway Engineering (MIIT), Moscow, Russia; zri7755@gmail.com Institute for Machine Science (IMASH) of RAS, Moscow, Russia	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ВИНИЛЭФИРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ПРИ СТАТИЧЕСКИХ И ПОВТОРНО-СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ	38
Н.О. Яковлев, А.С. Генералов, В.В. Автаев, А.С. Бойчук ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва, Россия; Nick_62@mail.ru	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ПРИ РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЯХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН С КОМПОЗИТНЫМИ И МЯГКИМИ СЛОЯМИ	39
В.М. Шишкин, А.П. Левашов, В.А. Фирсов Вятский государственный университет, Киров, Россия; tism1@rambler.ru Казанский национальный исследовательский технический университет, Институт авиации, наземного транспорта и энергетики, Казань, Россия	
АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ СЛОИСТОГО УГЛЕПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ РАВНОПРОЧНОЙ ТКАНИ	40
Русланцев А.Н., Думанский А.М., Портнова Я.М. Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; alduman@rambler.ru Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия ГНЦ РФ ОАО «ОНПП «Технология», г.Обнинск, Россия	
ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОПИТКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КРЫШИ И КУЗОВА ВАГОНА ХОППЕРА ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ВАКУУМНОЙ ИНФУЗИИ	41
А.Е. Ушаков, Е.И. Корниенко, Н.В. Розин, А.А. Сафонов Сколковский институт науки и технологий, Московская область, Одинцовский район, дер. Сколково, Россия; ООО «НТИЦ АпАТЭК-Дубна», г. Дубна, Россия; ФГУП «Центральный Аэрогидродинамический Институт», г. Жуковский, Россия; Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия	

РАЗРУШЕНИЕ ЭЛАСТОМЕРНОГО КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ «МЕТАЛЛ-КЕРАМИКА» В УСЛОВИЯХ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО ТЕПЛОСИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ	42
<p>А.В. Терехин, В.И. Неповинных, А.М. Думанский ГНЦ РФ ОАО «ОНПП «Технология», г.Обнинск, Россия; Институт машиноведения им. А.А.Благодрава РАН, Москва, Россия; alduman@rambler.ru Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия</p>	
РЕШЕНИЕ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ЗАДАЧ ТЕРМОУПРУГОСТИ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БЕРЕГОВ ТРЕЩИН	43
<p>Р.В. Гольдштейн, В.В. Лобода, М.Н. Перельмутер Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия, perelm@ipmnet.ru Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара, Днепропетровск, Украина</p>	
ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРИ ПОМОЩИ ВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	44
<p>С.Р. Ганиев, В.П. Касилов, Д.В. Курменев, А.П. Пустовгар Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН, Москва, Россия; kurmenyov_dv@mail.ru</p>	
МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В РАМКАХ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ	45
<p>В.А. Косарев, П.Ю. Шершак ОАО НИАТ, НПЦ «НИАТ Композит», Москва, Россия; spc@niat.ru</p>	
ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	46
<p>А.А. Дудченко Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия; a_dudchenko@mail.ru</p>	
РЕЗИНОКОРДНАЯ ОБОЛОЧКА ЭЛАСТО-ВИНТОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ	47
<p>Ф.Д. Сорокин, М.В. Попков Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия; mihpmv@gmail.com</p>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЫКЛАДКИ	48
<p>И.В. Сергеичев, А.Ю. Константинов, А.А. Сафонов Сколковский институт науки и технологий, Московская область, Одинцовский район, дер. Сколково, Россия; Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия; Институт машиноведения им. А.А. Благодрава РАН, Москва, Россия</p>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ ДРАПИРОВКИ ДВУМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ ПРЕФОРМ НА ОСНОВАНИИ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОГО СДВИГА	49
<p>Б.Н. Федулов, И.В. Сергеичев, А.А. Сафонов Сколковский институт науки и технологий, Московская область, Одинцовский район, дер. Сколково, Россия; Институт машиноведения им. А.А.Благодрава РАН, Москва, Россия;</p>	
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПУЛТРУЗИИ ПРОФИЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	50
<p>А.А. Сафонов, А.Ю. Константинов Институт машиноведения им. А.А.Благодрава РАН, Москва, Россия; Институт механики ННГУ, Нижний Новгород, Россия</p>	
ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ОБТЕКАТЕЛЯ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ С ПОМОЩЬЮ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	51
<p>Саввин А.И. ИМАШ РАН, Москва, Россия; saanig@mail.ru</p>	

<p>РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ШАССИ АВИАЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ</p> <p>Вякин В.Н., Козлов Д.М., Пересыпкин В.П., Пересыпкин К.В., Степанов Н.М., Шахмистов В.М. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)» (СГАУ) ОАО «Авиаагрегат» (г.Самара)</p>	52
<p>ТЕРМОУПРУГИЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСНАСТКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ТРАНСФЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ</p> <p>В.А. Комаров, Е.И. Куркин, А.С. Кузнецов, Е.А. Кишов Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), г. Самара, Россия; vkomarov@ssau.ru</p>	53
<p>ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЕ АГРЕГАТА МЕХАНИЗАЦИИ КРЫЛА ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА</p> <p>В.А. Комаров, А.В. Черняев, Р.В. Чарквиани, Е.А. Кишов Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), г. Самара, Россия; vkomarov@ssau.ru University of Manitoba, Winnipeg, Canada</p>	54
<p>ОСОБЕННОСТИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ МЕЖСЛОЕВЫМИ ЭФФЕКТАМИ</p> <p>Е. А. Кишов Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), г. Самара, Россия; eakishov@yandex.ru</p>	55
<p>НАУЧНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ РАЗРАБОТКИ ЭФФЕКТИВНЫХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ КОМПОЗИТНЫХ АГРЕГАТОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ</p> <p>В.Е. Гайдачук, В.В. Кириченко, А.В. Кондратьев, В.А. Коваленко Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина; kondratyev a v@mail.ru Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина</p>	56
<p>ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ЭФФЕКТЫ МЕТАСТАБИЛЬНОСТИ ПРИ СИНТЕЗЕ NiAl.</p> <p>Ю.А. Абузин, С.А. Лурье Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия; 23103102@mail.ru Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия</p>	57

МОДЕЛИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Думанский А.М

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; alduman@rambler.ru

Рассмотрены модели деформирования слоистых композиционных материалов, позволяющие описывать анизотропию реологических и нелинейных свойств. Модели построены на матричных алгоритмах с привлечением аппарата алгебры резольвентных операторов. Описаны методы идентификации и упругих свойств слоя по результатам испытаний однонаправленных и слоистых материалов.

Ключевые слова: идентификация характеристик упругости, определяющее соотношение, нелинейное деформирование, анизотропия свойств

Композиционные материалы обладают заметной анизотропией упругих, нелинейно-упругих и реологических свойств. Результаты экспериментальных исследований показывают, что в основном временные и нелинейно-упругие свойства однонаправленного углепластика зависят от сдвига в плоскости слоя. Зависимостью свойств слоя в направлении армирования невелика и ею можно пренебречь [1]. В [1,2] отмечено, что ярко выраженные эффекты ползучести при сдвиге, а также при циклически меняющихся нагрузках. В работе [1] показано, что деформации ползучести углепластика при сдвиге могут быть описаны степенным законом. Для описания временных свойств композиционных материалов на полимерной основе могут быть использованы определяющие соотношения наследственной упругости с резольвентными ядрами [3]. При плоском напряженном состоянии определяющие соотношения для слоя и пакета в главных осях ортотропии могут быть записаны следующим образом:

$$\varepsilon_i = (s_{ij} + K_{ij}^*) \cdot \sigma_j; \sigma_i = (g_{ij} - R_{ij}^*) \cdot \varepsilon_j, \quad (1)$$

где операторные выражения описывают временные свойства материала, $i, j = 1, 2, 6$, s_{ij} g_{ij} матрицы мгновенных компонент жесткости и податливости слоя, $K_{ij}(t)$, $R_{ij}(t)$ - ядра ползучести и релаксации соответственно.

Нелинейное деформирование слоя, определяемое соответствующими свойствами при сдвиге в плоскости слоя, может также быть описано с помощью определяющих соотношений матричного вида с «возмущением» линейной составляющей нелинейными эффектами

$$G_{xy} = G_{xy}^0 - \tilde{G}_{xy} f; S_{xy} = S_{xy}^0 + \tilde{S}_{xy} \text{diag}(\rho(f)), \quad (2)$$

где G_{xy} , S_{xy} - матрицы жесткости и податливости слоя или пакета с учетом фактора нелинейности свойств, f - функция, описывающая нелинейное деформирование слоя при сдвиге в плоскости слоя, \tilde{G}_{xy} , \tilde{S}_{xy} - матрицы определенной структуры, также «возмущающие» упругое поведение.

Таким образом, задачи оценки влияния рео-

логии и нелинейности деформирования могут быть сведены к задаче чувствительности системы линейных уравнений к возмущениям. Если обозначить исходную систему уравнений, соответствующую упругому решению задачи как $Ax = b$, то возмущенная параметризованная система примет вид

$$(A + \varepsilon F)x(\varepsilon) = b + \varepsilon \varphi, \quad (3)$$

где ε - величина, характеризующая возмущение. Тогда чувствительность системы к возмущениям может быть оценена соотношением

$$\frac{\|x(\varepsilon) - x\|}{\|x\|} \leq \text{cond}(A)(\varepsilon r_A + \varepsilon r_b) + O(\varepsilon^2),$$

где $\text{cond}(A)$ - число обусловленности матрицы,

$\varepsilon r_A = \varepsilon \frac{\|F\|}{\|A\|}$, $\varepsilon r_b = \varepsilon \frac{\|\varphi\|}{\|b\|}$ - относительные по-

грешности A и b соответственно. Следует отметить, что $\text{cond}(A)$ зависит от нормы, в которой оно вычисляется. Если параметр нормы равен двум, число обусловленности представляет собой отношение максимального сингулярного числа к минимальному.

Если определяющие соотношения позволяют описывать анизотропию реологических и нелинейных свойств, то полученные выше оценки позволяют найти интегральную оценку энергопоглощающих свойств слоистых композиционных материалов. Отметим, что при оценке реологических свойств в качестве исходных выбираются матрицы жесткости и податливости соответствующие некоторым расчетным мгновенным значениям указанных характеристик. Если такой зависимости нет, выбираются соответствующие характеристики упругости

1. Charentenay F.X., Zaidi V.A. Creep behavior of carbon-epoxy ($\pm 45^\circ$) laminates // In: "Progress in Science and Engineering, Ed. ICCM-IV, Tokyo, 1982. - pp. 787-798.
2. Potter R.T. Repeated loading and creep effects in shear property measurements on unidirectional cfrp // Composites. November. 1974. - pp. 261-265.
3. Работнов Ю.Н. Элементы наследственной механики твердых тел. - М.: Наука, 1977. - 384 с.

**СИНТЕЗ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ И МОДЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ОСОБЕННОСТЕЙ
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ.
ОПЫТ И ДОСТИЖЕНИЯ ХАРЬКОВСКОГО АВИАЦИОННОГО ИНСТИТУТА**
Я.С.Карпов

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «Харьковский авиационный институт»,
Харьков, Украина; (carpov.cm @ mail.ru)

В связи с рядом принципиальных отличий конструкций из композиционных материалов (КМ) от металлических разработка соответствующих расчетных схем, физических и математических моделей для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) и расчета на прочность является актуальной.

По техническим заданиям различных предприятий и организаций СССР, РФ, Украины и ЕС в Харьковском авиационном институте были выполнены и продолжаются работы по разработке конструктивно-технологических решений (КТР) разнообразных агрегатов и узлов летательных аппаратов. Необходимость учета особенностей полимерных КМ (волоконности и слоистости) обусловила синтез ряда новых расчетных схем.

В силу различия структуры КМ стрингеров и обшивки панелей самолета в них в эксплуатации возникают дополнительные пуассоновы и температурные напряжения, которые необходимо учитывать уже на этапе проектирования. Для решения этой задачи предложена модель, основанная на маневре расчетной схемы, позволяющая учитывать весь комплекс температурно-силовых внешних воздействий при оптимизации параметров конструкции.

В композитных панелях стрингеры и обшивка между собой склеены или приформованы. При сжатии прочность такого соединения оказывается недостаточной и стрингеры отщелкиваются от обшивки задолго по потери устойчивости панели. С целью прогнозирования величины отрывных усилий предложена физическая и математическая модель на основе интерпретации элементов панели как стержней или пластин на упругом основании. Получены расчетные зависимости для определения коэффициента пропорциональности в зависимости отрывных усилий от величины технологического или эксплуатационного прогиба.

Стрингеры представляют собой стержни со сложным неоднородным поперечным сечением, образованным сочетанием укладок $[0^\circ]$ и $\pm[45^\circ]$. При изменении температуры происходит изгиб и закручивание композитных профилей. На базе теории внецентрового сжатия тонкостенных стержней В.З.Власова разработана и экспериментально проверена методика прогнозирования НДС стержней с неоднородным поперечным сечением, основанная на представлении внутреннего самоуравновешенного напряженного состояния в виде системы растягивающих и сжимаю-

щих усилий или сил, распределение и приложение которых соответствует структуре КМ.

Слоистая структура композита и дискретное расположение заформованных крепежных микроэлементов диаметром 0,8...2,0 мм учтены в предложенных методах определения НДС соединений и физико-механических характеристик КМ с переменной анизотропией в окрестности крепежа, где при его внедрении в препрег или в сухую арматуру искривляются и уплотняются волокна. Исследовано влияние конструктивных и структурных параметров на упругие и прочностные свойства и экспериментально подтверждено их приемлемое соответствие прогнозируемым характеристикам.

Проектирование конструкций из КМ проводится на базе комплекса физико-механических характеристик монослоя однонаправленного материала, приводимых в паспорте на КМ, а поверочный расчет на прочность основан на свойствах пакета слоев, найденных экспериментально. Таким образом, эти два традиционных этапа разработки (проектировочный и поверочный расчет на прочность) базируются на разных экспериментальных данных о прочности КМ. Это приводит к несопоставимости результатов расчетов, к невозможности модификации структуры КМ, учета температурных напряжений в слоях и последовательности разрушения слоев при анализе по свойствам пакета, а также затрудняет прогнозирование влияния параметров процесса отверждения на характеристики КМ. Вместе с тем, на этапе проектирования у разработчика нет других данных, кроме паспортных свойств. Анализ выявленного дуализма позволил обосновать предложение о включении в перечень нормативных характеристик методики аналитического прогнозирования прочностных свойств сложноармированных КМ, построенной на основе приемлемого для данного материала критерия прочности или используя самые распространенные критерии Мизеса-Хилла и максимальных напряжений. В таком случае становится возможным проектирование на базе физико-механических свойств пакета – существующих для деформативного комплекса и предлагаемого для прочностных свойств.

Предложенные расчетные схемы и их математическое описание позволяют существенно повысить достоверность определения НДС и расчета на прочность, а также сократить время на разработку композитных конструкций

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВНУТРЕННЕГО
ТРЕНИЯ СЛОИСТЫХ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ИЗГИБНЫХ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ ТЕСТ-ОБРАЗЦОВ

В.Н. Паймушин^{1,2}, В.А. Фирсов¹, А. Г. Егоров², В.М. Шишкин³

¹Казанский национальный исследовательский технический университет, Казань, Россия; vpajmushin@mail.ru

²Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

³Вятский государственный университет, Киров, Россия

Теоретико-экспериментальным методом определяются амплитудные зависимости логарифмических декрементов колебаний слоистых волокнистых композитов по основе, утку и сдвиге, основанным на измерении и обработке амплитуд изгибных затухающих колебаний консольно закрепленных многослойных композитных тест-образцов. Отмеченные зависимости аппроксимируются степенными полиномами, коэффициенты которых определяются из условия минимума квадратичных отклонений расчетных параметров внутреннего демпфирования тест-образцов от их экспериментальных значений.

Ключевые слова: композит, тест-образец, затухающие колебания, параметр внутреннего демпфирования, логарифмический декремент колебаний, конечный элемент, прямой поиск.

Для определения зависимостей логарифмических декрементов колебаний (ЛДК) $\delta_1(\epsilon_{1,0})$, $\delta_2(\epsilon_{2,0})$, $\delta_{12}(\gamma_{12,0})$ слоистых волокнистых композитов от амплитуд соответствующих деформаций используются экспериментальные данные о демпфирующей способности многослойных плоских тест-образцов с основой, уложенной вдоль, поперек и под углами $\pm 45^\circ$ к их продольной оси. Наиболее объективные данные о демпфирующей способности тест-образцов получаются при исследовании их изгибных затухающих колебаний [1], что дает экспериментальную зависимость ЛДК δ тест-образца от амплитуды колебаний A его свободного конца. Для определения ЛДК материала необходимо использовать зависимость

$$\delta^*(A) = \delta(A) - \delta_a(A) \quad (1)$$

где $\delta_a(A)$ - расчетная аэродинамическая составляющая ЛДК тест-образца [2].

Зависимости $\delta_1(\epsilon_{1,0})$, $\delta_2(\epsilon_{2,0})$ и $\delta_{12}(\gamma_{12,0})$ аппроксимируются степенными полиномами. Идентификация данных зависимостей состоит в поиске коэффициентов степенных полиномов по заданным параметрам внутреннего демпфирования $\delta^*(A)$ соответствующих тест-образцов при минимальной квадратичной невязке между расчетными и заданными значениями δ^* в нескольких точках диапазона представления зависимостей $\delta^*(A)$. Для определения расчетных $\delta^*(A)$ используется метод конечных элементов с заменой дифференциальных уравнений движения тест-образца уравнением относительно обобщенной координаты q низшей моды $\{F\}$:

$$m\ddot{q}(t) + c\dot{q}(t) + kq(t) = 0 \quad (2)$$

где m , c , k - соответственно обобщенная

масса, обобщенный коэффициент демпфирования и обобщенная жесткость тест образца.

Поиск коэффициентов степенных полиномов осуществляется прямым методом, что предполагает шаговое интегрирование уравнения (2) с получением расчетной виброграммы затухающих колебаний тест-образца и последующей ее обработкой для нахождения расчетных параметров внутреннего демпфирования в каждой точке пространства поиска данных коэффициентов. С целью ускорения процесса поиска предлагается алгоритм прогонки, основанной на постоянстве параметра затухания $n = c/2m$ в пределах одного цикла затухающих колебаний тест-образца:

$$A_{j+1} = A_j \exp(-n_j T); \delta_{j+1} = c_{j+1} \pi / m \omega \quad (3)$$

Обобщенный коэффициент демпфирования c_{j+1} вычисляется при амплитуде колебаний A_{j+1} по матрице демпфирования $[C]_{j+1}$ тест-образца, собираемой из матриц демпфирования конечных элементов. Достоверность алгоритма (3) подтверждается численными экспериментами при решении задачи определения ЛДК тест-образцов по известной демпфирующей способности материала.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 14-19-00667).

1. Паймушин В.Н., Фирсов В.А., Гюнал И., Егоров А.Г. Теоретико-экспериментальный метод определения параметров демпфирования на основе исследования затухающих изгибных колебаний тест-образцов 1: Экспериментальные основы. // Механика композит. материалов. – 2014. – Т.50. – №2. – С.185–198.
2. Егоров А.Г., Камалутдинов А.М., Нуриев А.Н., Паймушин В.Н. Теоретико - экспериментальный метод определения параметров демпфирования на основе исследования затухающих изгибных колебаний тест-образцов 2: Аэродинамическая составляющая демпфирования. // Механика композит. материалов. – 2014. – Т.50. – №3. – С.379–396

ЭФФЕКТ УПРОЧНЕНИЯ АРАМИДНОГО ВОЛОКНА РУСАР ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКОЙ.

Шебанов С.М.¹ Новиков И.К.²

¹Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН, shebanov_s@mail.ru

²Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия
 Аннотация.

В работе представлены результаты упрочнения арамидного волокна Русар при электромагнитной обработке. Получено статистически значимое увеличение предела прочности на 10-12%

Ключевые слова: электромагнитная обработка, арамидное волокно Русар, увеличение, прочность

Введение.

Арамидное волокно серии “Русар” производства “НПП ТЕРМОТЕКС” (Россия, Мытищи, МО) является лидером по прочностным характеристикам среди арамидных волокон, превосходя на 30-50% такие известные бренды как КЕВЛАР (США) и ТВАРОН (Голландия-Япония). Различные модификации волокна РУСАР используются в ответственных изделиях ракетно-космической техники, имеет хорошие перспективы для авиационной техники. Плотность волокна Русар ниже на 15% плотности углеродного волокна и составляет 1450-1480 кг/м³.

Цель работы.

Основной целью работы является повышение прочностных характеристик арамидного волокна без существенного изменения основной технологии его производства. Основы теории используемой электромагнитной обработки (ЭМО) изложены в [1].

Материалы и методы.

Материалом для исследования был выбран экспериментальный свежеприготовленный образец волокна Русар НТ. Методом исследования определение предела прочности и модуля упругости отдельных филаментов на различной зажимной длине (расстояние между захватами). Образцы волокна подвергались ЭМО различной длительности. Измерения прочностных характеристик проведено на разрывной машине “Texttechnology” (Германия)

Результаты и их обсуждение.

Результаты измерений и их статистическая обработка на зажимных длинах 10мм и 20мм представлены в таблицах 1 и 2 соответственно. В таблицах приняты обозначения m_x - среднее, g_1, g_2 -нижняя и верхняя границы доверительного интервала при $p=0,95$. S_x -стандартное отклонение, R_x -размах (разность между максимальным и минимальным значениями, n -число параллельных измерений.

Таблица 1. Пределы прочности в ГПа на зажимной длине 10мм

Параметр	Исходный	ЭМО $\tau=33$ суток
m_x	4.7880	5.1024
g_1	4.6551	4.9422
g_2	4.9210	5.2626
S_x	0.5493	0.4050
R_x	2.5934	1.4400
n	68	27

Доверительные интервалы не имеют общих границ, увеличение предела прочности статистиче-

ски значимое. Известно, что арамидные волокна после изготовления в некоторой степени изменяют свои характеристики. В связи с этим при измерениях на зажимной дине 20мм в качестве контрольного опыта были произведены измерения образца исходного волокна Русар через 33 суток после изготовления. Результаты приводятся в таблице 2.

Таблица 2. Пределы прочности в ГПа на зажимной длине 20мм

Параметр	Необработанный ЭМО		ЭМО $\tau=33$ суток
	Исходный	$\tau=33$ суток	
	2	3	4
m_x	4.3313	4.5496	4.8232
g_1	4.0935	4.2496	4.6322
g_2	4.5691	4.8496	5.0141
S_x	0.4934	0.6767	0.4626
R_x	1.5191	1.9554	1.5633
n	20	22	25

Данные, приведённые в табл. 2 показывают, что доверительные интервалы исходного образца и прошедшего ЭМО (столбцы 2 и 4) не имеют общих границ, различие в образцах значимое и, следовательно, получен образец принципиально отличный от исходного, т.е. новый материал. Доверительные интервалы для фонового образца (столбец 3) и обработанного имеют общую границу, но проверка с использованием критерия Колмогорова-Смирнова показал, что эти образцы принадлежат разным генеральным совокупностям. Дополнительная проверка статистической значимости разности средних значений и дисперсий для необработанных и обработанного ЭМО образцов показала, что разница между ними статистически значима. Практическая проверка разработанной методики ЭМО, проделанная на тканых бронепакетах для бронезилетов, показала её эффективность, кратно уменьшив число слоёв, пробитых при баллистических испытаниях.

Выводы.

Впервые получено значимое увеличение прочностных характеристик арамидного волокна Русар при электромагнитной безреагентной обработке.

Библиографический список

1. Спиридонов М.И., Новиков И.К. Несколько вопросов по поводу образования сигнала. М.:2012. 352с.
2. Шебанов С.М., Новиков И.К. Эффект повышения баллистических свойств бронепакета из арамидной ткани при обработке в электромагнитном поле//Композитный мир. 2014(54). № 3 с.36-41

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ И МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ВЯЗКОУПРУГИХ КОМПОЗИТОВ

Алексеева С.И., Викторова И.В.

ИМАШ РАН, Москва, Россия

В данной работе представлено тематическое обоснование для сравнительного анализа двух подходов оптимизации при оценке параметров модельного уравнения наследственного типа Ю.Н. Работнова, а именно: традиционная задача оптимизации по методу наименьших квадратов в области реального времени (задача 1), а также альтернативная задача оптимизации в области переменной преобразования Лапласа (задача 2). Последняя из упомянутых проблем позволяет производить сравнение процесса минимизации расстояния для двух нормированных функциональных пространств, определенных на одном и том же функциональном множестве $C[a,b]$, но с различными нормами. На языке теории нормированных пространств эквивалентность минимизации аппроксимированных задач 1 и 2 устанавливается на основе эквивалентности соответствующих норм. Приведенное доказательство теоремы

устанавливает существование верхней границы критерия эквивалентности, в то время как отсутствие нижней границы доказано от противного. Применение разработанного подхода к моделированию экспериментальной ползучести нанокompозитов демонстрирует эффективность постановки задачи оптимизации. Последняя вместе с фактом, что задача 2 формулировалась без приближения по методу наименьших квадратов, позволила получить наиболее оптимальные оценки расчетных параметров.

В целом необходимо использовать оценки параметров, полученных как локальный минимум задачи 2 в качестве исходных при поиске в окрестности каждого из найденных значений для наилучшей аппроксимации оптимального набора параметров в реальной области временных переменных задачи 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ В ОБРАЗЦАХ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

С.Л. Васильев, А.В. Артемьев, С.А. Юргенсон*

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*sjurg@yandex.ru

В данной работе рассматривается методика и результаты исследования структурных изменений в образцах из полимерных композиционных материалов при приложении одноосного силового воздействия. Регистрация состояния материала производится с помощью вычислительного рентгеновского томографа, а силовое воздействие создается стендовым приспособлением, расположенным в рабочей части томографа.

Ключевые слова: томография, полимерные композиционные материалы, дефектоскопия, качество, структура материала.

Введение

Метод **вычислительной рентгеновской томографии (ВРТ)** основан на реконструкции и визуализации внутренней структуры материала поперечных сечений (томограмм) объекта контроля в результате совместной вычислительной обработки теневых проекций [1,2], полученных при рентгеновском просвечивании объекта в различных направлениях.

Исследование развития вторичных повреждений [3] в полимерного композиционного материала (ПКМ) с помощью вычислительной рентгеновской томографии возможно проводить после нагружения образца или конструкции (в данном случае фиксируется только разгруженное состояние). Предлагаемый метод позволяет проводить исследование образцов непосредственно под нагрузкой.

Методика проведения исследования

Для оценки изменений состояния материала под нагрузкой спроектирован и изготовлен стенд, позволяющий прикладывать к образцам силовое одноосное воздействие непосредственно на рабочем столе рентгеновского томографа.

Контролируемые параметры основаны на плотности материала объекта. В качестве основного параметра выбрано среднее значение линейного коэффициента ослабления излучения [4] (аналог плотности материала) и его среднеквадратичное отклонение (характеризует «рыхлость» материала, т.е. амплитуду разброса).

Конструктивно приспособление состоит из трех частей – верхняя, средняя и нижняя части, которые выполнены разборными. В верхней части расположен динамометр для контроля нагрузки, в средней части располагается исследуемый образец, в нижней части находится винтовой механизм загрузки. Средняя часть выполнена из композиционного материала. Определение положения образца производится по металлическим меткам, нанесенным на торец образца.

Результаты исследования композиционного образца

Исследование проводилось на образце, выпол-

ненным из УОЛ-300-1 и связующего ЭПС-И-108 методом пропитки и формования под двойным вакуумным пакетом (технология DBVI). К образцу прикладывались нагрузки соответствующие

Исследование образца проводилось на четырех уровнях растягивающей нагрузки – 5%, 20%, 30%, 40% от разрушающей нагрузки, а так же при дальнейшей его полной разгрузке.

