

На правах рукописи

Чермошенцева Анна Сергеевна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ
ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ДЕФЕКТАМИ
ТИПА РАССЛОЕНИЯ**

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук



Москва – 2018

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Покровский Алексей Михайлович

Официальные оппоненты: **Митрофанов Олег Владимирович**, доктор технических наук, заместитель начальника научно-исследовательского отделения прочности - заместитель главного конструктора по прочности АО «Гражданские самолеты Сухого»

Тимонин Александр Михайлович, кандидат физико-математических наук, главный специалист Инженерного департамента в авиакосмической области ООО «Прогресстех»

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

Защита диссертации состоится 28 марта 2018 г. в 14.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.03 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью, просим высыпать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «_____» 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., доцент



Карпачев А.Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Принципиальное значение замены традиционных конструкционных материалов на многослойные композиты состоит в том, что вместо металлов с одинаковыми во всех направлениях свойствами появляется возможность использования новых материалов с различающимися свойствами в зависимости от ориентации наполнителя. Несмотря на высокие физико-механические показатели многослойных композитов, использование их в машиностроении, особенно в авиастроении, требует учета присущих им специфических особенностей, таких как вероятность присутствия скрытых дефектов, в виде нарушения сплошности материала по поверхностям раздела отдельных слоев. Наличие межслойных дефектов в элементах конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), связанных с несовершенством технологии их изготовления, а также сложными взаимодействиями компонентов, приводит к снижению прочности таких элементов. С развитием наноиндустрии появилась возможность повысить прочность слоистых композиционных материалов за счет введения в матрицу различных видов дисперсных наполнителей, таких как нанотрубки, наночастицы, нановолокна. Достоверно оценить несущую способность элементов конструкций, имеющих технологические дефекты, можно только расчетно-экспериментальным путем. Следовательно, разработка методов оценки прочности ПКМ, математических моделей деформирования и межслойного разрушения, развитие методов экспериментального исследования деформационных и прочностных свойств конструкционных композитов, оценка опасности технологических и эксплуатационных дефектов, возникающих в элементах конструкций, возможность их локального упрочнения можно считать чрезвычайно важными и актуальными задачами.

Цель работы: Повышение прочности тонкостенных элементов конструкций из слоистых композиционных материалов с межслойными дефектами на основе проведения экспериментальных исследований и математического моделирования с использованием разработанных уточненных расчетных методик.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести экспериментальное исследование по определению критических и разрушающих нагрузок при сжатии многослойных пластинчатых, кольцевых и полукольцевых образцов со сквозными межслойными дефектами из стеклопластика и углепластика.
2. Разработать методику введения нанодисперсных порошков с различной массовой концентрацией в полимерную матрицу с целью повышения прочностных свойств композита.
3. Создать методику аналитического определения критических и разрушающих сил сжатых слоистых пластин с дефектом типа расслоение с учетом углов укладки волокон по слоям композитов.

4. Разработать методику численного расчета критических и разрушающих нагрузок для плоских, кольцевых и полукольцевых тонкостенных слоистых элементов конструкций с расслоениями при сжатии.

5. Провести верификацию разработанных методик аналитического и численного расчета критических и разрушающих нагрузок для плоских, кольцевых и полукольцевых композитных элементах с отслоениями.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались: метод конечных элементов, метод расчета тонкостенных пластин с дефектами на устойчивость, методы механики разрушения, экспериментальные методы.

Научная новизна работы состоит в следующих положениях:

1. Проведен цикл испытаний на сжатие тонкостенных многослойных пластинчатых, кольцевых и полукольцевых образцов со сквозными межслойными дефектами и получены новые опытные данные по прочности таких элементов при сжатии.

2. Создана методика введения нанодисперсных порошков (диоксид кремния) с различной массовой концентрацией (от 0,1% мас. до 0,5% мас.) в полимерную матрицу композита для исследования их влияния на прочностные свойства ПКМ с дефектами.

3. Разработана аналитическая методика определения критической силы сжатой слоистой пластины с расслоением с учетом различия упругих свойств ортотропного материала на основном, дефектном и отслоившемся участке.

4. Создана основанная на решении задачи механики разрушения с использованием понятия J -интеграла аналитическая методика вычисления разрушающей силы для сжатой многослойной пластины с дефектом типа расслоение.

5. Разработана методика численного расчета критической и разрушающей нагрузок для сжатых пластинчатых, кольцевых и полукольцевых тонкостенных элементов композитных конструкций с расслоением с учетом последовательности укладки слоев и ориентации волокон.