По итогам тестового исследования на данном образце можно делать следующие выводы:

- Для данной укладки и материала характерно значительное увеличение магистрального дефекта после достижения 30% от разрушающей нагрузки.
- При приложении нагрузки происходит рост локального первичного дефекта при этом более мелкие дефекты закрываются и структура материала становится менее рыхлой.
- После разгрузки образца наблюдается общее уплотнение структуры материала, но при этом происходит раскрытие магистрального дефекта[5], который в случае дефектоскопии после снятия нагрузки имеет значительно меньшие геометрические размеры по сравнению с нагруженным состоянием.

1. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник в 8 томах. Под редакцией Клюева В.В. М., Машиностроение, 2007, 5480 с.

2. Бакулин В.Н., Дмитриев А.Е., Бурков В.А. и др. Анализ геометрических оболочечных биологических структур с помощью компьютерной томографии. Труды I Всесоюзного симпозиума "Нелинейная теория тонкостенных конструкций и биомеханика", Кутаиси-Ткибули, 1985, с.111-117.

3. Васильев В.В., Протасов В.Д., Болотин В.В. и др., Композиционные материалы: Справочник. Под общ. Ред. Васильева В.В., Тарнопольского Ю.М.. М.: Машиностроение, 1990, 512 с.

4. Бойцов Б.В., Громашев А.Г., Юргенсон С. А., Васильев С.Л. Методы неразрушающего контроля, применяемые для конструкций из перспективных композиционных материалов, журн. «Труды МАИ», 2011, вып. 49.

5. Композиционные материалы под ред. Л. Браутмана и Р. Крока Разрушение и усталость. – М.: Мир, 1978. Т.5. 483 с.

СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ КОСОУГОЛЬНО-АРМИРОВАННОГО КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА

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

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; alduman@rambler.ru

На основании предложенной структурной модели показана геометрическая нелинейность деформационного поведения косоугольно-армированного композитного материала. Сопоставлены упругие характеристики модели и композита.

На завершающей стадии деформирования косоугольно-армированных углепластиков можно наблюдать переход от разупрочнения материала к его упрочнению. На диаграммах деформирования наблюдаются зоны упругого деформирования, пластического течения матрицы (разупрочнения) и последующего упрочнения. Эффект перехода от разупрочнения к упрочнению можно объяснить поворотом волокон и, соответственно, изменением угла армирования. При больших деформациях в результате достижения определенных углов армирования материал начинает работать как жесткая стержневая система с соответствующим влиянием геометрической нелинейности на деформационное поведение.

В данной работе композит с косоугольным армированием моделируется как стержневая решетка с шарнирами в узлах. На рис.1 показана элементарная ячейка с упругими элементами.

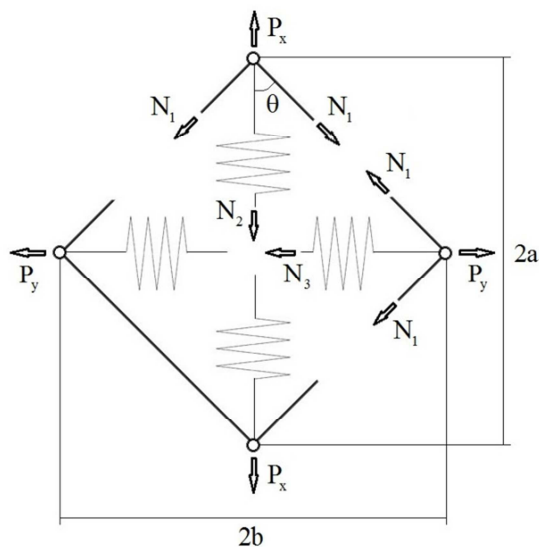


Рис.1. Схема элементарной ячейки косоугольно-армированного композитного материала.

Приложенные к шарнирам усилия, распределенные по толщине элемента (композита), связаны с приложенными к композиту внешними напряжениями: $P_x = 2b(1+e_y)\sigma_x$ и $P_y = 2a(1+e_x)\sigma_y$, где e_x и e_y - деформации упругих элементов.

Из уравнений равновесия в узлах получены определяющие соотношения между усилиями и де-

формациями, отражающие геометрическую нелинейность, возникающую при деформировании. Эффект геометрической нелинейности показан на рис.2, где k_l - коэффициент упругости стержня.

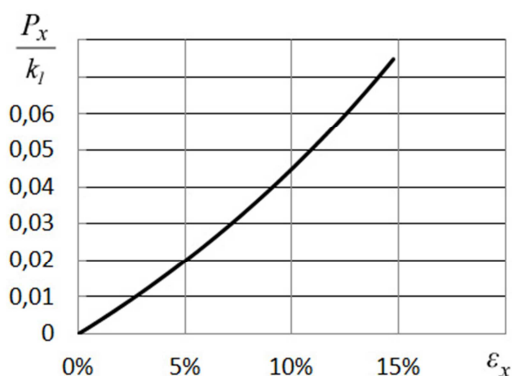


Рис.2. Диаграмма деформирования элементарной ячейки при одноосном растяжении

Зависимость коэффициента Пуассона структурной модели от угла θ сопоставлена со значениями полученными расчетом по теории слоистых пластин для композитов с характеристиками упругости однонаправленного слоя, приведенными в [1] (рис.3).

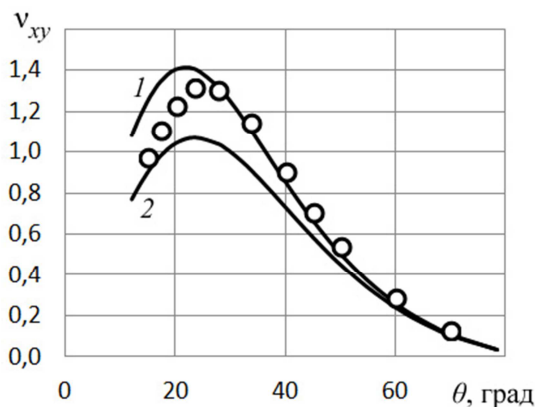


Рис.3. Зависимость коэффициента Пуассона от угла θ для структурной модели (сплошные линии) и композитов с разными углами укладки волокон (точки) [1].

1. Chen C.M., Kam T.Y. Elastic constants identification of symmetric angle-ply laminates via a two-level optimization approach // Composites Science and Technology. 2007. V.67. P.688-706.

О ЗАМКНУТОМ РЕШЕНИИ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ ДЛЯ КОНЕЧНОЙ ОРТОТРОПНОЙ ПОЛОСЫ СО СТАТИЧЕСКИМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ НА ПРОДОЛЬНЫХ КРОМКАХ

К.Д. Харченко¹, С.А. Лурье²

¹Московский Авиационный Институт, Москва, Россия; kirill19obninsk@yandex.ru

²Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

Аннотация: предлагается способ построения решения для задачи теории упругости. Рассматривается ортотропная полоса со статическими граничными условиями на продольных кромках. Данный способ состоит в построении основного балочного решения и системы корректирующих решений, с помощью которых представляется возможным удовлетворить краевые условия.

Ключевые слова: теория упругости, уточненные решения, вариационное решение.

Рассматривается широкий класс бигармонических задач прикладной теории упругости для прямоугольной ортотропной полосы со статическими граничными условиями на продольных кромках. Предлагается метод построения замкнутого решения. В представленном методе можно выделить следующие основные положения. В первую очередь ищется основное решение, под которым понимается приближенное решение теории стержней (типа Тимошенко) с учётом поперечного сдвига. Найденное так полиномиальное решение не удовлетворяет уравнениям равновесия теории упругости в перемещениях. В дальнейшем вводится корректирующее решение, позволяющее убрать невязку в уравнениях равновесия. Для построения такого решения в общем случае используются двойные тригонометрические ряды. Полученное представление удовлетворяет уравнениям равновесия, но вносит невязку в граничные условия на продольных (и поперечных кромках).

Для устранения невязки на продольных краях полосы (статические условия) строится еще одно корректирующее решение. Это решение строится через функцию напряжений (статические краевые условия) в форме разложений в тригонометрические ряды по продольной координате. В итоге построена функция, которая удовлетворяет уравнениям

равновесия и граничным условиям на продольных кромках точно. Однако краевые условия на торцах полосы остались невыполненными. Чтобы удовлетворить краевым условиям полосы строится основное корректирующее решение [1].

Для его построения применяется метод Власова-Конторовича и представление в форме разложений по отношению поперечной координаты по системе полных функций. В связи с тем, что краевые условия на продольных кромках являются статическими, то в соответствии с принципом Лагранжа (и методом Ритца) и уравнения равновесия и статические краевые условия при этом выполняются для минимизирующей последовательности, которая не обязана подчиняться статическим условиям. Выбирается такая последовательность, для которой система алгебраических уравнений имеет явное решение. При построении минимизирующей последовательности используются энергетически согласованные разложения в отношении поперечной координаты [2].

2. Васильев В.В., Лурье С.А. О сингулярности решения в плоской задаче теории упругости для консольной полосы // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2013. № 4. С. 40-49.
3. Vasiliev V.V., Lurie S.A. On refined theories of beams, plates and shells // Journal of Composite Materials. 1992. V. 26. № 4.

МАСШТАБНОЗАВИСИМЫЕ МОДЕЛИ СТЕРЖНЕЙ

С. А. Лурье¹, Е. И. Попова²

¹ Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

² Московский Авиационный Институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

На основе простейшей градиентной теории строятся неклассические модели стержней, которые учитывают влияние масштабных параметров структуры материалов. Вводятся условия корректности модели. Строится новая модель стержней Тимошенко и как частный случай модель стержней Бернулли.

Ключевые слова: неклассическая теория стержней, условия симметрии, масштабные эффекты.

Введение

В настоящее время представляет интерес деформирование тонких структур. Такие структуры используются в микроэлектронике и высокочувствительной аппаратуре. Для тонких структур возникает проблема учета масштабных эффектов, когда толщина структуры соизмерима с характерным масштабным параметром материала. Подобные эффекты невозможно учесть с помощью классической теории упругости, поскольку она не учитывает масштабные эффекты. Наоборот, градиентная теория упругости является весьма подходящей для моделирования масштабных эффектов, ибо по построению содержит дополнительные модули упругости, отличающиеся по размерности от классических модулей упругости.

В работе делается попытка построить уточненную масштабозависимую теорию стержней с использованием градиентной теории упругости.

Условие симметрии

Показано, сначала, что условием корректности модели является условие симметрии по второму, третьему, пятому и шестому индексам:

$$C_{ijklmp} = C_{ijklpm} \quad (1)$$

Кроме того тензор модулей градиентной упругости должен конечно удовлетворять условию потенциальности:

$$C_{ijklmn} = C_{lmnij k} \quad (2)$$

В результате моментные напряжения, также должны подчиняться условиям симметрии по последним индексам:

$$\mu_{ijk} = \mu_{ikj} \quad (3)$$

Уравнения неклассической теории стержней

Формально для построения теории стержней вводится кинематика определяющих

соотношений:

$$\begin{cases} r_1 = u(x) + \theta y \\ r_2 = w(x) \end{cases} \quad (4)$$

Далее используется обычная вариационная процедура.

В результате с учетом классических соотношений упругости, градиентной теории упругости (3), а также с учетом симметрии по первым двум индексам (теория градиентной деформации), получим следующие уравнения равновесия в перемещениях:

$$\begin{cases} \frac{\partial N}{\partial x} = 2h[(\lambda + 2\mu)u''(x) - (9C_1 + 6C_8)u''''(x)] = 0 \\ \frac{\partial M}{\partial x} - Q = (\lambda + 2\mu)\frac{2h^3}{3}\theta'' - (9C_1 + 6C_8)\frac{2h^3}{3}\theta'''' - \\ - 2h[\mu(\theta + w'(x)) - (5C_1 + 4C_8)\theta' - (2C_8 + C_1)w''(x)] = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial x} + P = 2h[\mu(\theta + w''(x)) - (5C_1 + 4C_8)\theta''' - (2C_8 + C_1)w''''(x)] + P = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Заключение

Особенность данной теории в том, что классическая изгибная жесткость остается неизменной, а масштабный параметр входит в множитель слагаемых, имеющих более высокий порядок. Так уточненная теория стержней Бернулли, которая является частной теорией, имеет шестой порядок. Только множитель при операторе шестого порядка определяет масштабные эффекты. Рассмотрены примеры статического деформирования стержней и представлены результаты для собственных частот размерозависимых стержней, дается сравнительный анализ с результатами, имеющимися в литературе.

Использование корректных моделей, учитывающих принцип симметрии, позволяют показать, что масштабные эффекты локализуются в окрестностях торцов стержней.

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ И СХЕМЫ АРМИРОВАНИЯ НА ВЯЗКОУПРУГИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИСТЕКЛОПЛАСТИКА

А.А. Баранов, Н.С. Обухова, С.В. Ворвуль, И.Н. Мишин, Е.Р. Лепикаш

ОАО «ОНПП «Технология», Обнинск, Россия; lepikash@technologiya.ru

Рассмотрено влияние толщины и схемы армирования на физико-механические свойства эпоксистеклопластика, изготовленного методом вакуумного формования.

Ключевые слова: радиопрозрачные укрытия, полимерные композиционные материалы, динамический механический анализ, компонентный состав.

Стеклопластики на основе терморезистивных связующих благодаря целому комплексу физико-механических и диэлектрических свойств находят широкое применение в изделиях различных отраслей промышленности. Значительный объем их применения приходится на изделия радиотехнического назначения.

Расширение областей применения, увеличение габаритов, задача повышения характеристик определяют соответствующие требования к свойствам используемых материалов и технологии изготовления радиопрозрачных укрытий (РПУ) из стеклопластиков, защищающих антенную систему от воздействия внешних климатических и силовых факторов [1].

При изготовлении РПУ, работающих в различных диапазонах частот и при воздействии отличающихся климатических факторов, толщина радиопрозрачной стенки может изменяться в широких пределах - от 1 до 10 мм. Однако паспортные данные на полимерные композиционные материалы, в том числе и стеклопластики, относятся к материалам с конкретной толщиной и схемой армирования. Вместе с тем изменение указанных показателей, как показывает практический опыт, приводит к существенным отличиям свойств формируемых материалов. Кроме того, даже для используемых ПКМ подобные данные практически отсутствуют.

Поэтому целью данной работы явилось исследование влияния толщины и схемы армирования на физико-механические и диэлектрические свойства эпоксистеклопластика, полученного методом вакуумного формования.

Объектом исследования служили образцы стеклопластика толщиной 1 – 8 мм на основе конструкционной стеклоткани Т-10 и эпоксифенольного связующего, имеющие по три варианта схемы армирования.

Для оценки свойств полученных материалов использованы следующие методы исследования:

- метод гелиевой пикнометрии для определения компонентного состава;
- динамический механический анализ для определения вязкоупругих свойств и температуры стеклования стеклопластика;
- метод определения прочности при статическом изгибе;
- метод определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Исследование компонентного состава анализируемых образцов с использованием метода гелиевой пикнометрии показывает, что объемное содержание

связующего в образцах всех трех схем армирования при изменении толщины от 1 до 8 мм увеличивается от 41 до 50 %. Максимальную пористость имеют однонаправленные образцы толщиной 1 мм – порядка 8 %, а минимальную пористость – 2 % образцы толщиной 4 мм.

Различие в компонентном составе соответственно определяет отличия в физико-механических и диэлектрических свойствах стеклопластиков. На рисунке 1, в качестве примера, представлены кривые изменения модуля упругости от температуры, полученные при испытаниях методом ДМА образцов с различной схемой армирования при толщине 1 мм. Следует отметить, отличия не только в уровнях значений и характере изменения модуля упругости, но и в изменениях температуры стеклования на 10 – 15 °С.

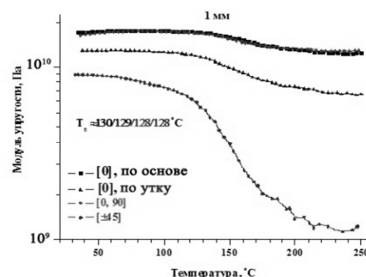


Рис. 1. Динамический механический спектр стеклопластика толщиной 1мм

Результаты испытаний при оценке статической прочности при изгибе показывают, что различия в прочности образцов в исследуемом интервале толщин при различных схемах армирования составляет 15 – 40 %. Аналогично изменяются и диэлектрические характеристики образцов стеклопластика.

Представленные результаты убедительно показывают, что для получения заданного уровня требуемых свойств изделий радиотехнического назначения необходимо при проектировании и изготовлении учитывать реальный уровень прочностных и диэлектрических характеристик для конкретной толщины и схемы армирования стеклопластика.

1. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков / Гуртовник И.Г., Соколов В.И., Трофимов Н.Н., Шалгунов С.Г. – М.: Мир, 2003. – 368 с.

ПЛАСТИЧЕСКОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ТРЕХСЛОЙНОЙ КОМПОЗИЦИОННОЙ ПОЛОСЫ ПРИ ОСАДКЕ МЕЖДУ ПЛОСКИМИ ШТАМПАМИ

Е.А. Лямина

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; lyamina@inbox.ru

Строится теоретическое решение для осадки трехслойной полосы между плоскими штампами (обобщение задачи Прандтля). Внутренний слой является идеально жесткопластическим, а внешние слои – жестковязкопластическими. Показано, что качественное поведение решения определяется зависимостью предела текучести вязкопластического материала от эквивалентной скорости деформации. Решение может быть сингулярным. В этом случае, существует коэффициент интенсивности скорости деформации.

Постановка задачи

Определение напряженно-деформированного состояния при плоском течении жесткопластической полосы с малым отношением толщины к ширине в процессе ее сжатия между параллельными шероховатыми плитами является одной из классических задач теории пластичности (задача Прандтля о сжатии полосы). Известны многочисленные обобщения оригинального решения. Обзор таких решений приведен в [1]. Отличительной особенностью на- стоящего решения является то, что рассматривается трехслойная полоса. Причем, внутренний слой является идеально жесткопластическим, а внешние слои – жестковязкопластическими. Текущая толщина внутреннего слоя равна $2h_i$, а каждого из внешних слоев – $h - h_i$. На поверхности контакта штампа и материала, а также на поверхности контакта двух материалов, действует закон максимального трения, в соответствие с которым удельные силы трения равны пределу текучести при чистом сдвиге. Краевые условия на поверхностях контакта штампа и материала, а также на поверхностях контакта двух материалов, выполняются точно. Краевые условия в центре и на торцах полосы выполняются в интегральном смысле. При выполнении режима проскальзывания решение является сингулярным. В частности, эквивалентная скорость деформации стремится к бесконечности при приближении к поверхности максимального трения. Разрушение исследуется по модели, предложенной в [2].

Модели материала

Определяющие уравнения материала внутреннего слоя в декартовой системе координат (x, y) состоят из условия текучести в виде

$$(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 4\sigma_{xy}^2 = 4k_0^2 \quad (1)$$

и ассоциированного закона течения в виде

$$\begin{aligned} \xi_{xx} &= \lambda(\sigma_{xx} - \sigma), \quad \xi_{yy} = \lambda(\sigma_{yy} - \sigma), \\ \xi_{xy} &= \lambda\sigma_{xy}, \quad \sigma = (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})/2, \quad \lambda \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy} – компоненты тензора напряжения, ξ_{xx} , ξ_{yy} , ξ_{xy} – компоненты тензора скорости деформации, k_0 – постоянный предел текучести при чистом сдвиге. Для материала внешних слоев уравнения (1) и (2) имеют силу. Однако, k_0 необходимо заменить на k_v и считать, что k_v зависит от эквивалентной скорости деформации, которая определяется как

$$\xi_{eq} = \sqrt{2/3}(\xi_{xx}^2 + \xi_{yy}^2 + 2\xi_{xy}^2)^{1/2}.$$

Результаты

Показано, что качественное поведение решения существенно зависит от поведения величины k_v при $\xi_{eq} \rightarrow \infty$. Решение при проскальзывании на поверхности трения материала и штампа возможно только если

$$k_v = k_s - k_\infty \xi_{eq}^{-\delta} + o(\xi_{eq}^{-\delta}), \quad \xi_{eq} \rightarrow \infty, \quad \delta \geq 2$$

При этом, эквивалентная скорость деформации изменяется по закону

$$\xi_{eq} = D/s^{1/2} + o(1/s^{1/2})$$

при $s \rightarrow 0$. Здесь s – расстояние до поверхности трения, D – коэффициент интенсивности скорости деформации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-11-00844).

1. Alexandrov S., Tzou G.-Y., Huang M.-N. Plane strain compression of rigid/perfectly plastic multi-layer strip between parallel platens // Acta Mech. 2006. V.184. No.1-4. P.103-120.
2. Spencer A.J.M. A theory of the failure of ductile materials reinforced by elastic fibres // Int. J. Mech. Sci. 1965. V.7. P. 197-209

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГАЗОФАЗНОГО ОСАЖДЕНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ КЕРАМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ ЭВОЛЮЦИИ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ

К.В. Михайловский, С.В. Резник

ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия, konst_mi@mail.ru

Аннотация: Данная работа посвящена моделированию и изучению процессов тепло- и массообмена происходящих на разных структурных уровнях в пористой углерод-углеродной заготовки детали на стадии осаждения керамической матрицы газозафазным методом. Проанализированы процессы образования матричного материала в порах различных характерных размеров с учетом технологических параметров процесса газозафазного осаждения.

Ключевые слова: математическое и численное моделирование, теплообмен, массообмен, микро- и макроуровень, детали из керамоматричных композиционных материалов.

К конструкциям и к материалам современных и проектируемых многоразовых космических аппаратов (МКА) предъявляются повышенные требования по их надежности во время эксплуатации. В МКА велика доля теплонагруженных элементов конструкций, которые подвергаются воздействию нестационарных тепловых потоков, скоростного напора, вибрационно-акустических нагрузок. Одними из перспективных материалов для теплонагруженных элементов конструкций МКА являются углерод-керамические композиционные материалы (УККМ) и керамоматричные композиционные материалы (ККМ), сочетающие в себе высокие механические свойства с высокой термической и окислительной стойкостью.

В настоящее время существует несколько технологий изготовления деталей и элементов конструкций из УККМ и ККМ, но наибольшими преимуществами обладают методы газозафазного осаждения (изотермический, термоградиентный, бароградиентный, а также их комбинации). В процессе газозафазного осаждения практически не происходит уменьшение физико-механических характеристик углеродного каркаса и конечного КМ по сравнению, например, с жидкофазными методами, где во время процесса возникает деградация углеродного волокна с образованием карбида кремния на стадии взаимодействия расплавленного кремния с углеродом волокна.

Процесс газозафазного осаждения зависит не только от температуры и давления, но и от характеристик подложки, размера пор в углеродном каркасе и, как следствие, производство однородной керамической матрицы является очень трудной технологической задачей. На стадии газозафазного насыщения формируются окончательные теплофизические и физико-механические свойства, а также эрозионная стойкость материала. Поэтому работоспособность деталей из УККМ и ККМ во время эксплуатации напрямую зависит от степени равномерности и однородности насыщения углеродного каркаса матрицей при газозафазном осаждении.

Работы по моделированию технологических процессов газозафазного осаждения активно проводятся в США, Франции, ФРГ, Великобритании, Японии, Китае, а также в России [1–3]. Однако, моделирование в основном осуществляется на од-

ном структурном уровне, преимущественно макроуровне, когда рассматривается особенность тепло- и массообмена в самом газозафазном реакторе, где располагается заготовка детали. Такие модели и расчеты позволяют осуществить оптимизацию компоновки садки, выполнить расчет температурных полей, но они не позволяют прогнозировать особенности процесса осаждения в пористой структуре. Существующие модели по расчету процессов тепло- и массообмена на микроуровне в порах разного размера позволяют оценивать только простую геометрию пор без учета их разветвленности и многообразия размеров.

На основе вышесказанного, можно констатировать, что проблема повышения технико-экономических характеристик процессов газозафазного осаждения и качества деталей и конструкций из УККМ и ККМ в настоящее время еще не получила своего адекватного разрешения. В связи с чем, настоящая работа нацелена на разработку математических моделей, которые позволяют спрогнозировать и адаптировать технологические параметры процесса газозафазного осаждения на стадии окончательного производства деталей и конструкций из УККМ и ККМ.

Математическая модель процесса включает в себя уравнения течения многокомпонентной газовой смеси с описанием протекания гетерогенных химических реакций на макро и микроуровне и уравнения сопряженного теплообмена в системе со сложной геометрией, а также в поровом пространстве. Математический аппарат базируется на уравнениях Навье-Стокса для многокомпонентной газовой смеси, а также на уравнениях химической кинетики (в частности, учитывает уравнение Аррениуса на реакционных поверхностях).

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-6573.2013.3.

Список литературы

1. Gupte S.M., Tsamopoulos J.A. Densification of porous materials by chemical vapor infiltration // *Electrochemical Society*. – 1989. – Vol. 136. – P. 555–561.
2. Allendorf M.D., Kel R.J. A model of silicon carbide chemical vapour deposition // *Electrochemical Society*. – 1991. – Vol. 138, No. 3. – P. 841–852.
3. Chungm G.-Y., McCoy B. Modeling of chemical vapor infiltration for ceramic composites reinforced with layered, woven fabrics // *American Ceramic Society*. – 1991. – Vol. 74, No. 4. – P.746–751.

ПРОЧНОСТЬ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО СЛОЯ ВНУТРИ МНОГОСЛОЙНЫХ ПАКЕТОВ С РАЗЛИЧНЫМИ СХЕМАМИ АРМИРОВАНИЯ

Л.П. Таирова, А.А. Смердов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; com-or@yandex.ru

Рассматривается напряженное состояние однонаправленных слоев составе многослойного углепластика с различными схемами армирования в момент разрушения. Исходные данные для анализа – результаты испытаний на растяжение и сжатие образцов с четырнадцатью схемами армирования. Показана возможность определения основных характеристик прочности слоя с использованием предлагаемого подхода. Ключевые слова: прочность, эксперимент, многослойный композит, предельная поверхность слоя.

Постановка задачи

Исходными данными при проектировании конструкций из многослойных композитов являются чаще всего характеристики упругости и прочности однонаправленного слоя. Экспериментальное определение этих характеристик на однонаправленных образцах, как показывает опыт проведенных исследований [1, 2], не обеспечивает необходимой точности прогнозирования характера деформирования и разрушения многослойных пакетов. Значительно улучшить результаты такого прогнозирования позволяет определение характеристик слоя с использованием избыточной экспериментальной информации о характеристиках упругости и прочности многослойных пакетов с различными схемами армирования. Для этого необходимо решить обратную задачу – задачу определения таких характеристик слоя, которые обеспечивают наилучшее соответствие расчета и эксперимента для значительного количества структур из исследуемого материала. Решение такой обратной задачи для характеристик упругости слоя как ортотропного материала в условиях плоского напряженного состояния представлено, например, в [1, 2 и др.]. Для характеристик прочности решение подобной задачи осложняется тем, что наиболее подходящий критерий прочности слоя заранее неизвестен. В настоящей работе рассматривается возможность построения предельной поверхности слоя в координатах напряжений при плоском напряженном состоянии с использованием экспериментальных значений прочности многослойных пакетов.

Экспериментальные данные

Исходными данными для анализа явились результаты испытаний на растяжение и сжатие углепластика со следующими схемами укладки волокон относительно продольной оси образца:

0°_8 , 90°_8 , $\pm 20^\circ_4$, $\pm 70^\circ_4$, $\pm 40^\circ_4$, $\pm 50^\circ_4$, $90^\circ_4/0^\circ_4$, $(0^\circ_2/\pm 45^\circ)_2$, $(90^\circ_2/\pm 45^\circ)_2$, $0^\circ_2/\pm 60^\circ_4$, $90^\circ_2/\pm 30^\circ_4$, $90^\circ_3/\pm 40^\circ_3$, $0^\circ_3/\pm 50^\circ_3$, $(\pm 60^\circ/\pm 30^\circ)_2$

Для каждой схемы армирования было испытано 2-4 одинаковых образца, для анализа использовались средние значения прочности этих образцов. На растяжение испытаны образцы – лопатки или образцы – полоски толщиной 1÷2 мм. На сжатие испытаны трехслойные образцы с со-

товым наполнителем и обшивками из исследуемого материала той же толщины, что и при испытаниях на растяжение. В процессе испытаний проводилось измерение продольных и поперечных деформаций, позволившее определить характеристики упругости для всех исследованных структур. По этим данным решена обратная задача – задача идентификации характеристик упругости слоя по характеристикам упругости многослойных пакетов. В дальнейшем именно эти характеристики слоя использовались при вычислении напряжений в слоях в момент разрушения.

Результаты и их обсуждение

При определении напряжений во всех слоях каждого пакета при плоском напряженном состоянии (НС) в момент разрушения использовались типичные гипотезы послойного анализа: совместное деформирование слоев и соблюдение условий равновесия. После определения напряжений в слоях в момент разрушения для каждого пакета определялись максимальные по абсолютной величине значения напряжений каждого типа. Соответствующее этим напряжениям НС наносилось в виде точки на предполагаемую предельную поверхность в пространстве напряжений.

После окончания этой работы для всех исследованных структур оказалось, что наблюдаются большие разбросы напряжений по предполагаемой предельной поверхности. Среди всех нанесенных точек отброшены находящиеся явно внутри предельной поверхности и потому не соответствующие предельному состоянию материала. Остальные точки аппроксимированы с использованием критерия максимальных напряжений. Оказалось, что этот критерий удовлетворительно соответствует имеющимся экспериментальным данным (с учетом имеющихся разбросов).

Ссылки на использованные источники

1. Исследование деформативных и прочностных характеристик углепластика на плоских и трехслойных образцах / А.М. Думанский, А.А. Смердов, Л.П. Таирова // Вторая МНТК "Аэрокосмические технологии" - 2009

2. Экспериментальное исследование жесткостных и прочностных характеристик углепластика. / А.А. Смердов, Л.П. Таирова, С.В. Цветков, С.В. Тащилов, И.В. Магнитский // Конструкции их композиционных материалов – 2009. - №3.- С.68-82

Определение механических характеристик и кинетических параметров термодеструкции полимерных композиционных материалов при высокоинтенсивном нагреве

Якушкин П.Ю., Забейайлов М.О., Кордо М.Н.

ГНЦ РФ ОАО «ОНПП «Технология», г. Обнинск, Россия; pawel.jakushkin@yandex.ru

В данной работе был разработан метод определения прочности композиционных материалов, который позволяет определять механические характеристики КМ при нагреве со скоростями до 20 °С/с до температур 1000 °С посредством индукционного нагрева металлических пластин нагревателя. Данный метод позволяет приблизить тепловые условия испытания КМ к условиям его эксплуатации при высоких тепловых нагрузках в перспективных летательных аппаратах.

Для реализации высокоинтенсивного нагрева экспериментального образца необходимо за короткое время достичь равномерного прогрева всей площади рабочей зоны образца ПКМ, что является достаточно сложной технической задачей. Наиболее простым и эффективным представляется метод индукционного нагрева. Индукционный нагреватель позволяет осуществлять быстрый нагрев металлической части промежуточного нагревательного элемента с возможностью точного автоматического управления нагревом, что является существенным для реализации высокоинтенсивного нагрева КМ по заданному режиму.

При разработке метода испытаний образцов КМ было предложено осуществлять нагрев рабочей зоны образца посредством индукционного нагрева промежуточных металлических нагревательных элементов.

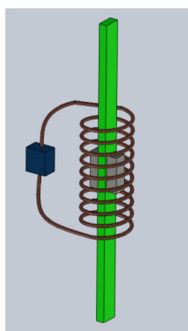


Рис. 1. Вид образца на растяжение в процессе испытания при индукционном нагреве.

Из тепловых расчетов образца КМ следует, что рекомендуемым режимом нагрева является выход на температуру испытаний 1000 °С за 60 секунд с последующей выдержкой не менее 20 секунд для образца на неорганическом связующем и выход на температуру 600 °С за 70 секунд для образцов на органическом (рис.2). При таком режиме рабочая зона образца прогревается полностью и равномерно, а термические напряжения, возникающие в образце при его быстром нагреве, не превышают 3% от разрушающей нагрузки.

Эксперимент показал хорошее соответствие с результатами расчетов – время выхода на температуру испытаний 1000 °С составляет ~50 с. Таким образом, рассматриваемая конструкция образца и

системы нагрева позволяет реализовать температурный режим рабочей части образца из КМ, близкий к эксплуатационному и корректно провести испытания образца при осевом растяжении.

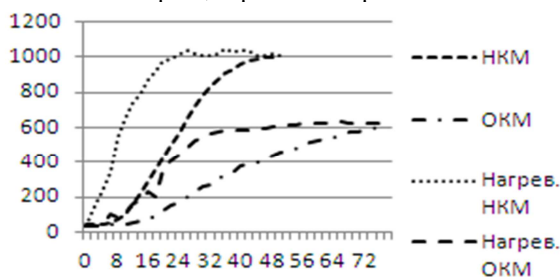


Рис. 2. Термограммы, измеренные в процессе индукционного нагрева образцов КМ

По результатам проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Предложены и обоснованы расчетным и экспериментальным путем методы определения прочности при растяжении композиционных материалов, который позволяет определять прочность при нагреве рабочей зоны образца со скоростью до 20 °С/с до температур 1000 °С посредством индукционного нагрева промежуточных металлических нагревательных элементов.

2. Проведены испытания и получены прочностные характеристики для органического и неорганического композиционного материалов

3. Были получены кинетические параметры термодеструкции композиционного материала по его прочностным свойствам. С помощью полученных данных в дальнейшем можно будет проводить прогнозирование прочностных свойств при эксплуатационных режимах КМ.

1. Карпинос Д.М. Композиционные материалы. Справочник – Киев, Наукова думка, 1985 – 588с.

2. Киселев Б.А., Бруевич В.Н., Кудишина В.А. и др. Влияние длительного воздействия высоких температур на механические свойства и микроструктуру стеклотекстолита на алумофосфатном связующем // Изв. АН СССР. Неорган. Материалы. 1973. Т.9. №4. С 692-696.

3. Шевченко А.А. Физикохимия и механика композиционных материалов: Учебное пособие для вузов. – СПб. : ЦОП «Профессия», 2010. 224 с

О ВЛИЯНИИ ПЛОЩАДИ КОНТАКТА ПРИСОЕДИНЕННОЙ МАССЫ НА СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ КРУГОВОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

С.В. Серёгин, О.Е. Сысоев¹

¹ ФГБОУ ВПО "КнАГТУ", Комсомольск-на-Амуре, Россия

Методом конечных элементов изучается влияние площади присоединения массы к оболочке на собственные частоты колебаний. Обнаружено, что уменьшение размеров площадки ведет к заметному снижению меньшей из расщепленных собственных частот низшего тона. Большая из расщепленных частот снижается с увеличением площади контакта, при этом снижение может быть, весьма, значительным.

Ключевые слова: собственные колебания круговой цилиндрической оболочки, присоединенная масса.

Методом конечных элементов (МКЭ) в среде пакета MSC/NASTRAN смоделирована модель свободно-опертой круговой цилиндрической оболочки.

На рис. 1 представлена безразмерная частота $\Omega_{n0i} = \omega_{n0i} / \omega_n$, ($i=1,2$) изгибных колебаний системы «оболочка–масса», где ω_{n0i} – частота колебаний оболочки с массой, ω_n – частота колебаний оболочки без массы. Сплошной кривой 1 обозначена безразмерная частота оболочки, несущей сосредоточенную массу; пунктирной кривой 2 обозначен случай, когда масса имеет площадь присоединения с оболочкой $\zeta_{np} = 0,2\%$; штриховой кривой 3 – $\zeta_{np} = 0,7\%$; штрихпунктирной линией обозначен случай, когда площадь контакта присоединенной массы $\zeta_{np} = 3\%$.

На рис. 1, при $M = 0,1M_0$ представлена зависимость меньшей из расщепленных собственных частот Ω_{n01} от ζ_{np} , n , где n – число вол в окружном направлении.

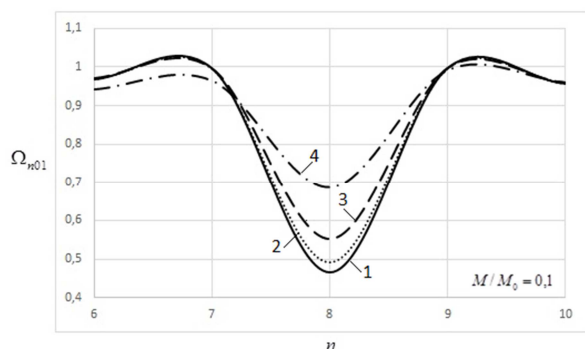


Рис. 1. Влияние площади контакта «сосредоточенной» массы с оболочкой на меньшую из расщепленных собственных частот

Видно (рис. 1), что с увеличением ζ_{np} влияние присоединенной массы на Ω_{n01}

ослабевает, то есть: наибольшее снижение частоты наблюдается в случае, когда площадь контакта массы с оболочкой минимальна.

Увеличение и уменьшение частоты Ω_{n01} , в зависимости от ζ_{np} , происходит, по-видимому, не только из-за изменения величины присоединяемой к оболочке массы, но и в следствие увеличения жесткости некоторого сегмента оболочки, обусловленной сплошным присоединением дополнительной массы, имеющей свою жесткость.

Выводы. Размер площади контакта присоединенной массы значительно влияет на динамическое поведение круговых цилиндрических оболочек. Наибольшее влияние присоединенная масса оказывает на низшие частоты свободных изгибных колебаний системы «оболочка–масса», при этом *уменьшение* размеров площадки контакта массы с оболочкой ведет к заметному *снижению* меньшей из расщепленных собственных частот.

Наибольшее изменение меньшей из расщепленных собственных частот Ω_{n01} низшего тона колебаний происходит в диапазоне площади сплошного контакта конструкции с оболочкой $0,001\% \leq \zeta_{np} < 0,5\%$. В диапазоне $\zeta_{np} > 0,5\%$ изменение Ω_{n01} менее существенное.

1. Кубенко, В. Д. Нелинейное взаимодействие форм изгибных колебаний цилиндрических оболочек / В.Д. Кубенко, П.С. Ковальчук, Т.С. Краснополянская. Киев: Наук. думка, 1984. – 220 с.
2. Серёгин С. В. Исследование динамических характеристик оболочек с отверстиями и присоединенной массой // Вестник МГСУ. 2014. №4. – С. 52-58.
3. Серёгин С.В. Влияние присоединенного тела на частоты и формы свободных колебаний цилиндрических оболочек // Строительная механика и расчет сооружений, 2014. №3. С. 35 – 39

АНАЛИЗ РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ТКАНЕВОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА ТРЕХТОЧЕЧНЫЙ ИЗГИБ

В.А. Комаров, Е.А. Кишов, Р.В. Чарквиани

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), г. Самара, Россия; vkomarov@ssau.ru, eakishov@yandex.ru, oneram@yandex.ru

В работе проведено численно-экспериментальное исследование поведения образцов из тканевых слоистых композитов в виде коротких балок при испытаниях на трехточечный изгиб. Делается предположение о причинах нетипичного разрушения. Для анализа напряженно-деформированного состояния построена конечно-элементная модель образцов.

Рассматривается задача экспериментального определения межслоевых прочностных характеристик композиционного материала на основе эпоксидного связующего RTM6, армированного углеволоконной тканью Hexcel полотняного плетения.

Для определения межслоевой прочности композиционных материалов использован метод трехточечного изгиба короткой балки [1].

Результаты испытаний соотносятся с возможными вариантами разрушения [2], (Рис. 1).

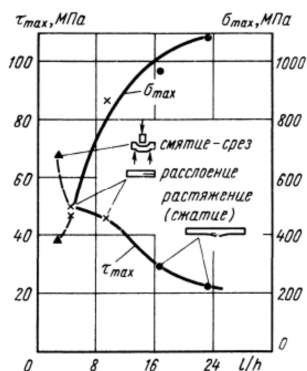


Рис. 1. Зависимость максимальных нормальных и касательных напряжений и характера разрушения при трехточечном изгибе от относительного пролета l/h

Образцы изготавливались по технологии RTM (Resin Transfer Molding, инъекционное литье). Геометрия образцов: $10 \times 30 \times 5$ мм ($l/h = 6$) соответствует стандарту [1]. Разрушение образцов в ходе испытаний происходило следующим образом (Рис. 3):

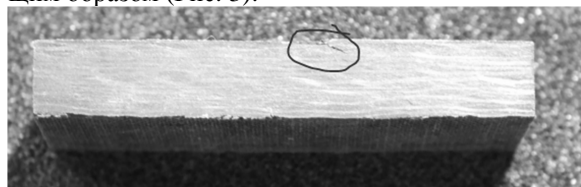


Рис. 2. Образец после проведения испытаний

Более подробно зона разрушения показана на Рис. 3.

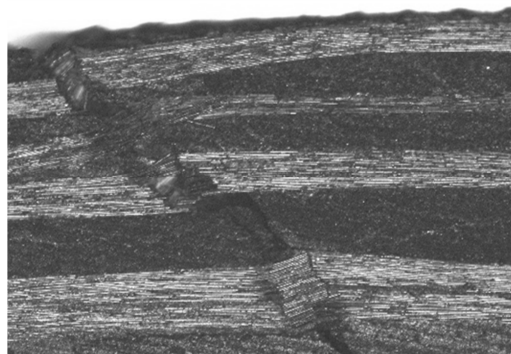


Рис. 3. Зона разрушения образца

Наблюдалось нетипичное разрушение образца. Для анализа причин разрушения построена конечно-элементная модель в системе ANSYS.

Исследовано распределение межслоевых касательных и нормальных напряжений (Рис. 4)

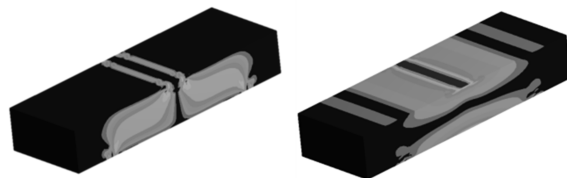


Рис. 4. Распределение межслоевых касательных (слева) и нормальных напряжений (справа)

На основании распределения внутренних силовых факторов проводится анализ возможных причин разрушения.

1. ASTM D 2344/D 2344M-00: Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates

2. Васильев, В. В. Композиционные материалы: справочник [Текст] / В. В. Васильев, В. Д. Протасов, В. В. Болотин и др.—М.:Машиностроение, 1990. — 512 с.

НАСЛЕДСТВЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

Шебанов С.М.¹ Куриченко А.А.²

¹Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН, shebanov_s@mail.ru

²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия.

Аннотация

В работе представлены экспериментальные данные полученные методом плоских температурных волн в области температур 600-2000К, показывающие влияние температуры и времени термообработки на теплопроводность углепластиков с различной структурой армирования. Показана необходимость учёта фактора времени на текущее значение теплопроводности при расчёте температурных полей в композиционных материалах. Предложена математическая модель изменения коэффициента теплопроводности как функция температуры и времени.

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности, температура и время термообработки, эксперимент, модель

Введение. Цель исследования.

Композиционные материалы и в частности углепластики традиционно используются в высокотемпературных узлах авиационно-ракетной техники. Проектирование таких узлов сталкивается с проблемой учёта темпа нагрева материала деталей, особенно в высокотемпературных газовых каналах. Цель настоящей работы-получить воспроизводимые экспериментальные данные по теплопроводности в нестационарных условиях на теплофизической установке и затем распространить их на условия с высоким темпом нагрева.

Материалы и методы исследования.

В качестве основных материалов исследования были взяты углепластики на фенольном связующем с хаотичной структурой армирования, практически изотропные, и прессованные, на тканой основе, анизотропные. Измерения проводились на установке методом плоских температурных волн [1] в условиях ступенчатого подъёма температур с шагом регистрации теплопроводности 30-60 секунд. За один такой временной шаг производилось порядка 100 параллельных измерений при невысоких темпах нагрева. Статистика достаточная для фиксирования статистически значимой разницы величин теплопроводности.

Результаты и их обсуждение

Изменение коэффициента теплопроводности углепластика с хаотичной структурой армирования при ступенчатом повышении температуры приводится на рис.1. Обработка результатов с использованием теории кинетики процессов, основанной на сочетании скоростей образования и роста в твёрдом теле трёхмерных зародышей новой фазы [2] позволило получить для описания изменения коэффициента теплопроводности при изменении температуры во времени, т.е. с учётом нестационарности процесса изменения свойства материала, систему из 3-х дифференциальных уравнений, которые в качестве опорных коэффициентов содержат функции, аррениусовского типа, зависящие только от температуры и определяемые экспериментально на теплофизической установке

при малых скоростях подъёма температуры.

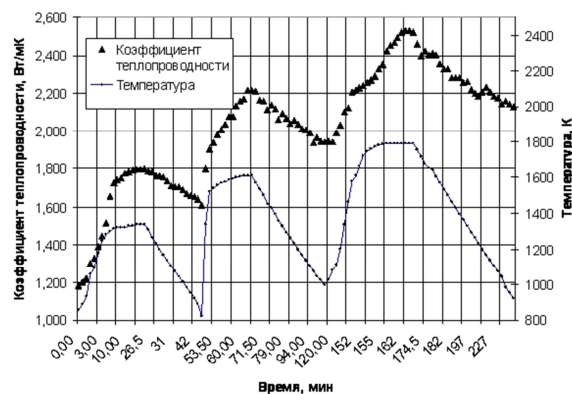


Рис.1 Теплопроводность углепластика с хаотичной структурой армирования при ступенчатом повышении температуры.

Экспериментально-расчётная проверка возможности использования полученных результатов проводилась на высокотемпературном стенде лучистого нагрева. На цилиндрических образцах из тех же материалов, из которых изготавливались образцы для теплофизических исследований, определялись температурные профили по толщине материала при плотности подающего теплового потока до 1000 Вт/см² и сравнивались с рассчитанными. Расчёты показали адекватность разработанной математической модели коэффициента теплопроводности углепластика в условиях темпа нагрева до 1200К/сек, тем самым подтвердив корректность распространения полученных экспериментальных данных в нестационарных условиях при малых скоростях подъёма температуры на промышленно важные величины порядка 1000 К/сек.

Библиографический список:

1. Шебанов С.М. Куриченко А.А. Ивлиев А.Д. Экспериментальная установка для определения теплофизических характеристик материалов в высокотемпературной области//Наука производству №7 2004
2. Дельмон Б. Кинетика гетерогенных реакций.-М.: "Мир".-1972.-554с

Деформации нанокompозита многослойные углеродные нанотрубки-эпоксидная смола в нелинейной области

Шебанов С.М.¹

¹Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН, shebanov_s@mail.ru

Аннотация

В работе представлены экспериментальные данные по деформированию нанокompозита эпоксидная смола DER331-многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ). Показано изменение характера деформирования эпоксидной смолы при введении в неё МУНТ.

Ключевые слова: Нанокompозит, многослойные углеродные нанотрубки эпоксидная смола, деформирование нелинейная область

Введение. Цель исследования

В работе [1] получено увеличение до 30-40% прочностных характеристик стеклопластиков и органопластиков при введении в эпоксидную смолу-основной компонент матрицы композиционного материала до 0,05% масс МУНТ. В работе [2] получено увеличение прочностных характеристик углепластика до 75% при введении в эпоксидную смолу менее 0,1% масс МУНТ. Цель настоящей работы-получить особенности деформирования материала матрицы композиционного материала при введении углеродных нанотрубок в нелинейной области деформирования. Результаты исследований могут дать побудительный импульс для использования МУНТ в технологии конструкционных композиционных материалов.

Материалы и методы исследования.

Использовались МУНТ, полученные каталитическим пиролизом метана на никель-кобальт-молибденовом катализаторе. Диспергирование МУНТ в эпоксидной смоле производилось ультразвуком при удельной мощности на 40Вт/см². На рис.1 представлены изображения МУНТ, диспергированные в эпоксидной смоле до индивидуального состояния.

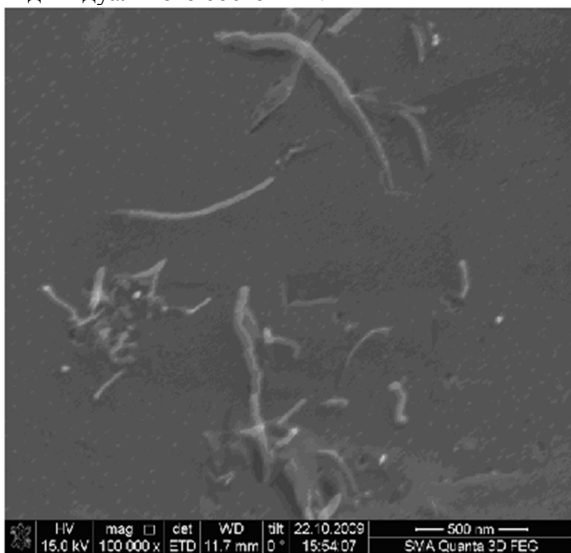


Рис. 1. МУНТ, диспергированные в смоле, увеличение 100000*. Получено на сканирующем электронном микроскопе Quanta 3D

Смесь смолы с отвердителем заливалась в фторопластовые литьевые формы и отверждалась. Цилиндрические образцы полученного нанокompозита испытывались на однократное и много-

кратное сжатие на разрывной машине ИР 5010. Кривая однократного сжатия цилиндрических образцов эпоксидной смолы и эпоксидной смолы с 0,3-0,35% масс МУНТ представлена на рис.2

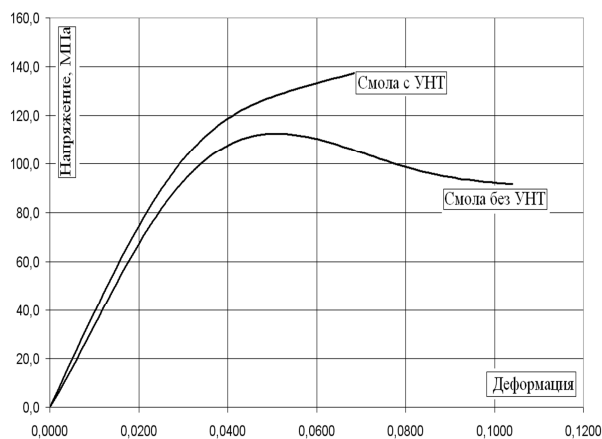


Рис. 2. Кривые деформирования при сжатии

Следует отметить, что при использованном однократном деформировании образец эпоксидной смолы разрушился, а образец, содержащий МУНТ восстановил исходные размеры. При дальнейшем многократном деформировании нанокompозит не был разрушен.

Выводы.

При деформировании в нелинейной области нанокompозит эпоксидная смола-МУНТ обладает существенными преимуществами перед эпоксидной смолой, что показывает перспективность его использования для изготовления устройств, подверженным вибрациям.

Библиографический список:

1. Шебанов С.М., Чунаев В.Ю., И.В.Тихонов И.В., Бова В.Г., Кайсина Т.В. Прочностные характеристики композиционных материалов с полимерной матрицей, содержащих углеродные нанотрубки//ОБОРОННЫЙ КОМПЛЕКС-научно-техническому прогрессу России, 2008, №. С 44-45
- 2 Шебанов С.М., Чунаев В.Ю., Кайсина Т.В. Повышение прочностных характеристик углепластиков при модификации полимерной матрицы углеродными нанотрубками//ОБОРОННЫЙ КОМПЛЕКС-научно-техническому прогрессу России, 2009, №1. С 19-21

СОБСТВЕННЫЕ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ АНИЗОТРОПНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ ЛОПАТОК И СТЕРЖНЕЙ С ПЕРЕМЕННЫМИ ФИЗИКО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Нурибегов А.У.

ФГБОУ ВПО Московский авиационный институт (НИУ), Москва, Россия; alibek_55@mail.ru

В работе, составлена программа, позволяющая численно определить напряжено-деформированное состояние (н.д.с) слоистой композиционной лопатки, находящихся в поле центробежных сил. Лопатка, исследованное в данной работе, представлено тремя сечениями.

Ключевые слова: Кручение, жесткость, перемещение, напряжение, слой, композиционный материал, растяжение, раскрутка, изгиб, колебание, центробежная сила

Современные композиционные материалы (КМ), обладающие высокими удельными значениями прочности и жесткости, широко используются в современной технике (авиастроение, судостроение, автомобилестроение и т.д.). Характерной особенностью КМ является анизотропия их физико-механических свойств в плоскости укладки слоев армирующего материала, что, с одной стороны, существенно усложняет расчет и проектирование конструкций из них, а с другой - позволяет создавать изделия с управляемыми (регулируемыми) свойствами. Одним из примеров подобных технических решений является создание несущих лопастей вертолетов с саморегулирующимся углом атаки, позволяющих избегать флаттера за счет оптимального армирования.

При создании КМ и изделий из них важнейшее значение имеет прогнозирование упругих характеристик конструкций по известным свойствам монослоев. Для этого необходимо располагать полным набором упругих характеристик материалов монослоев, компонуемых в конструкцию. При переходе к слоистым конструкциям, состоящим из совокупности жестких и мягких слоев, ситуация становится еще сложнее и известны работ, посвященных исследованию их затухающих колебаний. Учет эффекта трансверсального сжатия позволит более полно выявить особенности поведения указанных конструкций. В качестве такого объекта в настоящей работе рассматривается многослойный лопатка и стержень, состоящая из пакета анизотропных монослоев, и мягкого слоя из изотропного материала.

Дифференциальные уравнения которой получаются применением принципа минимума потенциальной энергии позволяет достаточно хорошо описать глобальное поведение стержня, т.е. определить прогибы, собственные частоты и критические нагрузки. Однако, для исследования распределения напряжений по толщине стержня в областях разрыва непрерывности, например, на границах, требуется более сложная теория. На границах межслойные напряжения создают "эффект пограничного слоя", в соответствии с которым напряжения между слоями различных материалов отличны от нуля.

С целью учета трехмерного напряженного состояния, пренебрегаемым в классической теории слоистых материалов, разработаны полупространственная теория, в которых каждый слой считается однородно ортотропным. Таким образом, получена связанная система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая упругие собственные колебания слоистых анизотропных стержней из КМ и соответствующие ей граничные условия.

Далее рассмотрены различные частные случаи общей вариационной задачи. Изучена анизотропный слоистый стержень произвольного сечения, уравнения движения которой получены в предположении справедливости гипотез Кирхгофа-Лява. В данном случае вариационное уравнение значительно упрощается, что позволяет решить его, используя различные методы (применение метод Галеркина, метод Ритца) и получить большое количество разнообразных результатов.

На примере лопатки исследуется влияние взаимодействия компонентов композиции на свободные колебания армированных тел. При сильном взаимодействии компонентов КМ, полученное уравнение частот определяет одну собственную частоту, величина которой мало отличается от частот, найденных на основе теории "эффективных" модулей. При слабом взаимодействии компонентов композиции, что реализуется при больших частотах с малой длиной волны, колебанию стержня соответствуют две собственные частоты, отличающиеся от частот двух стержней идентичных размеров, но изготовленных отдельно из материала матрицы и отдельно из материала наполнителя.

Вычисленные на основе полученных соотношений значения собственных частот низших (первых трех) форм колебания стержня прямо-угольного поперечного сечения из стеклопластика удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

1. Для анализа изгибных колебаний незакрученного армированного стержня, имеющего лопаточ-ный профиль постоянной толщины, используется обобщенный на слоистые среды принцип Гамильтона.