Достоверность результатов и выводов в работе обеспечивается корректностью постановки задачи, строгостью и последовательностью математических выкладок, применением классических подходов и методов механики деформируемого твердого тела и механики разрушения, тщательным тестированием используемого программного обеспечения, а именно конечно-элементного комплекса ANSYS, применением современных измерительных приборов. Верификация аналитических и численных методов расчета показала допустимые расхождения с экспериментальными данными.

Практическая ценность работы заключается в возможности использования новых экспериментальных данных о рациональном процентном содержании нанодобавок, ориентации волокон, размерах допустимых технологических дефектов в многослойных композиционных материалах в научно-исследовательских институтах и конструкторских бюро при

проектировании авиационных конструкций из новых материалов с требуемым комплексом физико-механических свойств.

На защиту выносятся следующие положения диссертации:

1. Результаты комплексного экспериментального исследования прочности сжатых тонкостенных многослойных пластин, кольцевых и полукольцевых образцов со сквозными межслойными дефектами.
2. Экспериментально полученный вывод, что введение в полимерную матрицу композита диоксида кремния марки Таркосил Т-20 с удельной площадью поверхности $S=53\text{m}^2/\text{г}$ и массовой долей концентрации 0,3% повышает прочность слоистых элементов конструкций с межслойными дефектами на 20-25%.
3. Аналитические методики решения задачи устойчивости и процесса разрушения тонкостенной сжатой пластины из слоистых ПКМ с межслойными сквозными дефектами с учетом порядка укладки слоев и ориентации волокон.
4. Построенные в конечно-элементном комплексе ANSYS численные модели пластинчатых, кольцевых и полукольцевых элементов конструкций из ПКМ с дефектами для вычисления критических и разрушающих нагрузок.

Реализация работы. Материалы диссертационной работы использовались при выполнении следующих научно-исследовательских работ: ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России 2009-2013 гг.» в проекте «Исследование влияния степени наполнения смолы ЭД-22 гидрофобными и гидрофильными нанопорошками Таркосил SiO_2 на механические свойства композитов на ее основе» (2012-2013 гг., №8885, договор с ИТПМ СО РАН, г.Новосибирск); грант РФФИ «Устойчивость тонкостенных элементов конструкций из слоистых композиционных материалов с учетом межслойных дефектов» (2015 г., №15-38-50484); грант У.М.Н.И.К. «Разработка стенда нового поколения для проведения ресурсных испытаний на усталостную прочность изделий авиационной техники из композиционных материалов» (2016-2017 гг.); проект «Испытания элементов конструкций и узлов вертолета на усталостную прочность» на конкурсе «Вертолеты XXI века» (2016 г., Холдинг АО «Вертолеты России»); проект «Экспериментальное исследование механических свойств авиационных материалов с дефектами» на конкурсе научно-технических работ «Молодежь и будущее авиации и космонавтики» (2016 г., МАИ).

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на XI Международном форуме по стратегическим технологиям (г. Новосибирск, 2016 г.); XV Международной конференции «Авиация и космонавтика» (г. Москва, 2016 г.); XV, XVI, XVII, XVIII и XXI Международных конференциях «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2009, 2010, 2011, 2012, 2015 гг.); V и VI Международных конференциях «Проблемы механики современных машин» (г. Улан-Удэ, 2012, 2015 гг.); Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Материалы и технологии новых поколений в современном материаловедении» (г. Томск, 2015 г.); Всероссийской научно-

технической конференции «Механика и математическое моделирование в технике», посвященной 100-летию со дня рождения В. И. Феодосьева (г. Москва, 2016 г.); ежегодно с 2013 г. по 2017 г. на Научном семинаре кафедры РК-5 «Прикладная механика» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 работ, из них 11, входящих в Перечень ведущих периодических изданий, рекомендуемых ВАК РФ, 2 статьи в зарубежных научных изданиях, входящих в реферативные базы Scopus и Web of Science, общим объемом 2.7 п.л.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы и приложения, в котором приведены акты внедрения. Текст диссертации изложен на 168 страницах машинописного текста, включая 96 рисунков и 26 таблиц. Библиография работы содержит 161 наименование.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель научного исследования, задачи, научная новизна и практическая ценность работы, приведено краткое содержание работы по главам.

В первой главе проанализированы теоретические и экспериментальные работы отечественных и зарубежных авторов по теме диссертации: исследование межслойных дефектов (Рис. 1); процессов деформирования, механизмов разрушения и численного моделирования слоистых композиционных материалов с межслойными дефектами.