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА СДВИГ В ПЛОСКОСТИ ЛИСТА

В.Д. Крылов, В.С. Ерасов, Н.О. Яковлев

ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва, Россия; krylov.vladimir@gmail.com

Аннотация

Экспериментально получены диаграммы деформирования стеклопластика ВПС-31, углепластика IMS и гибридного материала ВКГ-5 на их основе, а также углепластика ВКУ-28 при сдвиге в плоскости листа. Исследовано влияние количества слоев и скорости деформирования на сдвиговые характеристики при растяжении образцов углепластика ВКУ-28 со схемой армирования $[\pm 45]_n$.

Ключевые слова: сдвиг в плоскости листа, модуль сдвига, прочность при сдвиге, полимерный композиционный материал, углепластик, стеклопластик, гибридный материал.

Для расчета высоконагруженных элементов авиационной техники (лонжеронов, лопастей несущих и рулевых винтов вертолетов и др.) на этапе проектирования требуется определение характеристик полимерный композиционный материал (ПКМ) при сдвиге в плоскости листа: модуля и прочности при сдвиге.

В данной работе было проведено сравнение сдвиговых характеристик образцов конструкционных ПКМ: стеклопластика ВПС-31, углепластика IMS и гибридного материала ВКГ-5 на их основе, углепластика ВКУ-28 при испытании по ASTM D3518 (полосы со схемой армирования $[\pm 45]_{ns}$) и по ГОСТ 24778 (образцы в форме крестовины испытывались в шарнирной раме – четырехзвеннике).

Испытания по ГОСТ 24778 проводили на образцах с длиной стороны квадратного рабочего поля 50, 70 или 100 мм, образцах на «продольный» сдвиг при схеме армирования $[\pm 45]_{ns}$ и на «диагональный» сдвиг при схеме армирования $[0;90]_{ns}$; по ASTM D 3518 – на образцах шириной 25 мм и толщиной набранной из 16, 20 и 24 слоев.

Получено, что модуль сдвига гибридного материала ВКГ-5 лежит в границах значений модуля стеклопластика ВПС-31 и углепластика IMS «рис. 1», и коэффициент Пуассона данных материалов одинаковый (в пределах ошибки измерения).

Увеличение количества слоев на примере испытания углепластика ВКУ-28 приводит к увеличению прочности при сдвиге при скоростях деформирования в диапазоне от 10^{-3} до 10^{-2} с⁻¹, при этом модуль сдвига сохраняется «рис. 2». С увеличением количества слоев наблюдается сужение области между диаграммами деформирования при скоростях 10^{-2} и 10^{-3} с⁻¹.

Таким образом, применение гибридных материалов в конструкциях авиационной техники позволяет добиться необходимых требуемых упруго-прочностных характеристик с выигрышем по весовой эффективности. Оценку физико-механических свойств материалов следует

проводить при постоянной скорости деформирования в процессе испытаний.

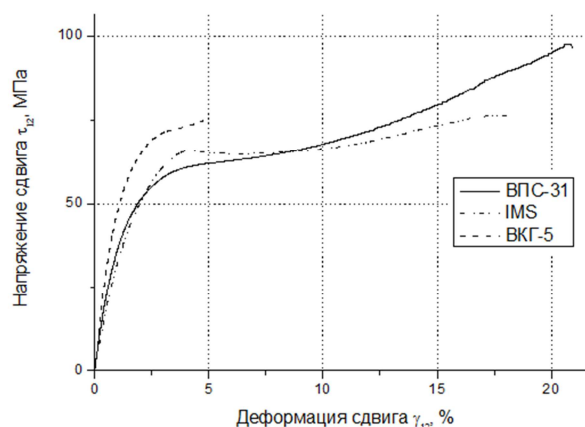


Рис. 1. Диаграммы сдвига, полученные на образцах в форме полосок из материалов ВПС-31, IMS и ВКГ-5, схема армирования $[\pm 45]_{24}$.

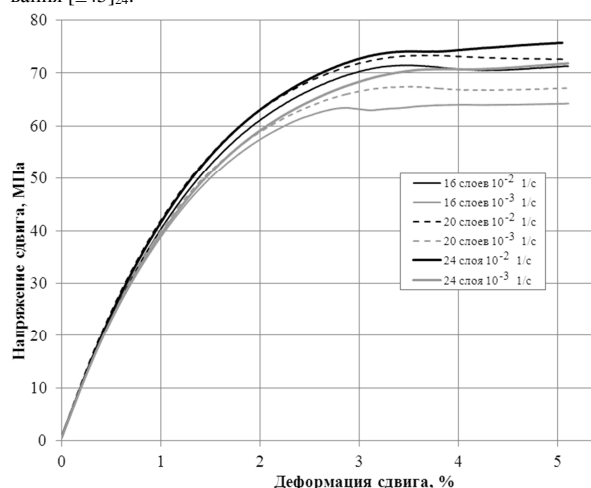


Рис. 2. Диаграммы деформирования при испытании на сдвиг в плоскости листа образцов углепластика ВКУ-28 с 16, 20 и 24 слоями при жестком режиме нагружения.

Испытания проводились на оборудовании ЦКП «Климатические испытания» ФГУП «ВИАМ».

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ НА КОРРОЗИОННЫЙ ИЗНОС

Гиниятуллин Р.Р., Якупов Н.М.

Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН, Казань, Россия; Rishat Giniyatullin <true_way@mail.ru>

Введение. Структура материала элементов конструкции во многом определяют их свойства. При этом особое значение имеет структура и свойство приповерхностного слоя. У металлических элементов морфология, фазовый состав и дислокационная структура поверхностных слоев определяют износостойкость, предел выносливости, жаростойкость и другие характеристики. В связи с этим Большой интерес представляет метод ионной имплантации, позволяющий внедрить в металл дозированное количество ионов практически любых элементов без изменения границ его зерен.

Ионная имплантация – метод, основанный на внедрении в твердое тело ускоренных в электростатическом поле ионизированных атомов или молекул с энергией от нескольких килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт.

Среди областей применения метода ионной имплантации можно отметить имплантационную металлургию – облучение конструкционных материалов и готовых деталей потоками ионов, приводящих к увеличению их износостойкости, коррозионной стойкости, твердости и другие.

Много работ посвящено исследованию изменений механических свойств поверхности металлов. Повышение микро твердости стали наблюдалось после имплантации ионов азота, аргона, бора и углерода [1]. При имплантации ионов азота микро твердость стали возрастает по Виккерсу с 300 до 400 кг [2].

Нами были проведены экспериментальные исследования по изучению влияния ионной имплантации образцов на процесс коррозионного износа [3,4], используя для анализа полученных данных экспериментально - теоретический метод [5-7].

Влияние ионной имплантации на коррозионный износ. Были проведены испытания на коррозионный износ трех пар металлических образцов из листовой стали марки Сталь 3 толщиной $t = 0.5$ мм, поверхности которых были подвергнуты импульсной ионной имплантации атомами углерода С. Образцы выдерживались в агрессивной среде (10% соляная кислота – HCl). В каждой группе образцов имелся «чистый» образец (поверхность не подвергалась ионной обработке), которые находились рядом со своей парой и в одинаковых условиях.

Образцы находились в агрессивной среде разное время: группа №1 – 2 суток, группа №2 – 3 суток,

группа №3 – 4 суток. Далее образцы были проанализированы экспериментально - теоретическим методом [5-7].

Выполнен анализ полученных результатов. На рис.1 приведены кривые деформирования «прогиб H - давление P » для имплантированных образцов.

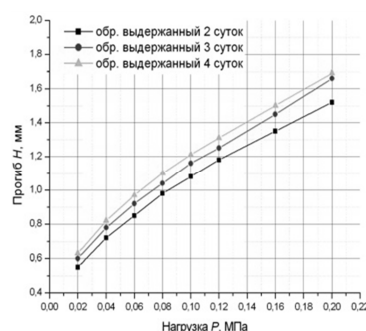


Рис. 1. Зависимость прогиб - давление для имплантированных образцов

Построены также другие кривые, в частности, кривые деформирования «прогиб H - давление P » для имплантированных и не имплантированных образцов.

Заключение: Поверхностная обработка образца ионной имплантацией способствует снижению коррозионного износа. Эффект ионной имплантации уменьшается с увеличением времени выдержки в агрессивной среде.

2. Pavlov, A. V.; Pavlov, P. V.; Zorin, E. I.; Tetel'baum, D. 1.: Proc. All Soviet Meeting on Ion Beam Physics, Kiev. 1974.
3. Gabovich, M. D.; Budernaya, L. D.; Poritskii, V. Y.; Protsenko, I. M.: All Soviet Meeting on Ion Beam Physics. Kiev. 1974.
4. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р. Коррозионный износ тонкостенных элементов обработанных методом ионной имплантации. // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. №3, 2011. С.74-79.
5. Якупов Н.М., Гиниятуллин Р.Р. Коррозионный износ тонкостенных элементов при воздействии внешних факторов // Актуальные проблемы механики сплошной среды. К 20-летию ИММ КазНЦ РАН. Т.2. Казань: Фолиант, 2011. С.203-212.
6. Якупов Н.М., Галимов Н.К., А.А. Леонтьев А.А. Экспериментально-теоретический метод исследования прочности полимерных пленок // Механика композиционных материалов и конструкций. 2000. Т.6, № 2. С.238-243.
7. Якупов Н.М., Галявиев Ш.Ш., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н. Состояние конструкций градиент и предотвращение их разрушения // Известия вузов. Проблемы энергетики, 2006. №7-8. С.36-42.
8. Якупов Н.М., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н. Методика испытания пленок и мембран в условиях равномерного распределенного поверхностного давления // Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2008. Т.74. №11. С.54-56

НЕУПРУГАЯ ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ СЛОИСТЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ КАК ЭВОЛЮЦИОННЫЙ ПРОЦЕСС НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ

П.Б. Северов, Ю.Г. Матвиенко, В.И. Иванов, А.М. Думанский

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; alpinprom@yandex.ru

Аннотация: рассматриваются вопросы накопления повреждений и разрушения образцов из многослойного однонаправленного углепластика с позиций методологии неупругого деформирования и разрушения твердых тел и сред в процессе их эволюции.

Ключевые слов: акустическая эмиссия, однонаправленные слоистые углепластики, неупругое деформирование и разрушение, физическая мезомеханика, нелинейные динамические системы, самоорганизованная критичность, квазистационарный и катастрофический режимы, миграция деформационной активности.

В докладе рассмотрены результаты экспериментальных исследований деформирования и разрушения образцов из многослойного однонаправленного углепластика, вырезанных по направлению укладки волокон, с позиций общей методологии неупругого деформирования и разрушения твердых тел и сред как эволюционного процесса от начала нагружения до окончательной потери несущей способности материала [1]. Композиционный материал представляется в качестве нагружаемой многомасштабной нелинейной динамической системы, эволюция которой может быть описана методом нелинейной динамики. Динамическое равновесие деформационного процесса определяется деградацией прочностных и упругих параметров углепластика (положительная ОС) и релаксацией напряжений (отрицательная ОС). Принимается идея физической мезомеханики о развитии процессов неупругого деформирования во всей иерархии масштабов материала. Многомасштабность ограничивается микро-, мезо- и макроуровнями. Результаты акустикоэмиссионного анализа накопления повреждений в образцах из углепластика позволяют подтвердить фундаментальное свойство нелинейных динамических систем – свойство самоорганизованной критичности. Углепластик в силу внутренних нелинейных свойств в процессе нагружения эволюционирует, проходя две стадии неупругого деформирования и разрушения – медленную квазистационарную и сверхбыструю катастрофическую.

Как видно из рис. 1, первоначально рассеянное по объему образца квазиравномерное накопление дефектов и повреждений с течением времени

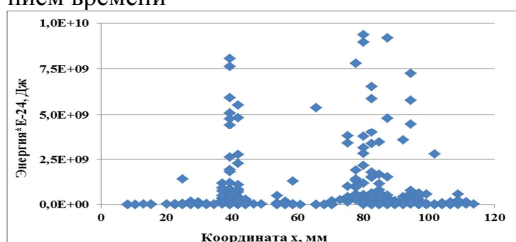


Рис. 1. Распределение энергий отдельных АИ по длине образца

локализуется с ускоренной деградацией прочностных свойств материала в сравнительно малых областях. Пространственная локализация неупругих деформаций (повреждений) неизбежно переходит в стадию катастрофического разрушения. Временная последовательность не обязательно нарастающих катастрофических разрушений разделена квазистационарными участками медленного накопления повреждений (рис. 2).

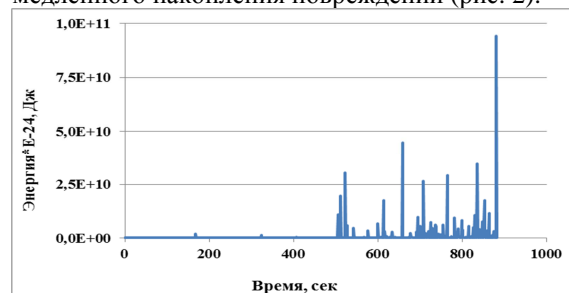


Рис. 2. Распределение энергии АИ во времени

Представительные объемы материала на мезоуровне не являются статистически независимыми, что приводит к миграции деформационной активности, перераспределению неупругих деформаций, в частности, по длине образца. Волны напряжений, регистрируемые акустикоэмиссионным методом, являются средством информационного обмена между всеми частицами деформируемого углепластика. Статистика флуктуации энергий акустических импульсов дает распределение с так называемыми «тяжелыми хвостами», что подтверждает скоррелированность разрушений во всей иерархии масштабов. Полученные распределения энергий не соответствуют распределениям магнитуд сейсмических событий, описываемых уравнениями Гуттенберга-Рихтера.

Определение условий перехода эволюции углепластика в катастрофическую стадию – одна из актуальных задач в исследовании неупругого деформирования и разрушения композитных материалов.

1. Макаров П.В., Еремин М.О. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред // Физическая мезомеханика. 2013. Т.16. № 1.С.5-26

МЕХАНИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАМОТОЧНЫХ КОЛЕЦ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОПРАВКОЙ.

Сергеев А.Ю. (Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет МАДИ),
Москва, Россия; flash-06@inbox.ru)

Аннотация: рассматривается процесс получения намоточного изделия из полимерного материала, армированного волокнами, рассчитано напряженно деформированное состояние кольца при его охлаждении на оправке и при отсутствии последней, обсуждаются условия прочности и монолитности такой конструкции.

Ключевые слова: намоточное кольцо, композит, оправка, адгезионная прочность.

Изделия из намоточных волокнистых полимерных материалов нашли свое применение при производстве (баллоны для хранения газового топлива) и ремонте (ремонт выхлопных систем с помощью бандажей) дорожно-строительных и путевых машин [1,2]. Процесс получения намоточного изделия состоит из следующих этапов: намотка, разогрев, полимеризация, охлаждение и снятие изделия с оправки (если это необходимо) [3]. При использовании намоточных композитов в качестве силовых оболочек важно уметь рассчитывать распределение макронапряжений в готовом изделии. Эта задача усложняется множеством физико-химических процессов, проявляющихся на каждом из перечисленных этапов. В связи с множеством случайных факторов (например, появление дефектов в виде пор и раковин) удобно рассматривать изменение напряженно деформированного состояния (НДС) изделия на каждом этапе его получения. На этапе намотки нитью, жгутом или лентой к ним прикладывается нагрузка, создающая натяжение. При кольцевой намотке это натяжение превращается в окружное растягивающее напряжение σ_ϕ , которое может быть выражено радиальным напряжением σ_r , сжимающим все предыдущие намотанные слои. Натяжение волокна обычно задают 5-15% от его предела прочности, это обеспечивает максимальную прочность и жесткость изделия [4]. При отверждении увеличивается плотность связующего, этот процесс сопровождается анизотропной усадкой. На этом этапе свойства композита резко меняются, особенно изменяются релаксационные параметры [5]. Далее происходит охлаждение кольца. Именно на этом этапе возникает опасность появления кольцевых трещин. В процессе эксплуатации изделия в машине перепад температур может быть выше 150 °С. Изменение температуры изделия приводит к изменению его НДС. НДС композитного кольца в большей степени определяется анизотропией усадочных и температурных напряжений. Для свободно отвержденного (в отсутствие оправки) композитного кольца и при наличии оправки эпюры напряжений вы-

глядят следующим образом (рис. 1):

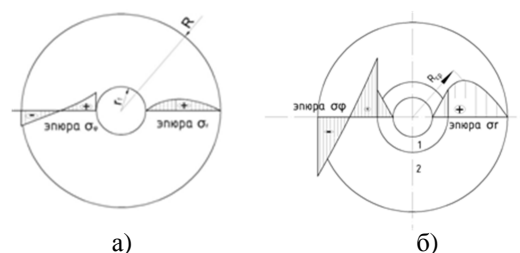


Рис 1. Эпюры напряжений σ_r и σ_ϕ для а) охлаждаемого композитного кольца в отсутствие оправки б)- при охлаждении кольца на оправке.

Таким образом, из приведенных эпюр следует отметить две области: граница кольца и оправки и радиус, на котором радиальные напряжения максимальны. В обоих случаях радиальные напряжения оказываются растягивающими. Монолитность изделия обеспечивается адгезионной прочностью соединения, большей, чем растягивающие макронапряжения σ_r . Однако, если адгезионная прочность связующего с оправкой будет меньше, чем с волокном, то разрушение следует в первую очередь ожидать на границе кольца с оправкой.

1. ГОСТ Р 51753-2001 Баллоны высокого давления для сжатого природного газа, используемого в качестве моторного топлива на автомобильных транспортных средствах. Общие технические условия.- Введ. 2002-01-01.-М.:Изд-во стандартов, 2001.- 20с.
2. Torosian T.M. Repair of automotive exhaust system/ Torosian T.M //Pat. Ser. № 3531345 United States. Sept. 29. 1970
3. Сергеев А.Ю., Турусов Р.А. Баурова Н.И., Куперман А.М, Исследование напряжений, возникающих в процессе отверждения композита, намотанного на цилиндрическую поверхность элемента выхлопной системы.//Механика композитных материалов в печати.
4. Портнов Г.Г. Прикладные задачи механики толстостенных конструкций, изготовленных из композитов методом намотки. Дисс. ... докт. техн. наук 01.02. 06. -1985. -429 с.
5. Коротков В.Н., Турусов Р.А., Джавадян Э.А., Розенберг Б.А. . Технологические напряжения в цилиндре из композитного материала в процессе его охлаждения и хранения. //Механика композитных материалов, 1986. №1.- с.118.
6. Baurova N.I., Sergeev A. Yu. Structural studies of fracture patterns in adhesive joints after pullout testing//Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials, 2014. V. 7. №. 4.- P.298-302.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ БИОЛОГИЧЕСКИХ МЕМБРАН

Л.У. Харисламова, С.Н. Якупов

Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН, Казань, Россия; lejsanh@yandex.ru

Рассмотрены экспериментальные методы изучения механических свойств биологических тканей. Приведен обзор патентов, посвященных определению прочностных характеристик биотканей. Развита двумерный экспериментальный метод определения механических характеристик экзокарпия (кожица) яблока.

Ключевые слова: биологические ткани, механические свойства, экспериментальный метод

Цель

Тонкие структуры (пленки, мембраны и покрытия) больших размеров легко встретить в природных конструкциях: кожура различных овощей и фруктов – все это тонкие структуры, несущие, в частности, защитные функции плодов. Представляет интерес исследование механических свойств биологических мембран, в частности, для оценки и контроля качества сельскохозяйственной продукции, а также при транспортировке и хранении плодов.

Методы

Был проведен обзор литературы, а также патентов, посвященных изучению прочностных характеристик биотканей, а именно различных плодов.

Для экспериментальных работ зачастую используют разрывную машину и метод пенетрации [1-3]. Среди патентов встречаются различные разработки и в т.ч. методики получения данных о свойствах плодов.

Авторами из США Stanley E. Prussia, John J. Astleford, Bob Hewlett, Yen-Con Hung был изобретен измерительный прибор твердости для неразрушающего контроля объектов с шероховатыми поверхностями (например, плодов). Устройство содержит следующие компоненты: средство для генерации импульсивной струи жидкости (или например, воздуха), направленной на поверхность объекта контроля; лазер, направленный на область поверхности тестируемого объекта; детектор для измерения света отраженного от поверхности объекта; анализатор для определения количества деформации и контроллер «рис.1» [4].

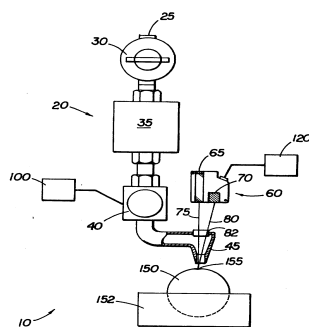


Рис. 1. Измерительный прибор твердости

Charles L. Mohr, Brandt C. Mohr изобрели машину, снабженную мотором и управляемым поршнем с соответствующими датчиками для определения цифровых данных, указывающих положение поршня, силу сопротивления при надавливании поршнем и ползучесть при постоянном давлении. Данные с датчиков передаются на компьютер для хранения и анализа. Метод анализа определяется сопротивлением проникновению поршня и ползучестью при постоянном давлении, в каждой, из, по меньшей мере, двух концентрических зон объекта «рис.2» [5].

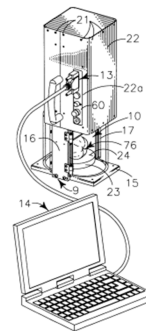


Рис. 2. Схема установки

Среди других патентов также рассматривались методы контроля плодов на конвейерной системе [6]. Авторами был разработан двумерный экспериментальный метод изучения биологических мембран.

- Judith A. Abbott, Alley E. Watada, and David R. Massie. Effe-gi, Magness-Taylor, and Instron Fruit Pressure Testing Devices for Apples, Peaches, and Nectarines // Amer. Soc. Hort. 1976. №101(6). P. 698-700.
- Thompson R.L., Fleming H.P., Hamann D.D., Monroe R.J. METHOD FOR DETERMINATION OF FIRMNESS IN CUCUMBER SLICES // Journal of Texture Studies. 1982. №13. P. 311-324.
- Grotte M., Duprat F., Loonis D., Pitri E. MECHANICAL PROPERTIES OF THE SKIN AND THE FLESH OF APPLES // International Journal of Food Properties. 2001. P. 149-16.
- Stanley E. Prussia, John J. Astleford, Bob Hewlett, Yen-Con Hung. Non-destructive firmness measuring device // US 5372030 A. 1994.
- Charles L. Mohr, Brandt C. Mohr. Automated machine and method for fruit testing // US6643599 B1. 2003.
- Michel Crochon, Veronique F. Bellon. Apparatus for performing non-destructive measurements in real time on fragile objects being continuously displaced // US5315879 A

ВЛИЯНИЕ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ УДАЛЯЕМЫХ ТКАНЕЙ НА СВОЙСТВА ТОНКОСТЕННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ

А.А. Ширко, Н.С. Обухова, С.В. Ворвуль, В.А. Каплина, Е.Р. Лепикаш

ОАО «ОНПП «Технология», Обнинск, Россия; lepikash@technologiya.ru

Рассмотрено влияние типа жертвенных тканей на физико-механические свойства стеклопластика толщиной 0,5-2мм, изготовленного методом вакуумного формования.

Ключевые слова: жертвенный слой, тонкостенный стеклопластик, полимерные композиционные материалы, динамический механический анализ, компонентный состав.

Стеклопластики на основе терморезактивных связующих благодаря комплексу высоких прочностных, диэлектрических свойств и малой плотности, находят широкое применение в различных отраслях промышленности.

Изделия радиотехнического назначения из таких стеклопластиков (радиопрозрачные укрытия для защиты антенных систем от внешних факторов, элементы антенных блоков и т.д.) - одно из направлений их использования [1]. Указанные изделия, как правило, имеют малую толщину 0,5-1,0мм, что определяет их «повышенную чувствительность» к изменению тех или иных технологических факторов.

Теоретически и на практическом опыте убедительно показано, что свойства формируемых композитов существенно зависят не только от параметров технологического режима, но и от состава и свойств вспомогательных слоев технологического пакета. Последний включает в себя дренажные, разделительные и удаляемые "жертвенные" слои, каждый из которых выполняет определенные функции в процессе формования композитов.

В частности, жертвенные слои не только определяют шероховатость поверхности после их удаления, но и влияют на количество связующего, поглощаемого используемой тканью при формовании композитов. Соответственно отличия в соотношении компонентов определяют различие в физико-механических свойствах.

Расширение рыночного ассортимента тканей, применяемых в качестве жертвенных слоев, и отсутствие данных об их влиянии на свойства формируемых тонкостенных стеклопластиковых изделий радиотехнического назначения определяют цель данной работы - исследование влияния типов жертвенной ткани на физико-механические свойства стеклопластиков.

Объектом исследования явились образцы стеклопластика на основе конструкционной стеклоткани Т-10-14 и эпоксифенольного связующего с толщиной 0,5 – 2,0мм с различной схемой армирования, сформованных с применением жертвенных тканей различной химической природы.

Для оценки свойств полученных материалов использованы следующие методы исследования:

- метод гелиевой пикнометрии для определения компонентного состава;
- динамический механический анализ для

определения вязкоупругих свойств и температуры стеклования стеклопластика;

- метод определения прочности при сдвиге склеенных образцов;

- метод определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.

Экспериментальные данные показывают, что влияние типа используемой жертвенной ткани на объемное содержание связующего и прочность при сдвиге отмечено для всех исследуемых образцов, но наиболее ярко это влияние выражено для образцов толщиной 0,5мм. Максимальный отбор связующего отмечен у всех образцов с жертвенной полиэфирной тканью арт.56208. Самую низкую пористость имеют образцы с использованием жертвенной полиамидной ткани РА-90, она составляет 5,1%. Диэлектрические свойства образцов с применением различных фильтровальных тканей близки по значениям.

На рисунке 1 представлены кривые изменения модуля упругости от температуры для образцов стеклопластиков толщиной 0,5 – 2,0мм, полученных с различными жертвенными тканями, при испытаниях методом ДМА.

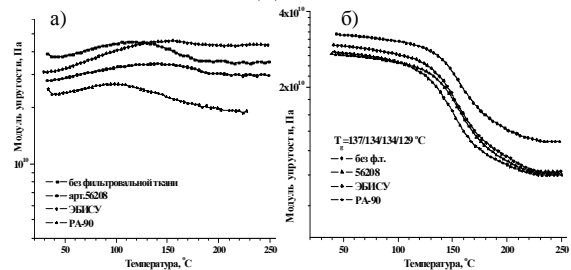


Рис. 1. Динамический механический спектр стеклопластиков с использованием различных жертвенных тканей а- толщиной 0,5мм [0]₂, б- толщиной 2мм [0]₁₀

Можно отметить отличие в характере изменения модуля упругости от температуры образцов с одинаковой схемой армирования, но разной толщиной 0,5мм(а) и 2мм(б). Температура стеклования при этом отличается более чем на 10°C.

Полученные результаты показывают, что для обеспечения заданного, воспроизводимого уровня свойств формируемых стеклопластиков необходим направленный и обоснованный выбор вспомогательных материалов, в том числе жертвенной ткани.

1. Гуртовник И.Г. и др. Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков – М., Мир, 2003, 363 с

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАГРУЖЕННЫХ ОБРАЗЦОВ В КОРРОЗИОННО-АКТИВНОЙ СРЕДЕ

Н.М. Якупов, Р.Р. Гиниятуллин, С.Н. Якупов, А.Р. Нурғалиев

Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН, Казань, Татарстан, РФ; Якупов Н.М. <yzsrr@kfti.knc.ru>

На процесс коррозионного износа образцов оказывает влияние напряженное состояние. При этом наряду с изменением геометрии происходит изменение и механических характеристик образцов. Описывается три способа исследования механических характеристик нагруженных тонкостенных элементов в коррозионной среде.

Ключевые слова: нагруженные тонкостенные образцы, напряженное состояние, пассивирующий слой, разрыхление, механические характеристики, способ, установка.

Цель

Исследования изменения при коррозии жесткостных характеристик тонкостенных металлических образцов, находящихся под нагрузкой.

Состояние проблемы

Конструкции воспринимают механические нагрузки и, взаимодействуя со средой, подвергаются коррозии. При этом наряду с изменением геометрии происходит изменение механических свойств из-за «разрыхления» материала. Механические нагрузки влияют на состояние пассивирующего слоя [1].

Изменение механических характеристик материала элементов нагруженных конструкций приводит к перераспределению усилий в элементах конструкций, снижению общей прочности и долговечности всей конструкции.

Известные гравиметрический и ускоренный электрохимический способы не позволяют оценить изменение механических характеристик тонкостенных элементов конструкций при коррозии. Общепринятый подход анализа прочности конструкций, учитывающий только утончение элементов конструкций не всегда эффективен. Он годится только для оценочных расчетов влияния коррозии.

Учет факторов, влияющих на изменение характеристик материала элементов нагруженных конструкций, при их проектировании и эксплуатации позволяет сохранить конструкцию от разрушения, то есть предотвратить техногенную катастрофу.

Способы исследования

Способ исследования изменения механических характеристик образцов, в процессе коррозионного износа [2]: круглый образец, изогнутый под давлением, заливают сверху средой (рис.1) и выдерживают заданное время. Способ испытания образцов под напряжением [3] включает операции воздействия нагрузки и среды на испытуемый прямоугольный образец (рис.2а). Для создания двусосного напряженного состояния разработано устройство [4], где круглая пластина деформируется механическим путем (рис.2б). Далее образцы, выдержанные в агрессивной среде, испытывают, используя экспериментально-теоретический метод [5,6].

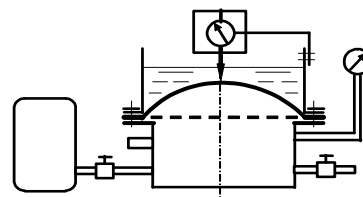


Рис.1. Схема установки

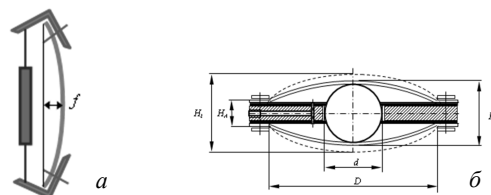


Рис.1. Деформированная пластина: а – прямоугольная; б – круглая

Выводы

Разработаны экспериментально-теоретические способы исследования механических характеристик нагруженных тонкостенных элементов, подверженных коррозионному износу, на базе которых определены механические характеристики материалов тонкостенных элементов конструкций.

Работа выполнена в рамках программ фундаментальных исследований ОЭМПУ РАН

1. Сидоренко С.Н., Якупов Н.М. Коррозия – союзник аварий и катастроф. М.: Издательство РУДН, 2002. 93 с.
2. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Нурғалиев А.Р., Якупов С.Н. Способ испытаний образцов металлических мембран под напряжением и устройство для его осуществления: Патент на изобретение РФ №2296976.
3. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. Способ испытания тонкостенных образцов под напряжением. Патент на изобретение РФ №2439537.
4. Якупов Н.М., Велиюлин И.И., Антонов В.Г., Нуруллин Р.Г., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. Способ испытания тонкостенных образцов под напряжением и устройство «Летающая тарелка» для его осуществления. Патент на изобретение РФ №2437077.
5. Якупов Н.М., Нурғалиев А.Р., Гиниятуллин Р.Р., Якупов С.Н. Методика анализа работы конструкций, подверженных коррозионному изнашиванию // Вестник машиностроения, 2012. №10. С.36-40.
6. Якупов Н.М., Нурғалиев А.Р., Якупов С.Н. Методика испытаний пленок и мембран в условиях равномерно распределенного поверхностного давления // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. М.: ТЕСТ-ЗЛ, 2008, том 74, № 11, С.54-56.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ АДГЕЗИИ ПЛЕНКИ К ПОДЛОЖКЕ

С.Н. Якупов

Институт механики и машиностроения КазНЦ РАН, Казань, Татарстан, РФ; tamas_86@mail.ru

Известны подходы определения адгезии пленки к плоской подложке. Практически отсутствуют работы по определению адгезии пленки к неплоской подложке. Разработан экспериментально-теоретический метод определения адгезии пленки к плоской и неплоской подложке, позволяющий повысить точность определения адгезии.

Ключевые слова: тонкая пленка, адгезия, плоская и неплоская подложка, усилия отрыва, усилия среза, экспериментально - теоретический подход

Цель

Разработка экспериментально - теоретического метода исследования адгезии пленки к подложке плоской и сферической форм.

Введение

Поверхностные покрытия, обладая определенными заданными свойствами, позволяют решать множество различных проблем надежности, долговечности и безопасности конструкций и сооружений. Они обеспечивают защиту и изоляцию поверхности изделий, работающих в различных средах и под воздействием различных физических полей. Создание покрытий с заданными свойствами – это одно из перспективных направлений. Экспериментально - теоретический метод определения механических характеристик плоских и сферических пленок и мембран со сложной структуры описан в [1-4]. Разработка награждена Золотой медалью Международного Салона изобретений «Архимед-2011», а также отмечена в Информационном сборнике: Важнейшие исследования и разработки научных учреждений РАН в 2011 году, готовые к практическому применению (П.5.4.3. М., 2012. С.87).

Устройство для испытания и метод

Устройство для испытания плоских образцов (рис.1) состоит из источника давления рабочей среды (1) с магистралью (5) для подачи рабочей среды, вентиля (2) и измерительного комплекса (8).

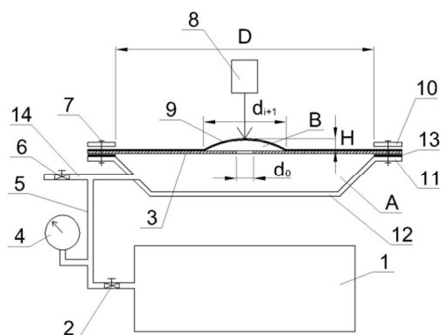


Рис.1. Схема установки

Магистраль (5) подведена к полости «А» внутри корпуса (12), который имеет фланец (11) для размещения образца (3) с подкладкой (13). Образец

(3), установленный на фланце (11), прижимают кольцом (10) и крепежными элементами (7). Полость «А», закрытая образцом, формирует герметичную нагрузочную камеру. На магистрали (5) также расположен манометр (4), стравливающий патрубок (14) с вентилем (6). В случае испытания образцов (подложка - покрытие) неплоской формы на корпус (12) устанавливаются фланец 11 и прижимное кольцо (10) в форме фрагмента подложки.

Подавая давление в полость «А», производят мониторинг за формой купола (9), образующегося при отрыве пленки от подложки. При этом производятся замеры измерительным комплексом высоты подъема купола H в увязке с параметрами контура отслаивания, например, большую $2a$ и малую $2b$ оси эллипса основания эллипсоидального купола, в частном случае производят измерение диаметра d основания купола при образовании осесимметричного купола. По линии отрыва возникают как нормальные усилия отрыва $T_{от}$, так и касательные усилия среза $T_{ср}$.

Получены соответствующие формулы для интегральных значений нормального напряжения сцепления $\eta_{от}$ и касательного напряжения среза $\tau_{ср}$. Радиальные усилия в пленке в области основания купола определяются из решения задачи теории оболочек для купола с эллиптическим основанием под действием равномерно распределенной поперечной нагрузки p . Рассмотрен пример определения адгезии полимерной пленки, наклеенной на металлическую подложку.

10. Якупов Н.М., Галимов Н.К., Леонтьев А.А. Экспериментально-теоретический метод исследования прочности полимерных пленок // Механика композиционных материалов и конструкций. 2000. Т.6, №2. С.238-243.

11. Якупов Н.М., Нургалиев А.Р., Якупов С.Н. Методика испытания пленок и мембран в условиях равномерного распределенного поверхностного давления // Заводская лаборатория. Диагн. материалов. 2008.Т.74.№11.С.54-56.

12. Якупов Н.М., Нуруллин Р.Г., Якупов С.Н. Методология исследования механических характеристик тонких пленок и нанопленок // Вестник Машиностроения. 2009. №6. С.44-47.

13. Галимов Н.К., Якупов Н.М., Якупов С.Н. Экспериментально-теоретический метод определения механических характеристик сферических пленок и мембран со сложной структуры // МТТ №3, 2011. С.58-66

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗВИТИЯ УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В КЕССОНЕ КРЫЛА СРЕДНЕМАГИСТРАЛЬНОГО САМОЛЕТА

И.В. Гулевский¹, В.И. Голован¹, А.Ю. Захаренкова¹, С.В. Куликов², В.В. Коновалов¹, А.В. Панков¹, В.Г. Слободчиков², В.Е. Стрижиус², М.А. Фетотов¹, К.С. Щербань¹

¹Центральный Аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия; scherban@tsagi.ru

²ЗАО «Аэрокомпозит», Москва, Россия

Результаты экспериментальных исследований развития ударных повреждений в натурной металло-композитной конструкции кессона крыла среднемагистрального самолета. Данные о длительности развития ударных повреждений и остаточной прочности поврежденной конструкции.

Металло-композитная конструкция, усталость, остаточная прочность, ударные повреждения, растрескивание.

На современном этапе развития авиации наблюдается все более широкое использование композитных материалов в конструкции самолета. Это обусловлено тем, что композитные материалы обладают низким удельным весом, высокой удельной прочностью, большой долговечностью и малым температурным расширением. Однако им присущи и ряд недостатков, такие как относительно низкая прочность при сжатии, низкая прочность в толщинном направлении, влияние влаги и температуры, чувствительность к ударным повреждениям и недостаточная способность к пластическому деформированию. Поэтому многие конструктивные элементы авиаконструкций выполняют из металла, которые состыкуются с элементами, выполненными из композита. Такие составные конструкции содержащие элементы из металла и композита называют гибридными или металло-композитными конструкциями. С точки зрения усталости и живучести такие конструкции обладают преимуществом, но разработка таких конструкций требует решения ряда проблем.

Целью работы являлось экспериментальное исследование развития ударных повреждений в конструкции прототипа кессона крыла среднемагистрального самолета.

Объект испытаний

Прототип представлял собой кессонную часть консоли крыла для среднемагистрального самолета (рис.1).

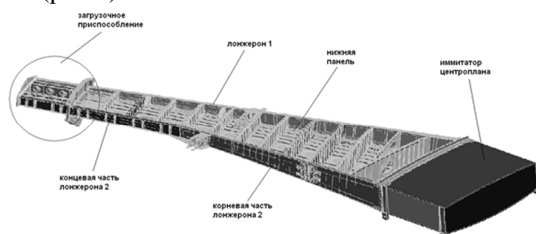


Рисунок 1

Верхняя и нижняя панели, передний и частично задний лонжерон и частично нервюры, выполнены из ПКМ и представляет собой монолитную

интегральную конструкцию, выполненную за один технологический прием.

Программа испытаний

Программой предусматривалась следующая последовательность исследований:

- инструментальный контроль прототипа в состоянии поставки;
- нанесение ударных повреждений с энергией удара от 90 до 240 Дж. (типа BVID и VID);
- испытания на усталость в объеме 60000 полетных циклов с периодическим инструментальным контролем;
- испытания на остаточную прочность;
- испытания на усталость до суммарной наработки 120000 полетных циклов с периодическим инструментальным контролем;
- испытания на остаточную прочность до разрушения.

Стенд испытаний

Испытания проведены на специальном стенде, на котором моделировалась переменная нагруженность крыла самолета в наземных и полетных режимах типового полета (рис. 2).

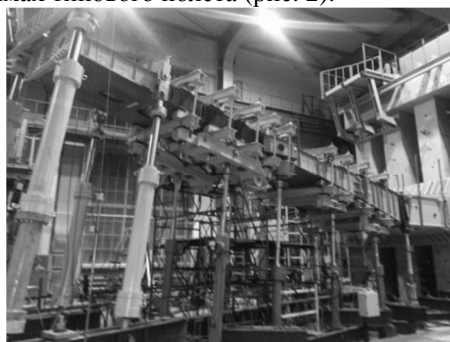


Рисунок 2

Результаты испытаний

В результате исследований получены данные о длительности развития ударных повреждений, величинах деформаций в зоне удара при циклическом нагружении, остаточной прочности поврежденной конструкции, а также данные о напряженном состоянии кессона, полученные МКЭ расчетом и тензометрией.

ACCELERATED TESTING THE COMPOSITE MATERIAL FOR WIND TURBINE BLADES

R.I. Zaynetdinov¹, I.V. Gadolina²

¹ Moscow State University of Railway Engineering (МИИТ), Moscow, Russia; zri7755@gmail.com

² Institute for Machine Science (IMASH) of RAS, Moscow, Russia

Because of complicated nature of breaking the composite material for wind turbine blades the testing is necessary. Due to large number of loading cycles (more than 10^9) the acceleration of tests is required. The method for shortening the load process is wavelet transform. We have applied the continuous wavelet transform to data sets obtained from numerical simulations and tests. The wavelet analysis provides probabilistic evidence that a multifractal description is appropriate.

Keywords: Accelerated Testing, Composite, Wind Turbine, Continuous Wavelet Transform.

New wind turbine designs use larger and larger blades. A larger area effectively increases the tip-speed ratio of a turbine at a given wind speed, thus its energy extraction is increasing. At 2013 wind turbine blades were as large as 75 m. An important goal is to control the blade weight. The price is also matters. Because the new technologies allow production of complicated and power-consuming composite machines without the autoclave with the aid of laser consolidation, the composite either glass fiber or carbon fiber laminate is the best material for wind turbine blades. Wind turbine blades experience a range of complex forces, and it is not possible to simulate exactly these conditions in any accelerated laboratory experiment. The rotation machines are subject to combination of several loadings that are highly irregular in nature. The blades of the wind turbine are generally regarded as the most critical components of the wind turbine system. They fail at unexpectedly high rates. The major cause of this failure is fatigue due to cyclic loading.

Turbine blades are the most critical part of construction. One of the problems is the ply drop delamination. Thickness added or subtracted by adding or subtracting plies. Where plies end at a ply drop (Fig. 1), a three-dimensional stress state is created. By the initiating the crack (Fig. 2) it can be detrimental to the performance of the structure. Pictures for material DD16 were taken from [1]. Modeling of this situation requires the finite-element analysis. Because of uncertainty the testing is necessary.

During 20 years of planned service of wind turbine it is loaded by about 10^8 cycles. It is expected that wind turbine blades go through 10^9 loading cycles. Loading frequencies during the test do not exceed 10 Hz. So the acceleration is necessary. Testing time can be shortened either by increasing the load magnitudes or frequencies or both. In this work we arrange the parts of load histories which are most damaging. The race-track method [2] is intended for choosing the peaks from the history, which form the greatest events (cycles). Applying continuous wavelet transform (CWT) [3, 4] we preserve the load sequence and shorten the testing time.

For verification the possibility of reasonable editing the loading process, the program for calculating the fatigue damage based on initial and edited histories

was developed. Material properties for the wind turbine blade composite material were taken from database [5], and the calculation method was rain flow. The comparison between fatigue damages of the initial load, race-track edited and wavelet edited was performed. Wavelet analysis is known to be a powerful tool for analyzing fractal attractors. CWT can be applied directly to data on fractures obtained from tests, operation or from inspections of technical state in operation.

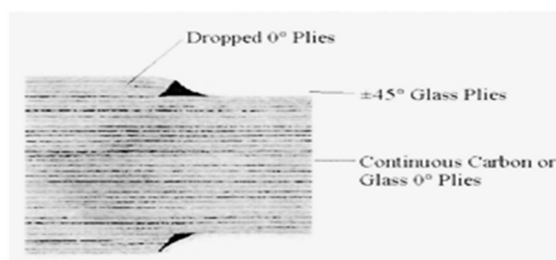


Fig. 1. Ply drop photograph

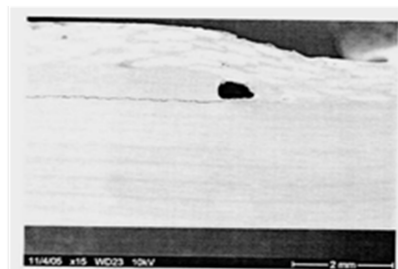


Fig. 2. Delamination crack in external ply drop

1. Wilson, T.J. Modeling of in-plane and interlaminar fatigue behavior of glass and carbon fiber composite material. A thesis of Master of Science. Montana State University.

2. Conle, A., Topper, T.H. Evaluation of small cycle omission criteria for shortening of fatigue service histories// International Journal of Fatigue. 1979 1(1). – Pp. 23-28

3. Zainetdinov, R.I. Multifractal approach to the description and wavelet analysis of the fatigue damage. Mechanical Fatigue of Metals. MFM-2006. Pp. 192-197.

4. Pratumnopharat, P. Application of Morley Wavelet in stress-time history editing of horizontal axis wind turbine blades. 2-nd Int. Symposium of Environmental-Friendly Energies and Applications. EFEA2012. North Umbria University. Pp. 396-401.

5. DOE/MSU Composite Material Fatigue Database, January 20, 2014. Version 22.0

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ВИНИЛЭФИРНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ПРИ СТАТИЧЕСКИХ И ПОВТОРНО-СТАТИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ

Н.О. Яковлев, А.С. Генералов, В.В. Автаев, А.С. Бойчук

ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва, Россия; Nick_62@mail.ru

Для стеклопластика на основе стекло рогожи и модифицированного винилэфирного связующего исследована повреждаемость при статических и повторно-статических нагружениях. Для контроля состояния образцов применен ультразвуковой реверберационно-сквозной метод неразрушающего контроля. Установлена корреляционная связь информативного параметра метода с поврежденностью образцов при напряжениях более 200 МПа.

Ключевые слова: повреждаемость, статическое нагружение, повторно-статическое нагружение, неразрушающий контроль, ультразвуковой реверберационно-сквозной метод, стеклопластик, стекло рогожа

Для стеклопластиковых обшивок на основе стекло рогожи и модифицированного винилэфирного связующего проведены исследования их повреждаемости при статических и повторно-статических нагружениях. Статическое растяжение проводилось при скорости нагружения 1 мм/мин до уровней напряжений от 100 до 400 МПа с последующей разгрузкой. Повторно-статическое нагружение выполнялось с частотой 0,1 – 1 Гц, при значениях амплитуды цикла от 100 до 300 МПа, асимметрии цикла $R = 0,1$ и количеством циклов до 10^3 .

Накопление повреждаемости при повторно-статическом нагружении оценивалось по изменению площади петель гистерезиса «рис. 1».

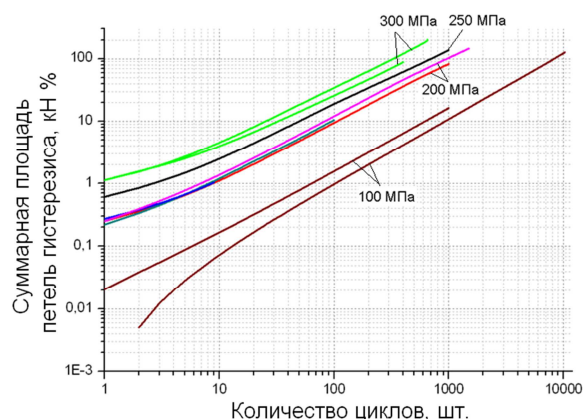


Рис. 1. Зависимость суммарной площади петель гистерезиса от количества циклов при повторно-статическом нагружении с постоянной амплитудой напряжения.

Установлено, что при значениях амплитуды напряжений более 200 МПа и количестве циклов более 10 зависимость суммарной площади петель гистерезиса от количества циклов повторно-статического нагружения в логарифмических координатах носит квазилинейный характер.

После механических испытаний проводился контроль состояния образцов ультразвуковым реверберационно-сквозным методом неразрушающего контроля (НК) с целью установления корреляционных связей информативного параметра

метода – критерия SWF (stress wave factor) с поврежденностью образцов.

Критерий SWF рассчитывался амплитудным (peak voltage), счетным (weighted ringdown count, «рис. 2») и энергетическими (energy integral и power spectrum) способами вычисления.

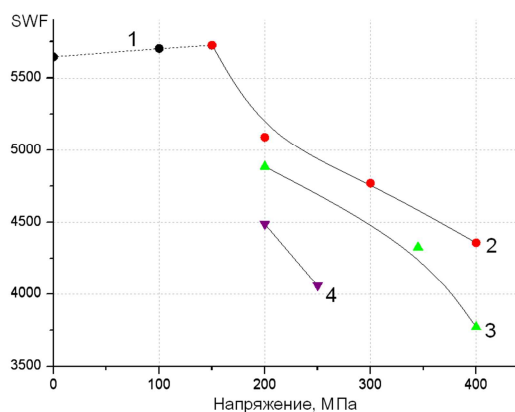


Рис. 2. Зависимость критерия SWF (weighted ringdown count) от поврежденности образцов стеклопластика при статических (1 и 2) и повторно-статических нагружениях (3 – 10^2 циклов, 4 – 10^3 циклов).

Полученные результаты показали:

- применимость данного метода НК для определения момента начала образования поперечных осей нагружения микротрещин в образце (точка пересечения кривых 1 и 2), что было подтверждено визуальным наблюдением;

- возможность определения степени поврежденности материала по кривым тарировки.

Следует заметить, что кривые тарировки для всех способов расчета критерия SWF были построены для напряжений более 200 МПа. При меньших напряжениях сильно возрастала погрешность метода, что могло быть связано с сильной не плоскостностью поверхностей образцов стеклопластика, изготовленных на основе стекло рогожи методом вакуумной инфузии.

Работа проведена при использовании оборудования ЦКП «Климатические испытания» ФГУП «ВИАМ».

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ ПРИ
 РЕЗОНАНСНЫХ КОЛЕБАНИЯХ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАСТИН
 С КОМПОЗИТНЫМИ И МЯГКИМИ СЛОЯМИ**

В.М. Шишкин¹, А.П. Левашов¹, В.А. Фирсов²

¹Вятский государственный университет, Киров, Россия; tism1@rambler.ru

²Казанский национальный исследовательский технический университет, Институт авиации, наземного транспорта и энергетики, Казань, Россия

Разработан призматический полуквадратичный элемент для моделирования напряженно-деформированного состояния композитных и мягких слоев многослойной пластины при колебаниях в резонансной зоне. Построена матрица геометрической жесткости отмеченного элемента для учета вращения пластины в ее плоскости. Разработан алгоритм определения заданного количества мод и частот колебаний пластины. Проведена апробация элемента на конструкции торсион-лопасть легкого вертолета при резонансных колебаниях в плоскости вращения винта и в плоскости взмаха.

Ключевые слова: конечный элемент; резонанс; демпфирование; композит; многослойная пластина.

Для повышения демпфирующих свойств тонкостенных конструкций в условиях интенсивных вибраций многие их узлы и агрегаты изготавливаются в виде многослойных структур с чередующимися по толщине композитными и мягкими слоями. Такие структуры в настоящее время широко распространены в конструкциях авиа- и судостроения, автомобилях, в сооружениях гражданского и промышленного строительства и др., в которых в качестве демпфирующих слоев используются мягкая резина или полиуретан. В авиастроении типичным примером многослойного элемента конструкции, который должен обладать требуемыми параметрами демпфирования, является торсион, соединяющий в легких вертолетах нового поколения лопасть с валом несущего винта.

Для моделирования жестких композитных и мягких демпфирующих слоев многослойных пластин разработан призматический полуквадратичный элемент с шестнадцатью узлами (рис. 1).

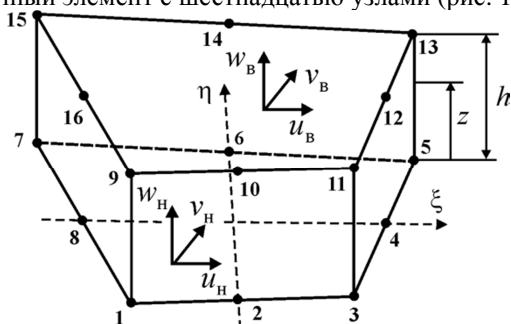


Рис. 1. Призматический полуквадратичный элемент

Перемещения $u_n, v_n, w_n, u_b, v_b, w_b$ нижней и верхней поверхностей элемента аппроксимируются квадратичными базисными функциями безразмерных координат ξ, η . Перемещения u, v, w внутри элемента выражаются через перемещения $u_n, v_n, w_n, u_b, v_b, w_b$ с использованием линейной аппроксимации по координате z . Материал элемента может быть композитным или изотропным. Упругие и демпфирующие свойства материала учитываются моделью Фойг-

та-Томпсона-Кельвина [1].

Получены матрица масс, матрица жесткости, матрица демпфирования и матрица геометрической жесткости конечного элемента (последняя обусловлена возможным вращением пластины в ее плоскости). На основе метода итераций в подпространстве [2] разработан алгоритм определения заданного количества мод и частот свободных колебаний многослойной пластины с учетом геометрической жесткости, обусловленной вращением ее в своей плоскости с угловой скоростью n . Достоверность отмеченных матриц и алгоритма подтверждается тестовыми примерами.

Проведена апробация элемента на конструкции торсион-лопасть [3] легкого вертолета нового поколения. Несущие слои торсиона изготовлены из стеклопластика T25. Демпфирующие слои выполнены из мягкой резины P-181. Лопасть моделировалась 12-ти степенными стержневыми элементами. Для стыковки торсиона с лопастью на основе гипотезы линейной деформации разработан специальный переходной конечный элемент.

Определена динамическая реакция конструкции торсион-лопасть легкого вертолета при резонансных колебаниях по нижней моде в плоскости взмаха и в плоскости вращения. Анализ полученных результатов показал, что амплитуды резонансных колебаний в плоскости взмаха в основном зависят от демпфирующих свойств резины, а в плоскости вращения – от демпфирующих свойств стеклопластика.

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

1. Хильчевский В.И., Дубенец В.Г. Рассеяние энергии при колебаниях тонкостенных элементов конструкций. Киев: Вища школа. 1977. 252 с.
2. Бате К., Вильсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. М.: Стройиздат. 1982. 447 с.
3. Голованов А.И., Митрякин В.И., Шувалов В.А. Расчет напряженно-деформированного состояния торсиона несущего винта вертолета // Известия вузов. Авиационная техника. 2009. № 1. С. 66–69

АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ СЛОИСТОГО УГЛЕПЛАСТИКА НА ОСНОВЕ РАВНОПРОЧНОЙ ТКАНИ

Русланцев А.Н.^{1,2}, Думанский А.М.^{1,2}, Портнова Я.М.³

¹ Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; alduman@rambler.ru;

² Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

³ ГНЦ РФ ОАО «ОНПП «Технология», г.Обнинск, Россия

Представлено расчетно-экспериментальное исследование нелинейного деформирования углепластика на основе равнопрочной углеродной ткани. Предложена модель, основанная на соотношениях теории слоистых пластин, описывающая нелинейность деформирования углепластика при растяжении.

Ключевые слова: углепластик, углеткань, нелинейное деформирование

В настоящее время углепластики широко используются в авиационной и ракетно-космической технике. В связи с этим создание моделей деформирования и разрушения углепластиков является актуальной задачей.

Экспериментально показано, что в углепластике на основе ткани нити в ненагруженном состоянии имеют форму волны, а при растяжении они распрямляются (рис. 1), и зависимость напряжений от деформаций приобретает нелинейный вид.

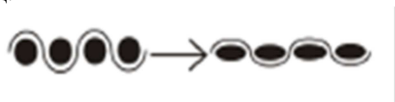


Рис. 1. Изменение кривизны нити при растяжении углепластика [1]

Для описания влияния таких эффектов могут быть использованы подходы, основанные на методе конечных элементов, итерационные модели, аналитическое описание, в том числе при помощи соотношения Рамберга-Осгуда [2]. В настоящей работе предложена аналитическая модель, основанная на матричных алгоритмах и теории слоистых пластин.

Матрица жесткости слоя описывается следующим способом:

$$[G_{12}] = [G_{12}^0] - [G^0] \cdot f,$$

где $[G_{12}]$ - матрица жесткости на упругом участке

деформирования, $[G^0] = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ - матрица для

учета нелинейности, f - функция, аппроксимирующая нелинейность кривой деформирования при растяжении.

Матрица жесткости пакета вычисляется как линейная комбинация матриц жесткости слоев составляющих пакет и принимает следующий вид:

$$[G_{xy}] = \sum_i [T_1^{(i)}][G_{12}][T_1^{(i)T}]\bar{h}_i = [G_{xy}^0] - [G] \cdot f,$$

где $[T_1^{(i)}]$ - матрица поворота и \bar{h}_i относительная толщина i -го слоя соответственно,

$$[G_{xy}^0] = \sum_i [T_1^{(i)}][G_{12}^0][T_1^{(i)T}]\bar{h}_i, [G] = \sum_i [T_1^{(i)}][G^0][T_1^{(i)T}]\bar{h}_i$$

Матрицу податливости пакета получаем обращением матрицы жесткости:

$$[S_{xy}] = ([I] - [A] \cdot f)[S_{xy}^0],$$

где $[A] = [G_{xy}^0]^{-1}[G]$, $[S_{xy}^0] = [G_{xy}^0]^{-1}$.

После преобразований диагонализации получим

$$[S_{xy}] = [R] \text{diag} \left(\frac{1}{1 - \lambda_i \cdot f} \right) [R]^{-1} [S_{xy}^0],$$

где $[R]$ - матрица из собственных векторов матрицы $[A]$, λ_i - собственные числа матрицы $[A]$.

На рисунке 2 для сравнения приведены расчетные и экспериментальные кривые деформирования углепластика.

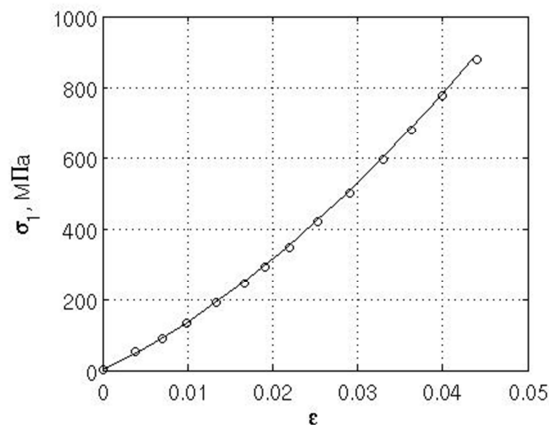


Рис. 2. Зависимость продольной деформации от напряжений при растяжении пакета.

Из рис.2 видно хорошее согласие между расчетными и экспериментальными данными.

- Döbrich O., Gereke T. Drape Simulation: Textile Material Model for Correct Property Reproduction to Improve the Preform Development Process of Fiber-Reinforced Structures. // 12-th International LS-DYNA Users Conference / Constitutive Modeling, 2010
- Olivier Cousigné O., Moncayo D., Coutellier Camanho P., Naceur H., Hampel S. Development of a new nonlinear numerical material model for woven composite materials accounting for permanent deformation and damage // Composite Structures. Vol. 106, 2013 – P. 601-614.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОПИТКИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КРЫШИ И КУЗОВА ВАГОНА ХОППЕРА ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ВАКУУМНОЙ ИНФУЗИИ

А.Е. Ушаков¹, Е.И. Корниенко², Н.В. Розин³, А.А. Сафонов⁴

¹Сколковский институт науки и технологий, Московская область, Одинцовский район, дер. Сколково, Россия;

²ООО «НТИЦ АпАТЭК-Дубна», г. Дубна, Россия;

³ФГУП «Центральный Аэрогидродинамический Институт», г. Жуковский, Россия;

⁴Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия

Композитные изделия при вакуумной инфузии формируются путем пропитки армирующего наполнителя смолой за счет вакуумирования. Задачей проектирования инфузионного процесса является разработка системы пропитки. В работе описывается опыт применения математического моделирования процесса пропитки при вакуумной инфузии крупногабаритных конструкций крыши и кузова вагона-хоппера из композиционных материалов. Приводятся примеры выбора системы пропитки.

Ключевые слова: композиционные материалы, моделирование пропитки, вакуумная инфузия

Введение

В 2012 году в ООО «НТИЦ АпАТЭК-Дубна» были проведены работы по созданию композитного вагона хоппера для перевозки сыпучих грузов. Особенность технологии изготовления данного вагона в том, что крыша (рис. 1), а затем и кузов (рис. 2), со всеми силовыми элементами, такими как шпангоуты, силовой пояс и другими должны быть пропитаны за один технологический цикл с первого раза.

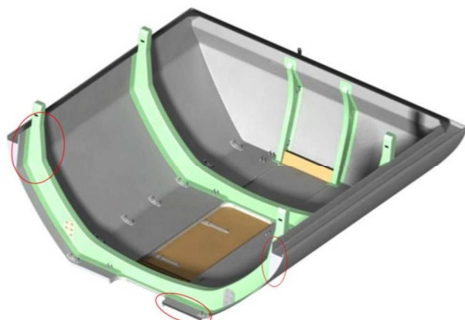


Рис. 1. «1/3» крыши вагона хоппера

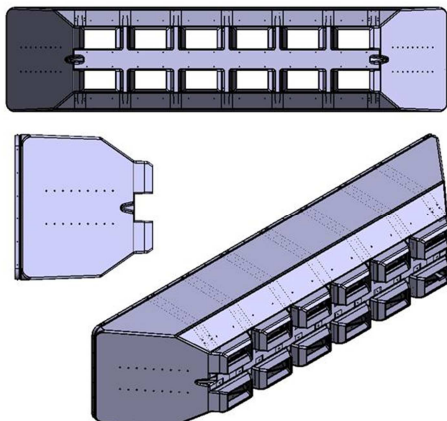


Рис. 2. Кузов вагона хоппера

Моделирование процесса пропитки

Математическая модель процесса пропитки позволяет производить виртуальные технологические эксперименты, экономя время и средства для поиска оптимального способа пропитки изделия [1].

Течение смолы через армирующий наполнитель моделируется законом Дарси, который устанавливает линейное отношение между скоростью потока и градиентом прикладываемого давления (1).

$$\vec{V} = -\frac{K}{\mu} \vec{\nabla} P \quad (1)$$

где K – тензор проницаемости, μ – вязкость связующего, V – скорость Дарси, P – давление.

Моделирование пропитки проводилось с использованием программного продукта PAM-RTM.

Отработка методики моделирования пропитки крыши и кузова вагона-хоппера

На конструктивно подобных образцах крыши, представляющих наибольшую сложность с точки зрения возникновения зон непропитки, отработывалась методика построения и верификация математической модели. Были изготовлены образцы зоны шпангоута, силового пояса и пешеходной зоны, на которых и проходила настройка модели. Проницаемость стеклоткани была измерена плоскостными и сквозным пермеаметрами по методике, изложенной в [2].

Сопоставление результатов моделирования пропитки 1/3 крыши с результатами эксперимента показали хорошую сходимость, как по фронту течения, так и по времени пропитки. Это позволило провести предварительное моделирование пропитки целикомой крыши и в дальнейшем кузова, и дать рекомендации по организации их схем пропитки.

1. Сафонов А.А. Математическое моделирование пропитки армирующего наполнителя стеклопластиков при вакуумной инфузии // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. №6, с. 70-78.

2. А.Е. Ушаков, Ю.Г. Кленин, Т.Г. Сорина, Е.И. Корниенко, А.А. Сафонов. Оценка проницаемости заготовок из сухого наполнителя, предназначенных для изготовления панелей вакуумной инфузией // Композиты и наноструктуры. 2013. №1, с. 46-56.

РАЗРУШЕНИЕ ЭЛАСТОМЕРНОГО КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ «МЕТАЛЛ-КЕРАМИКА» В УСЛОВИЯХ КВАЗИСТАТИЧЕСКОГО ТЕПЛОСИЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

А.В. Терехин^{1,2}, В.И. Неповинных¹, А.М. Думанский^{2,3}

¹ГНЦ РФ ОАО «ОНПП «Технология», г.Обнинск, Россия;

²Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; alduman@rambler.ru

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

Представлено расчетно-экспериментальное исследование долговечности клеевого соединения «металл-керамика» на основе эластомерного герметика. Создана оригинальная экспериментальная установка и получены опытные данные о долговечности герметика при сдвиговой деформации в условиях повышенных температур. С помощью температурно-временной аналогии предложен метод расчета долговечности КС.

Ключевые слова: долговечность, эластомерный герметик, клеевое соединение, эластомерный клеевой шов.

В настоящее время эластомерные КС «металл-керамика» широко используются в современном самолето- и ракетостроении в самых высокоответственных конструкциях, узлах и агрегатах, зачастую работая при этом в экстремальных условиях (продолжительное механическое нагружение при повышенных температурах). Таким образом, исследования предельного состояния эластомерных КС и разработка методов прогнозирования их долговечности является важной и актуальной научно-технической задачей.

Для получения опытных данных о долговечности эластомерного КС создана оригинальная экспериментальная установка (рис. 1).

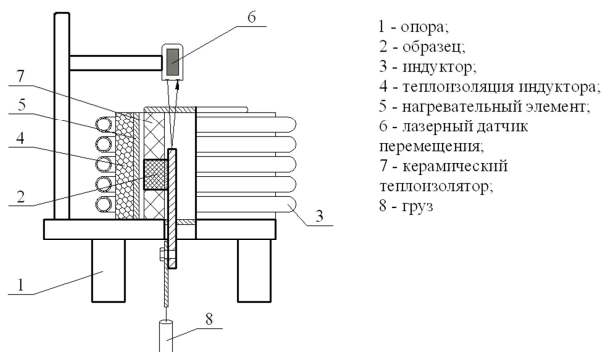


Рис. 1. Принципиальная схема установки

На созданной установке получены экспериментальные данные о долговечности КС «металл-керамика» на основе эластомерного герметика Висконт У-2-28 при повышенных температурах (300÷330)°С и различных уровнях сдвиговой нагрузки.

Для каждой кривой построена зависимость долговечности от параметров теплосилового воздействия в виде:

$$t_* = C(T)\tau_{12}^{-\alpha(T)}, \quad (1)$$

и построены уравнения регрессии.

На основании полученных данных методом температурно-временной аналогии (ТВА) полу-

чена аппроксимация для коэффициента температурно-временной редукции и общее уравнение долговечности [1-2]:

$$\lg\left(\frac{t_*}{a_T}\right) = 11,18 - 6,452 \lg \tau_{12}. \quad (2)$$

Значения температурно-временного коэффициента a_T для разных температур представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Значения температурно-временного коэффициента

T, °C	300	310	320	330
$\lg a_T$	0	1,7	2,0	2,75

На рисунке 2 приведены расчетные и экспериментальные данные долговечности КС.

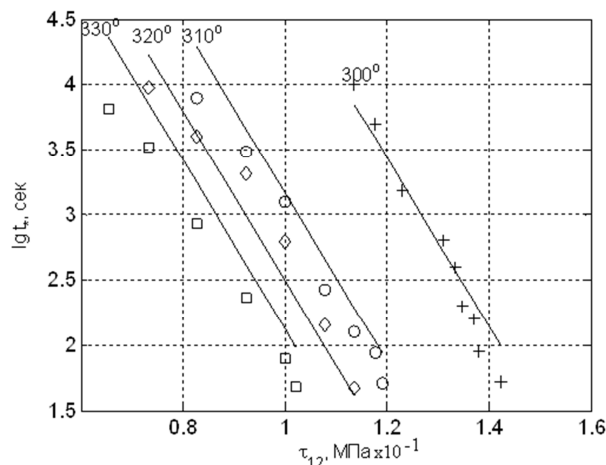


Рис. 2. Расчетные и экспериментальные зависимости долговечности КС от параметров теплосилового воздействия

Из рис.2 видно, что расчетные и экспериментальные данные показывают удовлетворительную сходимость.

1. Бартенев Г.М., Зуев Ю.С. Прочность и разрушение высокоэластических материалов. Л- М.: Химия. 1964. 388 с.

2. Аскадский А.А., Хохлов А.Р. Введение в физико-химию полимеров. М.: Научный мир. 2009. 384

РЕШЕНИЕ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ЗАДАЧ ТЕРМОУПРУГОСТИ С УЧЕТОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ БЕРЕГОВ ТРЕЩИН

Р.В. Гольдштейн¹, В.В. Лобода², М.Н. Перельмутер³

^{1,3}Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия, perelm@ipmnet.ru

²Днепропетровский национальный университет имени О. Гончара, Днепропетровск, Украина

Метод граничных интегральных уравнений используется для решения задач термоупругости для композиционных материалов с трещинами на границах раздела фаз и учетом взаимодействия берегов трещин. Взаимодействие между берегами трещин моделируется распределенными усилиями или набором сосредоточенных сил, приложенных к берегам трещины.

Ключевые слова: *граничные интегральные уравнения, соединения материалов, трещины*

Рассматривается численное решение методом граничных интегральных уравнений задач термоупругости для композиционных материалов при наличии трещин на границах раздела фаз и действии внешних механических и нестационарных тепловых нагрузок. Учитывается взаимодействие берегов трещин при наличии подкрепляющих волокон-связей в концевой области трещины. Взаимодействие берегов трещин в концевой области на границе соединения различных материалов моделируется распределенными усилиями или набором сосредоточенных поверхностных сил, приложенных к берегам трещины и зависящих от раскрытия трещины. Полагается, что концевая область является частью трещины, а коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) определяются в вершине (вдоль фронта) трещины, совпадающей с вершиной концевой области. Для моделирования криволинейных трещин и трещин на границе соединения материалов конструкция разделяется на подобласти, для каждой из которых записывается граничное интегральное уравнение [1]. Рассмотрены различные случаи расположения трещины относительно границы раздела материалов. Развитие трещины при квазистатическом нагружении рассматривается на основе двухпараметрического критерия роста трещин с концевой областью [2-4].

Для решения нестационарной задачи теплопроводности используется формулировка ГИУ задачи теплопроводности без вычисления интегралов по объему тела и шаговая схема по времени. Результаты решения задачи теплопроводности используются как начальные данные для задачи термоупругости. В задачах термоупругости используются ГИУ с фундаментальным решением Кельвина. Все интегралы по объему тела, содержащиеся в ГИУ и необходимые для учета нестационарной тепловой нагрузки, преобразованы к эквивалентной граничной форме.

Для численного решения ГИУ используются квадратичные изопараметрические граничные элементы и специальные граничные элементы вблизи вершины трещины, учитывающие асимптотическое поведение переменных (температуры, теплового потока, перемещений и напряжений). Разработан комплекс программ для решения двумерных, осесимметричных и про-

странственных задач термоупругости с трещинами при термомеханическом нагружении. В результате решения задачи определяются тепловое и напряженно-деформированное состояние тела, а также КИН для трещин.

Выполнен ряд расчетов для трещин с концевой областью на границе соединения материалов. Для оценки точности и области применения методики результаты расчетов методом ГИУ сопоставлены с результатами, полученными ранее методом сингулярных интегро-дифференциальных уравнений, аналитическими и численными методами [2-3, 5-6] для трещины на границе соединения двух полуплоскостей из одинаковых или различных материалов. Рассмотрены задачи для криволинейных трещин с концевой областью и расположенных на границе соединения матрицы и включения в композиционном материале. Выполнено параметрическое исследование влияния жесткости связей в концевой области трещины, физико-механических параметров матрицы и включения, а также размера начальной концевой области трещины, на величину КИН.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проекты № 13-01-90430, № 14-01-00869, № 14-08-01163).

Литература

1. Перельмутер М.Н. Анализ напряженного состояния в концевой области трещины на границе раздела материалов методом граничных элементов // Вычислительная механика сплошных сред. 2012. Т. 5, № 4. С. 415-426
2. Goldstein R.V., Perelmuter M.N. Modeling of bonding at the interface crack // International J. of Fracture. 1999. V. 99. №1-2. P.53-79.
3. Гольдштейн Р.В. Перельмутер М.Н. Трещина на границе соединения материалов со связями между берегами // 2001, Изв. РАН. МТТ, №1, С. 94-112
4. Перельмутер М.Н. Критерий роста трещин со связями в концевой области // ПММ. 2007. Т. 71. Вып. 1. С. 152-171
5. Voloshko O., Lapusta Y., Loboda V. Analytical and numerical study of cohesive zones for a crack in an adhesive layer between identical isotropic materials // Engineering Fracture Mechanics. 2010. V.77. No.13, P.2577-2592
6. Voloshko O., Loboda V., Lapusta Y. Investigation of a crack situated in a thin adhesive layer between two different isotropic materials // Acta Mechanica, 2014, P.1-14, DOI 10.1007/s00707-014-1196-z

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОЛУЧЕНИЯ НОВЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПРИ ПОМОЩИ ВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

С.Р. Ганиев, В.П. Касилов, Д.В. Курменев, А.П. Пустовгар

Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН, Москва, Россия; kurmenyov_dv@mail.ru

Представлены результаты экспериментальных работ, выполненных в НЦ НВМТ РАН, в области применения волновых технологий для создания полимерных композиционных материалов (ПКМ), в том числе нанокompозитов и высоконаполненных композитов. Показаны новые возможности волновых технологий в области создания новых ПКМ со стабильными физико-химическими характеристиками. Ключевые слова: волновые технологии, нанокompозиты.

Постановка задачи

Известно, что качество ПКМ обеспечивается, в первую очередь, совместной работой матрицы и армирующего материала и/или наполнителя. Для придания определенных технологических свойств или повышения физико-механических характеристик или иных свойств, дополнительно, в состав ПКМ, могут вводиться модификаторы. Содержание данных модификаторов может составлять 10^{-3} мас.% и выше, при этом размер их частиц в ряде случаев не превышает 100 нм, что вызывает проблемы равномерного распределения частиц модифицирующих добавок в полимерном связующем, представляющим собой высоковязкую среду.

В НЦ НВМТ РАН на основе методов нелинейной волновой механики разработан новый класс технологий – волновых технологий – перемешивания многофазных, в том числе высоковязких сред, позволяющих решать данные задачи [1-3].

Экспериментальная часть

На первом этапе работ проводилась оценка степени влияния волновых воздействий на распределение частиц микро – и нанодобавок в полимерной матрице на микроуровне.

В качестве наполнителя использовался тех-углерод марки П803 (1% масс.), полимерного связующего – смолы ЭД-20 и ДЭГ-1 (9:1). Обработку смеси проводили на установке ВСМ-3 при двух режимах: режим волнового смешения и контрольный режим без волнового воздействия при работе только циркуляционного привода. Микрофотографии, характеризующие изменение распределения частиц технического углерода в процессе перемешивания при волновом воздействии и без него, приведены на рис.1.

Отдельная серия экспериментов направлена на исследование возможности изготовления полимер-неорганических высоконаполненных композитов с применением волновой технологии.

В исследовании в качестве связующего использовали состав ЭД-20:ДЭГ-1:ТЭАТ-1 в соотношении 9:1:1. Наполнитель, содержание которого составляло 84 % мас., представлял собой смесь порт-

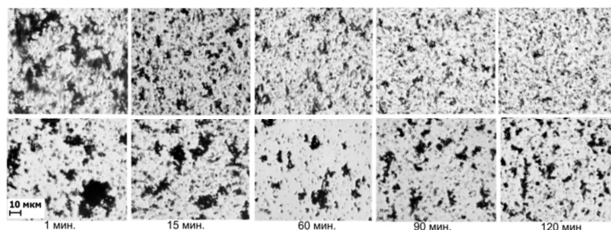


Рис. 1. Микрофотографии проб эпоксидного состава с техническим углеродом: волновое смешение (сверху), перемешивание без волнового воздействия (снизу) ландцемента марки М500 и микрокремнезема в соотношении 83:17. Обработка осуществлялась на установке волнового смешивания ВСМ-3.

В таб. 1 представлены результаты прочностных испытаний полученных образцов.

Таблица 1. Прочностные свойства образцов высоконаполненных ПКМ

Испытание	Линейные размеры образца, мм			Разруш. нагрузка кН	Прочность МПа
	длина	шир	толщ.		
Прочность на растяж.	-	11,0	13,0	4,16	32,9
	-	11,0	13,5	4,81	32,46
Прочность на растяж. при изгибе	180	11	10	0,573	78,18
Прочность на сжатие	13	11	10	17,2	120,31

Результаты и их обсуждение

1. Волновая обработка обеспечивает высокая однородность смешения различных видов микро- и нанонаполнителей в высоковязких средах (эпоксидных смолах).

2. Получены высоконаполненные композиты с тонкодисперсным наполнителем и с содержанием полимера не более 16%, обладающие высокой прочностью на сжатие (120 МПа) и относящиеся к негорючим материалам.

1. Ганиев Р.Ф., Ганиев С.Р., Касилов В.П., Пустовгар А.П. Волновые технологии в инновационном машиностроении. - Изд. 2-е, перер. и доп. – М.: Научно-изд. центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2012. – 92 с.

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

Ганиев Р.Ф. О современном состоянии и перспективах развития ИМАШ РАН. Проблемы механики машин и прорывных технологий. // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2014, №3, с. 11-36

МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА В РАМКАХ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

В.А. Косарев¹, П.В. Шершак¹

¹ОАО НИАТ, НПЦ «НИАТ Композит», Москва, Россия; spc@niat.ru

Предложена методика численного решения физически нелинейной задачи анализа прогрессирующего разрушения композиционного материала. Решена задача расчета прочности плоского образца с отверстием из композиционного материала с учетом процесса разрушения. Проведены сравнения результатов расчета с результатами экспериментов.

Ключевые слова: физически нелинейная задача прочности, метод конечного элемента, механика разрушения композиционного материала

Актуальность работы

Высокая вариативность структурного исполнения конструкций из композиционного материала (КМ), наряду с его сложным механизмом разрушения, влечет за собой необходимость наличия обширной базы проведенных экспериментальных исследований, направленных на поиск рационального решения. Математическое моделирование поведения КМ, в том числе с учетом процесса разрушения, позволяет спрогнозировать работоспособность конструкции, снизив расходы на проведение дорогостоящих экспериментов. Применение современных систем инженерного анализа (CAE-систем), таких как MSC Nastran, ABAQUS, ANSYS и др., позволяет эффективно решать задачи углубленного анализа сложных конструкций из КМ. Актуальность наличия собственных инструментов для анализа зарождения и развития повреждения в КМ, а так же его влияния на конструкцию в целом, обуславливается высокой рыночной стоимостью упомянутых систем.

Предлагаемый подход

В ОАО НИАТ была разработана и применяется на практике методика численного анализа прогрессирующего разрушения КМ. Методика основана на применении метода последовательного нагружения В.З. Власова [1], что позволяет проводить анализ разрушения КМ на основании результатов, полученных из решения задачи в линейно-упругой постановке. Методика прогрессирующего разрушения объединяет в себе три компонента: (а) численное определение напряженно-деформированного состояния (НДС) в слоях КМ; (б) оценка прочности КМ с помощью принятой теории разрушения; (в) корректировка свойств КМ в соответствии с принятой моделью деградации.

Методика реализована в виде программы управления процессом анализа, получившей название «МИЛАНА» [2]. Код управляющей программы, а так же коды внутренних процедур по определению, классификации и учету влияния разрушения в КМ, написаны в рамках математического пакета Scilab.

В качестве численного метода используется метод конечного элемента (МКЭ). Решение задачи МКЭ осуществляется средствами коммерческого продукта MSC Nastran 2007r1b.

Результаты применения

С помощью разработанной методики был проведен расчет прочности плоского образца с отверстием из КМ, нагруженного продольным растягивающим усилием. Результаты расчета по предложенной методике сравнивались с результатами проведенных испытаний в лаборатории ОАО НИАТ, а так же с результатами расчета с помощью коммерческой программы MSC Marc. Полученные в результате комплексного анализа данные максимальной несущей нагрузке для исследуемого образца представлены на рис. 1.

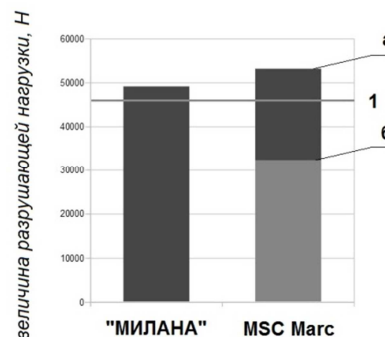


Рис. 1. Сравнение полученных результатов прочности образца

На рис. 1 горизонтальной линией 1 отмечен уровень среднего экспериментального значения разрушающей нагрузки. Расчетные значения разрушающей нагрузки, полученные в решателе MSC Marc, отмеченные на рис. 1 как «а» и «б», получены при разных применяемых моделях деградации КМ.

1. Петров В.В.. Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластин и оболочек. Саратов: Изд-во Саратов. Ун-та, 1975. 118 с.
2. Косарев В.А.. Методика решения физически нелинейных задач прочности конструкции с концентраторами напряжений. М.: Авиационная промышленность. 2014. № 2. С.26—31

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.А. Дудченко

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия;
a_dudchenko@mail.ru

В докладе излагается подход и методика проектирования агрегатов и конструктивных элементов самолета, выполненных из композиционного материала. В методике используется преимущество многослойного композита перед металлом, когда в структуре материала можно определенным слоем переносить в структуру другого элемента в сечении конструкции. Главное преимущество использования аналитического подхода излагаемого подхода перед методом МКЭ при эскизном проектировании – это большая экономия времени при достаточной точности расчетов.

Композиционный материал, конструкция, крыло, фюзеляж, стабилизатор, лонжерон, оптимальное проектирование, параметрический метод.

Цель рационального проектирования сформулирована как определение конфигурации конструкции, которая будет надежно работать при минимуме массы при ограничениях по прочности, жесткости и устойчивости, и с учетом конструктивно-технологических ограничений. Оптимизация любого создаваемого проекта является основной целью при разработке конкретного объекта, который при своем функционировании удовлетворяет определенным требованиям и ограничениям. На примере создания такой сложной конструкции как летательный аппарат, полная оптимизация включает в себя проектно-конструкторские разработки, изготовление экспериментальной партии аппаратов, проведение полного объема прочностных и летных испытаний, изготовление серийных изделий, их эксплуатация [1]. Как видно из перечисленных факторов, при решении задачи оптимизации в полном объеме, оценка эффективности проводится в стоимостном исчислении. В то же время результаты оптимизации на разных этапах разработки могут оцениваться в других единицах. Это относится к конструкции планера летательного аппарата, оптимум для которой оценивается минимумом ее массы при удовлетворении всем прочностным и жесткостным ограничениям, конструктивно-технологическим требованиям и условиям эксплуатации, что приносит выигрыш в стоимости эксплуатации. Необходимо отметить, что уровень оптимального проектирования определяется уровнем достижений механики композиционных материалов и конструкций из них, то есть в области моделирования физико-механических свойств, методов расчета предельных состояний по прочности, устойчивости, динамики и методов оптимизации.

Методы. В основе проектировочного подхода лежит параметрический метод оптимизации и метод равнопрочности. Учитывая особенность свойств многослойного композита проектирование параметров в конструкции в большинстве случаев можно разбить на 2 этапа. **Этап 1.** Он включает в себя определение структуры, толщины слоев в каждой панели, считая их пластинами и

удовлетворяя трем ограничениям: - ограничение по прочности; - ограничение по крутильной жёсткости сечение; - ограничение по изгибной жесткости сечения конструкции. Целевой функцией в этом случае будет масса сечения. При проектировании используется метод последовательного приближения. **Этап 2.** Проектирование делается с учетом конкретного членения конструкции на отдельные элементы: лонжероны, нервюры, панели, поверхности управления, носовые части и т.п. С учетом конструктивно-силовой схемы и конструктивно-технологических соображений выбирается количество лонжеронов или шпангоутов и их расположение. Положение нервюр уточняется расположением узлов крепления поверхностей управления (элеронов, щитков и закрылков) к стенке заднего лонжерона. После сделанных замечаний, можно сделать перераспределение материала слоев панелей без изменения условий и характера работы конструкции. При этом необходимо обеспечить устойчивость элементов крыла при их сжатии, надежное соединение элементов крыла и фюзеляжа, прочность в районе вырезов и люков и т.д. Учитывая особенность структуры КМ можно, в отличие от металлической конструкции, перераспределить материал по элементам крыла и фюзеляжа таким образом, чтобы жёсткостные и прочностные свойства в нем практически не изменялись. Так продольный слой обшивки можно перераспределить в пояса лонжеронов и продольные подкрепления панелей крыла и фюзеляжа. В ограничениях используются расчетные методы теории упругости и строительной механики.

Результаты. Как показывает практика, использование предлагаемого подхода, в отличие метода МКЭ, позволяет быстро и достаточно надежно определять параметры конструкций. Все это успешно подтверждено практическими расчетами на реальных композитных конструкциях.

1. Дудченко А.А. Прочность и проектирование авиационных конструкций из композиционного материала. М.: Изд-во МАИ, 2007. 200 с

РЕЗИНОКОРДНАЯ ОБОЛОЧКА ЭЛАСТО-ВИНТОВОГО ДВИЖИТЕЛЯ

Ф.Д. Сорокин¹, М.В. Попков¹

¹Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

mihpvm@gmail.com

Рассматривается конструкция эласто-винтового движителя, разрабатываемого кафедрой многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов МГТУ им. Н.Э. Баумана. Основным элементом движителя является резинокордная оболочка, на поверхности которой при перекаtywании роликов формируется волна, имитирующая вращение шнека. Исследовано напряженно-деформированное состояние резинокордной оболочки в области контакта с роликами.

Ключевые слова: шнекороторный движитель, резинокордная оболочка, контактная задача.

Шнекоходы обеспечивают уникальной проходимостью в условиях грязи, снега и льда. Первый шнекоход изобретён в 1868 г. Якобом Моратом. Шнекороторный движитель представляет собой два вращающихся винта Архимеда и является практически единственным возможным видом движителя для некоторых разновидностей грунтов. Существенным недостатком шнекороторного движителя являются большие энергетические затраты, связанные с преодолением трения скольжения между грунтом и поверхностью шнека при его вращении. Если заменить трение скольжения, связанное с вращением шнека на трение качения, то энергетические затраты могут быть снижены многократно [1,2]. С этой целью на кафедре многоцелевых гусеничных машин и мобильных роботов МГТУ им. Н.Э. Баумана традиционный жесткий шнек предлагается заменить эластичной резинокордной оболочкой, нагруженной внутренним давлением, по внутренней поверхности которой перекаtywаются ролики (рис. 1).

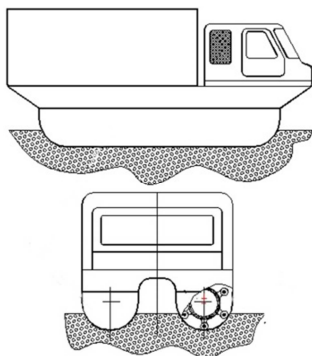


Рис.1. Транспортное средство с эласто - винтовым движителем

Ролики формируют волну на поверхности резинокордной оболочки, которая имитирует вращение шнека. Винт Архимеда с роликами на кромке резьбы, вращающийся внутри эластичной оболочки, произведёт аналогичный эффект.

Предлагаемая конструкция эласто-винтового движителя практически не исследована. В работе [2] рассчитано лишь начальное напряженно - деформированное состояние резинокордной оболочки движителя под действием внутреннего давления. Там же предложена методика вычис-

ления углов укладки нитей, усилий в нитях и формы меридиана оболочки в начальном состоянии.

Ролики при взаимодействии с оболочкой должны формировать волну достаточно большой амплитуды, иначе движитель не будет эффективным. Это означает, что задача расчета напряженно- деформированного состояния оболочки в зоне контакта с роликами является геометрически нелинейной.

Для решения указанной контактной задачи с учетом больших перемещений авторами данного доклада был применен бессеточный метод (БМ). Форма деформированной поверхности оболочки задавалась набором традиционных базисных функций БМ. По заданным перемещениям восстанавливались деформации, внутренние усилия и неуравновешенные распределенные нагрузки на поверхности оболочки, которые фактически являются невязками.

Невязки минимизировались методом установления за счет медленного изменения координат точек на поверхности. Установление осуществлялось интегрированием уравнений вязкого движения для перемещений базисных точек. При этом перемещения по нормали к поверхности ролика (в металл ролика) считались запрещенными и соответствующие уравнения движения игнорировались. По завершении процесса установления напряженно - деформированное состояние резинокордной оболочки оказалось найденным.

Представлены результаты решения контактной задачи: форма деформированной поверхности, усилия в нитях, распределение контактного давления между резинокордной оболочкой и роликом эласто - винтового движителя.

1. Наумов В.Н., Бяков К.Е. Улучшение роторно-винтового движителя мобильного робота путем использования технологий эластичной механики // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 10. Режим доступа: <http://engjournal.ru/articles/416/416.pdf> (дата обращения 28.09.2014).
2. Бяков К.Е., Чан Ки Ан, Сорокин Ф.Д., Машков К.Ю. Транспорезинокртное средство высокой проходимости с эласто-винтовым движителем // Изв. вузов. Машиностроение. 2014. №5. С. 38-43

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЫКЛАДКИ

И.В. Сергеев¹, А.Ю. Константинов², А.А. Сафонов³

¹Сколковский институт науки и технологий, Московская область, Одинцовский район, дер. Сколково, Россия;

² Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия;

³Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Проведено конечно-элементное моделирование процесса формирования термопластичного композиционного материала при автоматизированной выкладке лент с лазерным нагревом. Для этого численно реализованы математические модели формирования контакта и консолидации слоев, кристаллизации термопластичного связующего, потери массы – термического разложения, теплопроводности и остаточных напряжений. Приводится описание численных процедур, реализованных в ППП ABAQUS в виде пользовательских моделей материала.

Ключевые слова: термопластичные композиционные материалы, моделирование выкладки лент, лазерный нагрев

Введение

Процесс выкладки лент с использованием лазерного нагрева представляет собой перспективную технологию изготовления изделий из термопластичных композитов [1], сочетающую высокую производительность с возможностью изготовления компонентов сложной формы. Процесс включает автоматизированную выкладку и уплотнение лент из термопластичного препрега для постепенного инкрементного формирования композитной конструкции. Лазер производит нагрев ленты и ламината, которые затем консолидируются вместе под воздействием приложенного тепла и давления (рис.1).

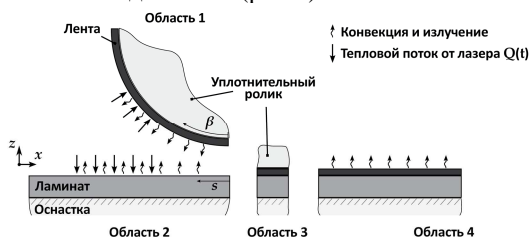


Рис. 1. Расчетные области термической модели

Межслоевое соединение термопластичных композитов

Процесс формирования соединения схематически показан на рис.2. Согласно современным источникам [2], этот процесс объединяет два разных, но происходящих одновременно явления: (i) формирования плотного контакта между соединяемыми элементами, и (ii) процесса межмолекулярной диффузии, также известного как процесс "заживления" (*healing*), которые протекают между двумя поверхностями, находящимися в тесном контакте. Начальные неровности поверхности деформируются вследствие воздействия тепла и давления. Процесс выкладки лент с использованием лазерного нагрева характеризуется чрезвычайно коротким временем, в течение которого должно происходить формирование и уплотнение соединения.

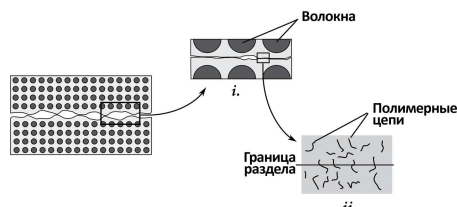


Рис. 2. Межслоевое соединение термопластичных композитов

Процесс выкладки лент с использованием лазерного нагрева характеризуется чрезвычайно коротким временем, в течение которого должно происходить формирование и уплотнение соединения. Например, доступное для обработки время составляет менее 25 мс при скорости выкладки, составляющей 200 мм/с и длиной участка контакта между роликом и ламинатом, составляющей 5 мм.

Реализованная в настоящей работе модель процесса выкладки лент показана на рис.3.



Рис. 3. Схема моделирования процесса выкладки лент с использованием лазерного нагрева

1. M. Steyer, M. Dubratz, A. Schutte, C. Wenzel, and C. Brecher. Laser-assisted thermoplastic tape-laying systems. JEC Composites Magazine, 47:39-41, 2009.
2. W. J. B. Grouve, L. L. Warnet, R. Akkerman, S. Wijskamp, and J. S. M. Kok. Weld strength assessment for tape placement. International Journal of Material Forming, 3(1): 707-710, 2010

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДРАПИРОВКИ ДВУМЕРНЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ ПРЕФОРМ НА ОСНОВАНИИ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОГО СДВИГА

Б.Н. Федулов¹, И.В. Сергеичев¹, А.А. Сафонов²

¹Сколковский институт науки и технологий, Московская область, Одинцовский район, дер. Сколково, Россия;

²Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия;

Композитные изделия при изготовлении путем формования препрегов или сухих армирующих преформ с последующей пропиткой смолой за счет вакуумирования могут содержать локальные дефекты, связанные с отклонением волокон. Задачей проектирования технологического процесса изготовления является моделирование и отработка формования не отверждённого композита, с целью уменьшения количества дефектов такого рода. В работе предлагается возможный вариант к подходу моделирования процесса формования слоистого композиционного материала, с учетом нелинейных сдвиговых свойств.

Ключевые слова: композиционные материалы, моделирование драпировки, вакуумная инфузия

Введение

При формовании композиционных сухих преформ, а также препрегов, возможно появление складок и морщин, что в свою очередь, снижает механические характеристики изготавливаемого изделия. Таким образом, становится важным иметь возможность моделирования такого рода процессов. Задача осложняется ярко выраженной нелинейностью сдвиговых свойств такого рода материалов. В работе рассматривается возможный подход к моделированию таких материалов. В качестве определяющих соотношений предлагается использование следующих уравнений:

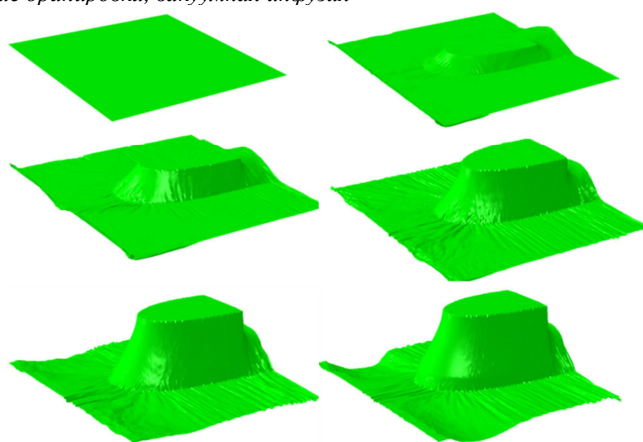
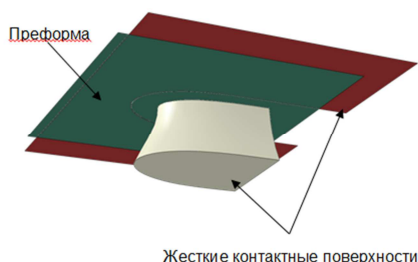
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_1 & -\nu/E_1 & 0 \\ -\nu/E_1 & 1/E_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/G(q) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix}$$

где $G(q)$ есть произвольная зависимость от параметра q , который в системе координат связанной с направлениями волокон равен сдвиговой компоненте деформации ε_{12} .

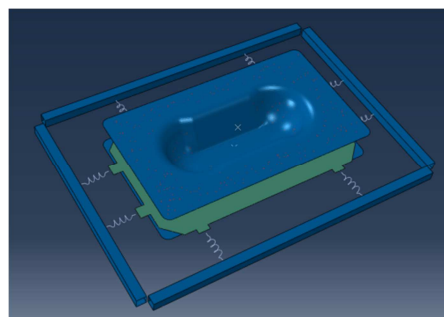
Задачи формования слоистого композита

В рамках работ с компанией ОАК был проанализирован способ формования конкретных авиационных деталей из композиционных материалов.

Ниже на рисунках показаны результаты моделирования описанного процесса. Схема формования изображена на следующем рисунке.



Также был разработан виртуальный стенд для отработки технологии формования термопластичных материалов.



Основная задача такого моделирования — это корректировка данных поступающих на вход прочностного анализа. Важным является учет изменения ориентации армирующих волокон, а также предсказание появления складок

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ПУЛТРУЗИИ ПРОФИЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

А.А. Сафонов¹, А.Ю. Константинов²

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

²Институт механики ННГУ, Нижний Новгород, Росси

В работе описывается методика численной оценки остаточных технологических деформаций в профилях сложного сечения композиционных материалов на основе терморезактивного связующего. Приводится пример прогноза коробления стеклопластикового швеллера для мостовых конструкций в процессе пултрузии.

Ключевые слова: пултрузия, коробление, кинетика химической реакции, отверждение, композиционный материал, терморезактивное связующее

Цель

Конструкции из полимерных композиционных материалов являются весьма дорогостоящими по сравнению с конструкциями из традиционных материалов: дерево, бетон, металл. Во многих областях применения, особенно в случаях, когда вес конструкции и стойкость к агрессивным средам имеет большое значение, конструкции из композиционных материалов превосходят традиционные аналоги, однако при этом они также должны оставаться конкурентоспособными с точки зрения стоимости.

Добиться этого можно путем изготовления крупных интегральных конструкций с более низкой стоимостью производства. Эта задача является выполнимой и реализуется в различных областях. Однако, она требует хорошего контроля деформаций, обусловленных технологическим процессом, поскольку они могут привести к выходу размеров готового изделия за установленные спецификацией (ТУ) пределы, что в свою очередь вызывает проблемы при подгонке компонент во время сборки сложных составных конструкций. Задача получения заданной формы изделия как правило решается опытным путем (методом проб и ошибок) при варьировании различных параметров технологического процесса. Такая итерационная процедура может быть весьма дорогостоящей, трудоемкой и неэффективной, особенно в случае производства крупных компонентов. Таким образом, актуальной задачей является построение математических моделей прогноза остаточных напряжений и деформаций в процессе изготовления изделий из полимерных композиционных материалов. Наиболее экономичным способом производства конструктивных профилей из полимерных композиционных материалов является пултрузия.

Моделирование процесса пултрузии

Для адекватного описания того, происходящих процессов в заготовке в ходе технологического процесса (при прохождении через разогретую фильеру), необходимо учитывать следующие

явления: перенос тепла в КМ, химическая реакция полимеризации, внутреннее выделение энергии в ходе химической реакции, возникновение в заготовке температурных и химических деформаций, тепловой и механический контакт с фильерой, изменение тепловых и механических характеристик КМ в результате фазовых превращений связующего. Основной отличительной особенностью моделирования поведения КМ с терморезактивной матрицей является необходимость определения фазового состояния связующего во времени.

В настоящей работе моделировался процесс изготовления швеллера, армированного по внешней границе тканью, а внутри (ровинг) - волокнами в направлении, перпендикулярном плоскости сечения.

На рис. 1 показаны временные зависимости степени полимеризации (левая вертикальная ось) и температуры (правая вертикальная ось) в точках ткани (сплошная линия) и ровинга (пунктирная линия). Вертикальной линией отмечен момент выхода сечения из фильеры. Видно, что на момент выхода из фильеры матрица композита полностью полимеризуется.

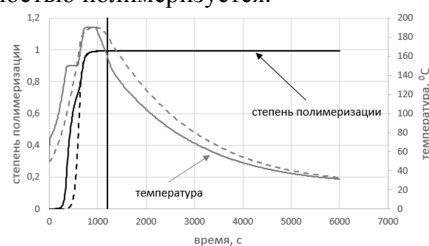


Рис. 1. Временные зависимости степени полимеризации и температуры

На рис. 2 показаны поля перемещений точек сечения после остывания.

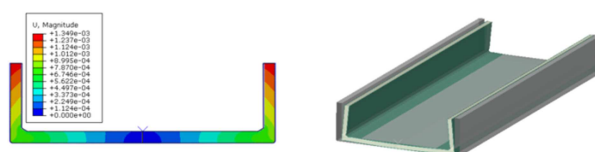


Рис. 2. Коробление профиля после изготовления

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ОБТЕКАТЕЛЯ ИЗ СТЕКЛОПЛАСТИКОВ С ПОМОЩЬЮ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Саввин А.И.

ИМАШ РАН, Москва, Россия; saanig@mail.ru

В работе представлен расчет механических свойств обтекателя из стеклоткани с алюмохромофосфатным связующим с различными углами армирования. Разработана математическая модель обтекателя и решена краевая задача для различных укладок слоев укладки стеклоткани с помощью расчетного пакета Ansys.

Ключевые слова: радиопрозрачный обтекатель, деформация, элемент, угол армирования, модель, расчет, разрушение.

Целью работы являлось определение оптимальной структуры, при которой обтекатель выдерживает наибольшие аэродинамические нагрузки.

Характерной особенностью развития авиационной и ракетной техники является постоянное увеличение скоростей полета и маневренности летательных аппаратов. Это неизбежно приводит к возрастанию тепловых и аэродинамических нагрузок (давления) на агрегаты ЛА [1]. Одной из главных задач носовой части ЛА является сохранение стабильной работы системы «обтекатель-антенна». Необходимость в получении оптимальных радиопрозрачных свойств и высокой устойчивости к внешним факторам приводит к проблеме выбора материалов и прогнозирования их свойств за счет технологии изготовления и конструктивных параметров обтекателя.

Наиболее широко применяются для изготовления обтекателей стеклопластики и керамические материалы. Благодаря их свойствам, можно достичь высоких характеристик жаропрочности и радиопрозрачности. Широкое применение в конструкциях антенных обтекателей нашли алюмооксидная и кварцевая керамика, а также ситаллы. К сожалению, им присуща хрупкость, обусловленная особенностями и межатомного взаимодействия.

Стеклопластики в свою очередь имеют ряд положительных свойств. Стабильность физико-механических, диэлектрических и радиотехнических характеристик определяет работоспособность и надежность всей радиотехнической системы. Все эти свойства напрямую зависят от конструктивных особенностей материала. Прочность значительно в большей степени зависит от структуры наполнителя [2]. Физико-механические свойства стеклопластиков зависят не только от свойств исходных компонентов и степени наполнения, но и от направления укладки волокон.

Способы исследования

Данный радиопрозрачный обтекатель состоит из двух видов стеклотканей: ЦТМЗ – чехол и ТС 8/3-К-ГО – армирующая ткань. Для определения изменения механических характеристик композитного обтекателя при варьировании углом армирования необходимо экспериментально получить свойства материалов и смоделировать геометрическую 3D модель. Далее составляется пакет из слоев

стеклопластика с толщинами 0,25мм(ткань) и 7 мм(чехол) в пяти вариантах армирования. В данной задаче генерация конечно-элементной сетки производится элементами в виде тетраэдров. Граничные условия задаются путем приложения нагрузки 0,1 МПа и фиксирование нижней кромки обтекателя. После проведения расчета, определен оптимальный угол армирования (0^0) и найдены значения напряжений и деформаций (рис.1 и рис.2).

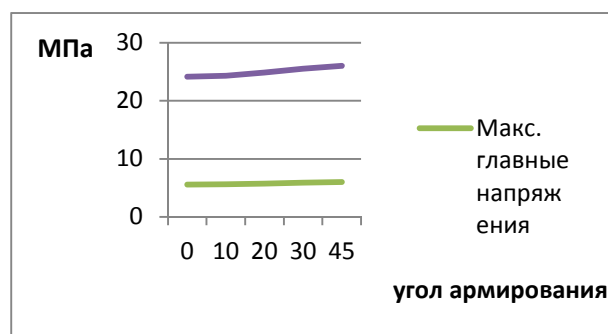


Рис.1 Зависимость главных и касательных напряжений от угла армирования

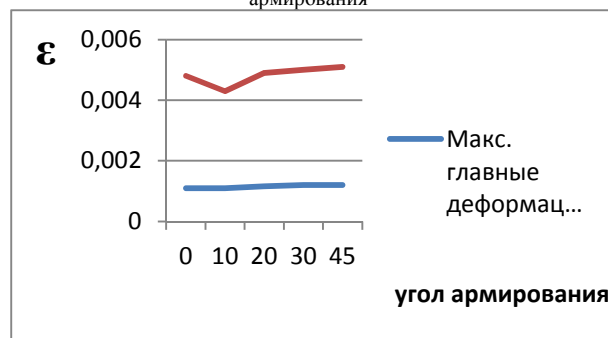


Рис.2 Зависимость главных деформаций и деформаций сдвига от угла армирования

Выводы

Определен оптимальный угол армирования радиопрозрачного обтекателя, при котором возникают наименьшие силовые факторы. Также получена модель НДС обтекателя по всем слоям.

1. Ромашин А.Г., Гайдачук В.Е., Карпов Я.С., Русин М.Ю. Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов. Проектирование, конструкционные материалы, технология производства, испытания. – Учеб. Пособие. - Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2003. – 239с
2. Гуртовик И.Г., Спортсмен В.Н., Стеклопластики радиотехнического назначения. – М.: Химия, 1987. 160с.

Разработка конструкции и технологии изготовления высоконагруженных элементов шасси авиационных изделий из полимерных композиционных материалов

Вякин В.Н.¹⁾, Козлов Д.М.²⁾, Пересыпкин В.П.¹⁾, Пересыпкин К.В.¹⁾, Степанов Н.М.¹⁾, Шахмистов В.М.¹⁾

¹⁾ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)» (СГАУ)

²⁾ ОАО «Авиаагрегат» (г. Самара)

Модернизация конструкции шасси дальне-магистральных самолетов с использованием композиционных материалов обещает значительное снижение веса. Работа посвящена разработке конструкции раскоса шасси с применением углепластика.

В настоящее время волокнистые композиционные материалы в конструкциях шасси применяют главным образом для небольших самолетов (малая авиация, истребители) (например [1]). Шасси больших дальне-магистральных самолетов испытывают большую нагрузку и большее количество циклов нагружения.

Разработка осложняется тем, что при модернизации шасси уже существующих самолетов конструкторы ограничены рамками тех размеров, какими обладают металлические элементы.

Целью настоящей работы является разработка проектных и технологических решений, позволяющих модернизировать силовые элементы самолетных шасси путем замены металла на волокнистый композиционный материал. Работа выполняется на основе проектирования конкретного элемента конструкции шасси – раскоса основной стойки шасси.

Силовой элемент авиационного шасси представляет собой главным образом стержни, соединяющиеся друг с другом шарнирно. С конструктивной точки зрения можно выделить две зоны раскоса:

- средняя часть элемента с регулярным сечением;
- конструкция цилиндрических шарниров.

В работе выполнен поиск оптимальной укладки для углепластика регулярной зоны силового элемента с точки зрения облегчения элемента. Разработка конструкции шарнира сопровождалась сложностями, связанными с ограничением на размеры силового элемента. Создать конструкцию, целиком изготовленную из углепластика, не удалось. Рассмотрены различные варианты конструктивного исполнения шарнира с различными металлическими вставками.

В процессе разработки силовое поведение элемента шасси моделировалось методом конечных элементов с помощью системы MSC.Nastran.

В результате предлагается конструкция конкретного элемента шасси. Реализовать потенциал снижения массы элемента, обусловленный заменой стали на углепластик, в полной мере не удалось из-за сложности применения волокнистых композитов в шарнирной части конструкции. Основная сложность заключается в высокой концентрации напряжений в проушинах шарниров

при их изготовлении из углепластика методом намотки (см. рисунок 1). При такой концентрации напряжений не удалось разработать конструкцию раскоса с габаритами стального, отвечающую требованиям прочности. Проблема решается с помощью металлической вставки (см. рисунок 2). Эта вставка обеспечивает прочность на смятие в шарнире и распределяет нагрузку на углепластиковую часть равномернее, чем в полностью углепластиковой проушине.

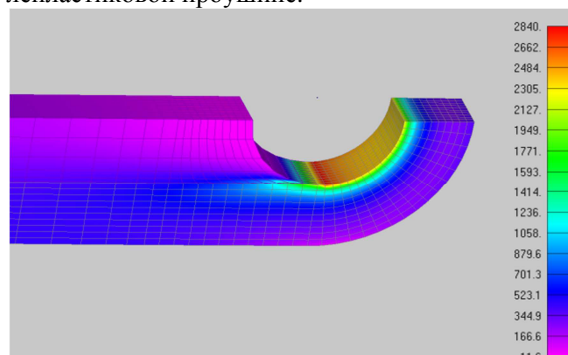


Рисунок 1 – Нормальные напряжения (МПа) вдоль армирующих волокон в зоне проушины раскоса

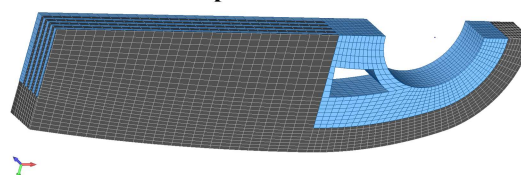


Рисунок 2 – Один из вариантов металлической вставки в зоне проушины

Масса элемента конструкции в стальном исполнении - ~60 кг, а масса разработанной конструкции силового элемента шасси – 34.5 кг.

Список использованных источников

1. Пересыпкин К.В., Степанов Н.М., Шахмистов В.М. Оптимизация конструкции ресоры из полимерных композиционных материалов легкого многоцелевого самолета Ястреб С-012// Сборник трудов III международной научно-практической конференции "Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития": Т.2. - Ульяновск: УлГУ, 2012 - с.107-117

ТЕРМОУПРУГИЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСНАСТКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ТРАНСФЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

В.А. Комаров, Е.И. Куркин, А.С. Кузнецов, Е.А. Кишов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), г. Самара, Россия; vkomarov@ssau.ru

Отработана технология термоупругого анализа оснастки для изготовления конструкций из полимерных композиционных материалов по трансферным технологиям с учетом различий коэффициентов линейного расширения материалов изделия и оснастки. Выданы рекомендации по модернизации конструкции, уменьшающие при нагреве отслоение стрингерной оснастки от формообразующей поверхности и отклонения формообразующей поверхности от ее первоначальной формы.

Методы трансферного формования композиционных материалов (КМ) являются актуальной альтернативой использования автоклавного оборудования и изготовления препрега, совмещают операции пропитки наполнителя связующим и формование детали, что приводит к сокращению времени производства и удешевлению технологии. Полимеризация смолы и, соответственно, закрепление формы происходит в термокамере при температуре 200°C. Из-за существенной разности в коэффициентах линейного расширения материалов оснастки и изделия деформированное состояние системы является достаточно сложным.

Разработана методика упрощенного конечно-элементного моделирования рам тонкостенной конструкции, состоящая в обоснованном использовании для моделирования рамы балочных элементов, что сокращает размерность решаемых задач на два порядка и трудоемкость в 5-6 раз. Вычислительными экспериментами показано, что предлагаемая упрощенная модель с использованием разработанной методики корректировки сечений балочных элементов обеспечивает погрешность вычисления перемещений рамы под нагрузкой не более 6%.

Авторами проведено исследование деформированного состояния рамы оснастки пропитки и выкладки авиационных конструкций из КМ (рис. 1), оценка чувствительности формы деформированного состояния к различным факторам и модификация конструкции рамы с целью повышения точности воспроизведения теоретического контура в различных условиях эксплуатации.

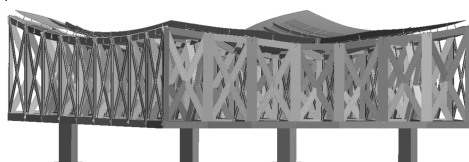


Рис. 1. Оснастка пропитки панелей из КМ

Проведено исследование поведения рамы в условиях несимметричной нагрузки, вызванной возможной неровностью пола и условиями транспортировки. Выявлена недостаточная крутильная жесткость. Предложен экономный способ четырехкратного повышения крутильной жесткости за

счет экономной структурной доработки.

Отработана технология термоупругого анализа конструкции рам с композиционной формообразующей поверхностью в системе ANSYS Workbench. Проведено комплексное исследование чувствительности формообразующей поверхности к способу ее соединения с рамой и стрингерной оснасткой. По результатам исследования выданы рекомендации по модернизации конструкции, которые уменьшают отслоение стрингерной оснастки от формообразующей поверхности с 6 мм до 0,3 мм (рис. 2) и отклонения формообразующей поверхности от первоначальной формы при нагреве с 2,3 мм до 0,4 мм (рис. 3).

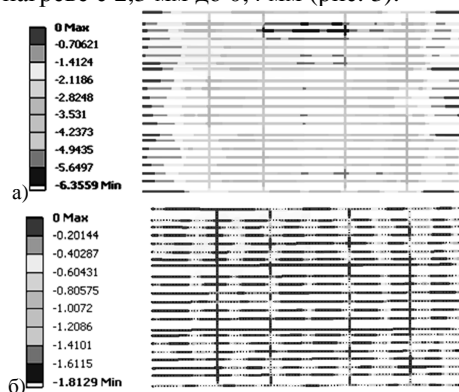


Рис. 2. Зазоры в контакте формообразующей поверхности и стрингерной оснастки: а) при стеснении стрингерной оснастки, б) без стеснения стрингерной оснастки

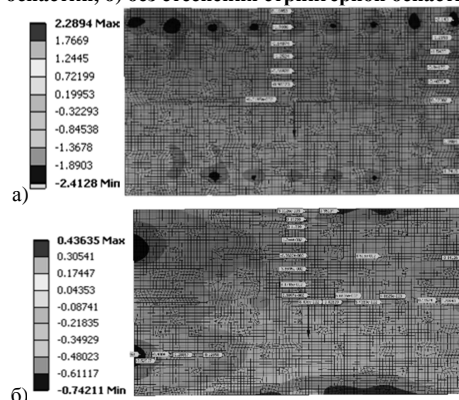


Рис. 3. Вертикальные перемещения формообразующей поверхности: а) жёсткое соединение поверхности с рамой, б) шарнирное закрепление по всем стержням

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЕ АГРЕГАТА МЕХАНИЗАЦИИ КРЫЛА ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА

В.А. Комаров¹, А.В. Черняев², Р.В. Чарквиани¹, Е.А. Кишов¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), г. Самара, Россия; vkomarov@ssau.ru

²University of Manitoba, Winnipeg, Canada

Рассматриваются основные этапы разработки высоконагруженного агрегата механизации крыла самолета из слоистого углепластика. Приводятся результаты статических и малоцикловых испытаний.

На примере проектирования интерцептора крыла самолета рассматриваются следующие этапы и особенности разработки тонкостенных авиационных конструкций из композиционных материалов (КМ):

1. Выбор силовой схемы агрегата. Показано использование для этих целей новой оптимизационной модели – тела переменной плотности (Рис. 1).

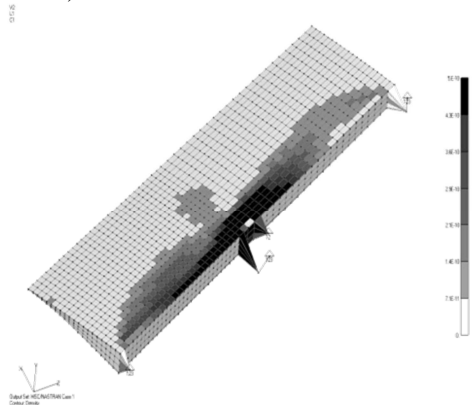


Рис. 1. Распределение плотности материала в теоретически оптимальной конструкции

2. Рассматривается многостенная трубчатая конструкция, ориентированная использование инфузионной технологии при изготовлении агрегата.

3. Рассматривается оптимизация структуры укладки биаксиальной ткани в дискретной постановке с использованием группового раскроя с приемлемой технологической сложностью (Рис. 2).

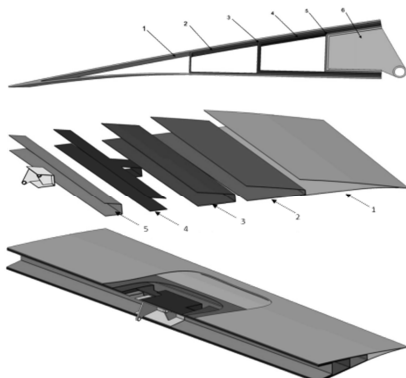


Рис. 2. Технологические группы слоев

4. Обсуждаются различные варианты моделирования конструкции из КМ на ранних стадиях проектирования в системе ANSYS.

5. Обсуждается проблема передачи больших сосредоточенных усилий на композитную конструкцию. Предлагается методика испытания узлов навески с использованием имитатора композитной части конструкции.

6. Рассматривается методика проектирования металлических узлов навески с использованием специальной оптимизационной модели.

7. Приводятся результаты статических и малоцикловых испытаний интерцептора с использованием специального оборудования (Рис. 3).

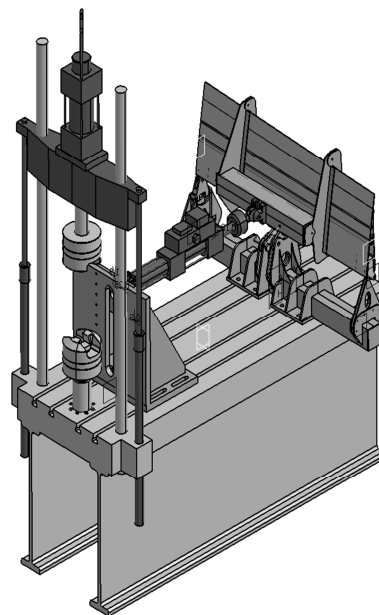


Рис. 3. Стенд для испытаний

1. Обсуждаются результаты экспериментальных работ по созданию интегрированных узлов навески.
2. Высказываются соображения по использованию термопластов в качестве узлов навески тонкостенных конструкций из слоистых КМ

ОСОБЕННОСТИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ МЕЖСЛОЕВЫМИ ЭФФЕКТАМИ

Е. А. Кишов¹

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет), г. Самара, Россия; eakishov@yandex.ru

Рассматривается задача адекватного моделирования тонкостенных авиационных конструкций из слоистых полимерных композиционных материалов, армированных тканями. Приводятся результаты расчета оригинальной конструкции интерцептора по двум возможным вариантам анализа в среде ANSYS.

Рассматривается тонкостенная конструкция высоконагруженного агрегата механизации крыла самолета с интегрированным узлом навески (Рис).

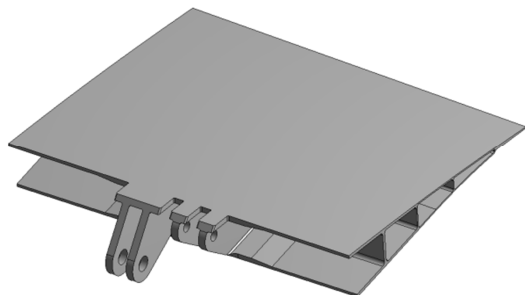


Рис. 1. Фрагмент интерцептора

Особенностью конструкции является «трубчатая» конструктивно-силовая схема, а также анизотропная структура армирования.

Проектная задача состоит в подборе углов укладки ткани и толщин стенок так, чтобы удовлетворялись требования прочности. Материал – эпоксидная смола RTM6, армированная углетканью Hexcel G0986. Технология производства – RTM.

Особенность данного изделия в том, что кронштейн навески формируется заодно с «телом» интерцептора, т. е. конструкция – интегральная.

Для решения поставленной задачи в системе ANSYS построена конечно-элементная модель фрагмента интерцептора, состоящая из оболочечных слоистых элементов (SHELL181). При этом, математическая формулировка последних допускает учет межслоевых и нормальных к плоскости элемента компонент напряжений и деформаций.

Оценка прочности конструкции выполнена при помощи феноменологических критериев прочности: по максимальным напряжениям, деформациям, критериям Цая-Ву и Цая-Хилла. Обсуждается применимость специфических критериев прочности (Хоффмана, Хашина и др.) к тканевым композиционным материалам.

Приводятся результаты анализа с учетом (Рис) трансверсальных компонент напряжений и деформаций и без них (Рис. 5).

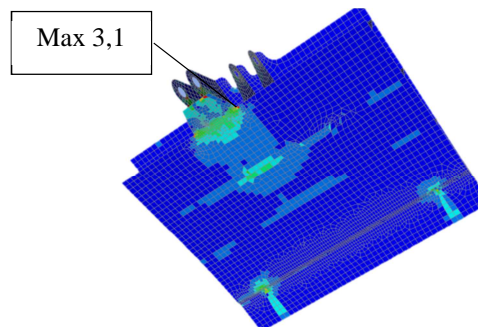


Рис. 2. Распределение индексов прочности в 3-D формулировке

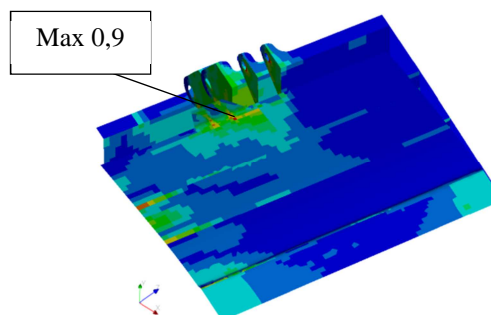


Рис. 5. Распределение индексов прочности в 2-D формулировке

Обращается внимание на существенное расхождение в оценке прочности.

В «трехмерном» случае (Рис) максимальный индекс находится в зоне, где оболочка значительной кривизны подвергается изгибу – там же имеет место мощный межслоевой сдвиг. Эксперимент (статические испытания, проведенные В. А. Комаровым и Р. В. Чарквиани) показал, что неучет межслоевых компонент является крайне существенным, поскольку агрегат разрушился по расслоению в соответствующих местах при нагрузке ниже расчетной.

Делается вывод о целесообразности перехода при расчете слоистых композиционных материалов на конечно-элементное моделирование твердотельными элементами

НАУЧНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ РАЗРАБОТКИ ЭФФЕКТИВНЫХ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ КОМПОЗИТНЫХ АГРЕГАТОВ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

В.Е. Гайдачук¹, В.В. Кириченко¹, А.В. Кондратьев¹, В.А. Коваленко²

¹Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина; kondratyev_a_v@mail.ru

²Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», Днепропетровск, Украина

Представлены некоторые основные результаты научного сопровождения разработки эффективных конструктивно-технологических решений композитных агрегатов ракетно-космической техники, полученные к настоящему моменту времени коллективом авторов в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «ХАИ».

Ключевые слова: композит, ракетно-космическая техника, конструктивно-технологические решения.

Современные изделия ракетно-космической техники (РКТ) характеризуются непрерывным усложнением, постоянно возрастающими требованиями к их технико-экономическим показателям, в том числе снижению их массы при росте относительных характеристик несущей способности. Поиск путей эффективного снижения массы РКТ привел к постоянно нарастающей тенденции использования в ответственных ее агрегатах композиционных материалов, имеющих ряд уникальных характеристик. Известно, что применение композитов позволяет существенно снизить массу конструкций, однако реализация этих возможностей связана в первую очередь с массовой эффективностью принятых конструктивно-технологических решений (КТР).

Доклад посвящен изложению некоторых основных результатов, полученных к настоящему моменту времени коллективом авторов в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Весь комплекс исследований представлен в виде научного сопровождения разработки эффективных КТР композитных агрегатов РКТ, реализованных на ГП «КБ «Южное».

Первое направление работ посвящено разработке комплексного подхода к оптимизации по массе проектных параметров композитных несущих отсеков ракет космического назначения (РКН) при многофакторном (статическом, тепловом, динамическом) силовом нагружении. Практическая реализация предложенного подхода обеспечила реализацию потенциальных возможностей снижения массы конструктивных элементов головного блока РКН «Циклон-4» при регламентированной несущей способности (прочности и устойчивости) с учетом практически всего спектра внешних воздействий.

В докладе анализируются результаты проведенных углубленных исследований напряженно-деформированного состояния и оценки несущей способности межступенного отсека РКН «Циклон-4» в регулярной зоне, а также фрагмента его стыка, состоящего из шпангоута и впервые разработанного соединительного композитного фитинга. Отмечается, что проведенные натурные статические испытания подтвердили рациональ-

ность всех принятых параметров КТР.

Вторым направлением работ стало научное сопровождение разработки эффективных КТР композитных агрегатов космической техники. В докладе приводятся результаты анализа схем армирования и рационального распределения материала для панелей солнечных батарей (СБ) различных конструктивно-силовых схем (КСС). Принятые рациональные параметры элементов рассматриваемых КСС панелей СБ обеспечили возможность реализации уровня их поверхностной массы, соответствующего мировым тенденциям для объектов данного класса.

В докладе изложены основные аспекты применения сотовых конструкций на основе углеродного наполнителя для создания терморазростабильных изделий космического назначения. Дана оценка применимости существующих аналитических зависимостей физико-механических характеристик углесотопласта на начальных стадиях проектирования космических конструкций. Разработана и апробирована опытно-промышленная технология создания углесотопласта и сотовых конструкций на его основе для блока оптико-электронного модуля космического аппарата, эффективность которых подтверждена результатами испытаний.

Для прецизионных изделий космического назначения разработан и реализован алгоритм определения рациональной структуры пакета композита, обеспечивающей максимальную форморазростабильность изделия в соответствии с предложенными критериями, учитывающими приоритетность направления стабильности его размеров. Приведены примеры проектирования оптимальной структуры композита, свидетельствующие о практической равноценности предложенных критериев.

В заключение доклада отмечается, что в настоящее время коллективом авторов в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» ведутся дальнейшие работы по научному обеспечению повышения эффективности композитных конструкций, что позволит значительно расширить сферу применения этого класса конструкций в области РКТ

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ЭФФЕКТЫ МЕТАСТАБИЛЬНОСТИ ПРИ СИНТЕЗЕ NiAl.

Ю.А. Абузин¹, С.А. Лурье²

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия;
23103102@mail.ru

²Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия

Механическая активация переводит материал из стабильного в метастабильное состояние, обладающее значительным запасом дополнительной внутренней энергии, запасённой в многочисленных дефектах структуры. Выделение энергии при низкотемпературном отжиге механоактивированных композиционных гранул системы Ni-Al связано с бездиффузионным формированием наночастиц Ni в Al при МА и их диффузией в твёрдый раствор при отжиге.

Цель

Целью работы является выявление основных закономерностей выделения тепла при низкотемпературном отжиге механоактивированных материалов.

Материалы и методы

Исследования проводили на композиционных гранулах (КГ), сформированных в ходе механической активации (МА) исходных порошков Ni и Al.

МА исходных порошков осуществляет бездиффузионный массоперенос и формирует метастабильные КГ со слоистой структурой и высоким энергонасыщением. Активность МА КГ можно оценить по скорости распространения одномерного фронта (СРФ) выделения энергии в МА материалах [1]. Отжиг МА КГ путём диффузионного массопереноса, возвращает систему в более равновесное состояние с саморазогревом КГ и диссипацией энергии в окружающую среду.

Результаты и их обсуждение

Накопление дополнительной внутренней энергии в ходе МА связывают с формированием значительного количества дислокаций, ионных и атомных вакансий, межузельных атомов и ионов, оборванных межатомных связей, сдвиговых структур, изменения углов химических связей, ротационных дефектов, и т.п. Эти «аккумуляторы» внутренней энергии имеют свою энергию активации и температуру начала процесса релаксации [2, 3].

Ранее выявили характерную динамику накопления энергии в системе Ni-Al и возможность релаксации части накопленной энергии без активации химического взаимодействия в системе [1]. При проведении ступенчатых отжигов МА КГ системы Ni-Al наблюдается саморазогрев КГ выше печи на (1 – 7) °С. При вторичном отжиге саморазогрев КГ отсутствует. Температуру саморазогрева (Тс) КГ определяет скорость их нагрева (Vн). При Vн 0,05 °С/с, Тс равна 40 °С без инициации реакции синтеза, при Vн 0,14 °С/с, Тс равна 1300 °С с инициацией реакции синтеза NiAl. Увеличение Vн увеличивает количества одновременно иницируемых аккумуляторов и, соот-

ветственно, мощность тепловыделения [4].

Для выявления наименьшего по температуре инициации аккумулятора внутренней энергии были проведены эксперименты по повторению циклов МА + отжиг. В интервале температур отжига (50 – 150) °С второй цикл МА приводил к инициации химической реакции Ni с Al внутри банки механоактиватора. В интервале (150 – 180) °С удалось провести три цикла, то есть существенно увеличить общее время МА КГ. С учётом данных [5] о выявлении в структуре МА КГ дымоподобного скопления наночастиц, мы полагаем, что это метастабильные наночастицы никеля в окружении алюминия сформированы за счёт бездиффузионного массопереноса. Отжиг при температуре (150 – 180) °С активирует диффузионный процесс растворения наночастиц никеля в алюминии с формированием твёрдого раствора и выделением тепла. После отжига, источник саморазогрева исчезает, и те же самые КГ могут быть снова подвергнуты МА с целью формирования более тонкой структуры чередующихся слоев без риска инициации химического взаимодействия в рабочем объёме активатора.

Ссылки на использованные источники

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по программе повышения конкурентоспособности НИТУ «МИСиС» среди ведущих мировых научно-образовательных центров (№КЗ-2014-068)

1. Абузин Ю.А., Скроботова Е.Ю., Овсянникова Н.Ю. Исследование процессов накопления дополнительной энергии в механоактивируемых порошках системы Ni – Al // Журнал Металлургия машиностроения. 2010. №6, с42–45
2. Болдырев В.В. Механохимия и механическая активация твёрдых веществ. // Журнал Успехи химии. 2006, №75.
3. Григорьева Т.Ф., Баринаева А.П., Ляхов Н.З. Механохимический синтез в металлических системах / Отв. Ред. Е.Г. Авакумов. СО РАН, Институт химии твёрдого тела и механохимии. - Новосибирск: Параллель, 2008. 311 с.
4. Абузин Ю.А., Горячева С.С., Никитин Н.Ю. Саморазогрев механоактивированных гранул системы Ni-Al-NiO при отжиге» Металлургия машиностроения. 2012 № 1, с. 41-46
5. N. F. Shkodicha, A. S. Rogacheva, S. G. Vadchenko, N. V. Sachkova, and R. Chassagnon Reactivity of Mechanoactivated Ni-Al Blends International journal of self-propagating high temperature synthesis Vol. 21 No. 2

DURABILITY OF DYNAMICALLY LOADED POLYMERIC STRUCTURES

^{1,2}I. Emri*, ¹B. Zupančič, ¹J. Gonzalez-Gutierrez

¹University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana, Slovenia

²Institute for Sustainable Innovative Technologies-iSIT, Ljubljana, Slovenia

Keywords: Polymers, solid state, mechanical properties, mechanical spectrum, strain accumulation

*Corresponding author: Igor Emri: igor.emri@fs.uni-lj.si

1

1. Introduction

Failure of periodically loaded polymeric parts (e.g. gears, bearings and driving belts) depends on the tribological and viscoelastic properties of a material. These two types of properties will determine the wear, appearance of cracks and ultimate failure of parts. Unlike metals, fatigue response of polymers strongly depends on their viscoelastic effects. One of these effects is localized strain accumulation leading to crack initiation at specific loading frequencies.

Within each loading cycle polymers undergo creep and recovery. At certain conditions the recovery process between loading cycles cannot go to a strain free state. Consequently, strain starts to accumulate, leading to material hardening and ultimately to product failure. Critical loading frequency depends on distribution of mechanical spectrum along the inherent time-scale, whereas the magnitude of accumulated strain depends on the strength of corresponding discrete spectrum lines. So, spectrum defines the intensity and magnitude of accumulated strain.

One way to change the mechanical spectrum of a polymeric material is to add nano-particles into the polymeric matrix. This example is used here to illustrate how by modifying the mechanical spectrum, one can reduce the process of strain accumulation and thus reduce fatigue failure in polymeric products.

2. Methodology

2.1. Theoretical background

The strain response (γ) of a viscoelastic material exposed to shear stress (τ) loading may be expressed as [1],

$$\gamma(t) = \tau(0)J(t) + \int_0^t J(t-s) \frac{\partial \tau(s)}{\partial s} ds \quad (1)$$

According to the analysis of the strain accumulation process, which has been done on the ex-

ample of the drive belts, evolution of the shear stress within one loading cycle can be modelled as a tooth-like function during periodic loading of the belt [2]. Introducing this loading conditions and description of creep compliance function ($J(t)$) in terms of discrete retardation spectrum (L) into the Eq. (1), yields the following expression for the cumulative accumulated strain (t_0 is the time period of one loading cycle),

$$\gamma(t, t \leq Nt_0) = \tau(0)J(t) + \Gamma(n, \omega, \kappa)_{(L_i, \lambda_i)} \quad (2)$$

where

$$\Gamma(n, \omega, \kappa)_{(L_i, \lambda_i)} = \tau_0 \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^K L_i \left[1 - \exp\left(-\frac{\pi}{\omega \lambda_i}\right) \right] \exp\left(-\frac{(\kappa + \pi)(2(N-n)+1) - \pi}{\omega \lambda_i}\right) \quad (3)$$

Eq. (3) describes the time-dependent evolution of the strain accumulation in the material as a function of the angular velocity (ω) of rotating pulleys regarding the belt drive, geometry parameter (κ) representing the ratio between the pulleys' central distance and the radius of the pulleys, and as a function of the number of cycles (N) to which the part has been exposed to; τ_0 represents the magnitude of the loading shear stress. Analysing strain accumulation in each consecutive cycle, we observe that at very small and very large operating angular velocities (ω), there will be no strain accumulation. It is therefore evident that accumulated strain must have an extreme at some critical angular velocity, which determines critical conditions at which the strain accumulation process is more intensive [2].

2.2. Experimental methods

To demonstrate the analysis of strain accumulation, the creep behaviour and discrete retardation spectra of nanocomposite materials were obtained. Nanocomposites were prepared by simple melt compounding of TiO₂ nanoribbons into a polyamide 6 (PA6) matrix. Creep behaviour

was experimentally determined by shear creep compliance measurements on PA6 material and its nanocomposites with 15 wt% of added TiO₂ nanoribbons. Corresponding retardation spectra of investigated materials were then calculated using the Windowing Algorithm [3].

3. Results and discussion

To demonstrate the establishment of criterion to determine critical angular velocity area, where the strain accumulation is the most intensive, the strain accumulation (I) model (Eq. (3)) was used to calculate spectra of nanocomposites to analyse the effect of the number of loading cycles (N) and loading angular velocity (ω) on the strain accumulation process (Figures 1). If we define certain upper limits of the accumulated strain, as shown with the cross-section plane (solid red contour) in Figure 1, and project the cross-section curve (dashed red line) onto plane, we obtain different levels of critical angular velocity (Figure 2).

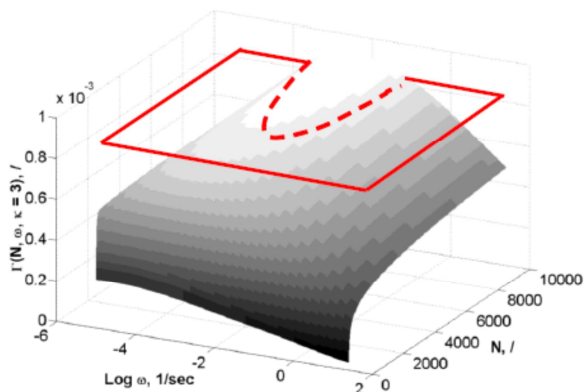


Figure 1: Accumulated strain of neat PA6

Setting a hypothetical limit of critical accumulated strain, one may observe that in the case of PA6, the selected limit will be achieved at angular velocities within “critical area” (red field in Figure 2a) after a certain number of loading cycles. For the nanocomposite with 15 wt% of added nanoparticles, the hypothetical critical limit of accumulated strain will not be achieved within the same range of operating angular velocities and number of loading cycles (Figures 2), which indicates better durability of PA6 nanocomposites in relation to neat PA6 matrix.

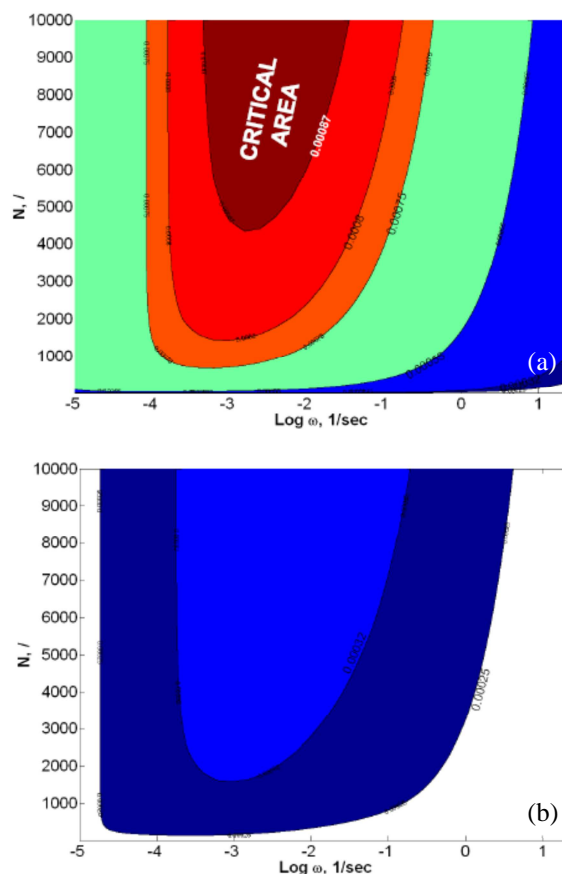


Figure 2: Frequency areas corresponding to different magnitudes of accumulated strain for (a) neat PA6 and (b) nanocomposite with 15wt% of TiO₂

4. Conclusions

The developed theoretical approach for modelling strain accumulation in dynamically loaded polymeric products was applied to nanocomposite materials. The strain accumulation process was analysed as function of the loading angular velocity and the number of loading cycles. Based on this methodology, it was observed that addition of nanoparticles into PA6 matrix decreases the magnitude of the accumulated strain, and consequently presents possibility to avoid critical angular velocity area, and extension of the material’s durability period.

References

- [1] N.W. Tschoegl, The Phenomenological Theory of Linear Viscoelastic Behavior, Springer, 1989.
- [2] I. Emri, J. Kramar, A. Hribar, A. Nikonov, U. Florjančič, Mechanics of Time-Dependent Materials 10 (2006) 245-262.
- [3] I. Emri, N.W. Tschoegl, Rheologica Acta 32 (1993) 311-321.