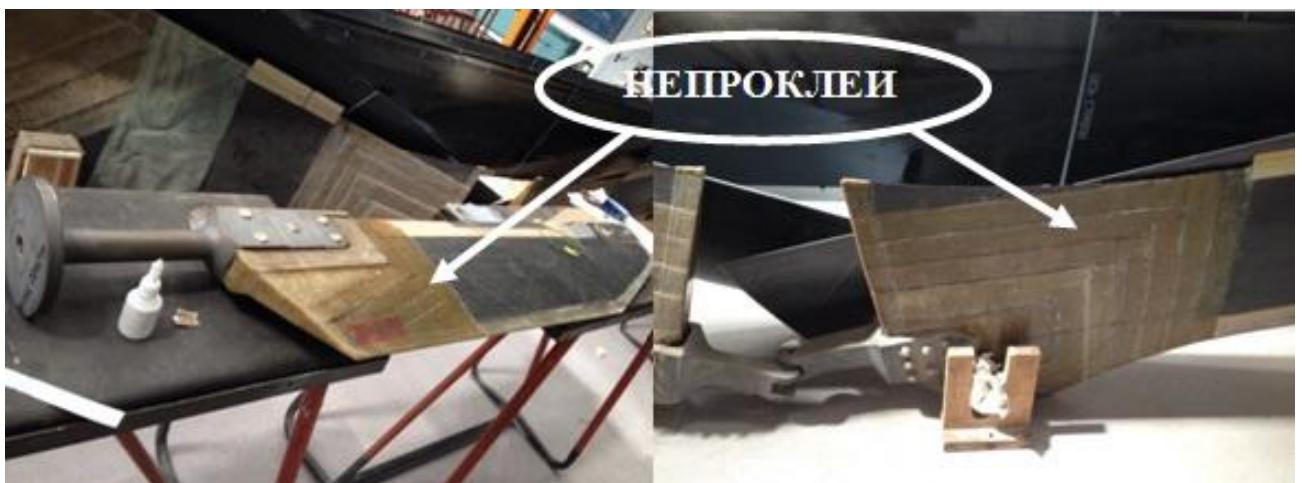


Рис. 1. Межслойные дефекты

Большой вклад в развитие механики ПКМ с учетом дефектов внесли известные ученые: Б.Д. Аннин, Н.А. Алфутов, С.А. Амбарцумян, В.В. Болотин, Л. Браутман, Г.А. Ванин, В.В. Васильев, А.С. Вольмир, Э.И. Григорюк, А.В. Кармишин, Р. Кристенсен, И.А. Куник, П.А. Зиновьев, Б.Е. Победря, В.Д. Протасов, Б.Г. Попов, Г.Г. Портнов, Ю.Н. Работнов, В.П. Тамуж, Ю.М. Тарнопольский и многие другие. Работа является продолжением и развитием

фундаментальных исследований, выполненных Н.А. Алфутовым, В.В. Болотиным, а также их последователями Б.Г. Поповым, Л.А. Бохеевой.

Проведен обзор работ по экспериментальным неразрушающим и разрушающим методам исследования композитов с дефектами. Отмечено, что неразрушающий контроль элементов конструкций с межслойными дефектами не позволяет сделать достоверные выводы о причине разрушения, и в лучшем случае позволяет выявить только одно из наиболее слабых мест в конструкции, а оценить несущую способность конструкций возможно только с помощью разрушающих методов.

Согласно проведенному анализу литературных источников показано, что малые добавки дисперсных порошков могут значительно улучшить механические свойства композитов, но при этом необходимо подобрать оптимальное количество концентрации нанодисперсных частиц.

Во второй главе приведены результаты экспериментального исследования многослойных образцов с дефектами из стекло- и углепластика при испытании на сжатие; результаты экспериментального исследования образцов из эпоксидной смолы с добавлением и без добавления нанодисперсных частиц, с различной удельной площадью поверхности, с разной массовой концентрацией; результаты экспериментального исследования многослойных образцов с дефектами из стеклопластика с различной массовой концентрацией нанопорошка в растворе; результаты испытания на сжатие контрольных образцов (КО) без нанодобавок с заложенными межслойными дефектами. Для экспериментального исследования деформационно-прочностных свойств образцов из ПКМ использовались следующие оборудование: гидравлическая машина ИР5057-50, испытательная установка Zwick Roell Allround Z-005, ультразвуковой диспергатор УЗГ 13-0,1/22, электромеханическая испытательная машина Instron 5982.

Для оценки межслойных дефектов проведены испытания образцов с дефектами типа расслоение. Для проведения экспериментальных исследований было изготовлено 45 пластин со сквозным дефектом типа отслоение с разными длинами дефектов и углами укладки слоев [0₅, -90₅], [45₅, -45₅]. Образцы были изготовлены из препрега (стекловолокна или углеволокна), промышленная марка стеклоткани – Т-25 (ВМ) ТУ 6-11-380-76, углепластика – ЛУ-П/0,2-А (Рис. 2). Технологический процесс изготовления образцов заключался в следующем: поверхность прессформы смазывалась антиадгезионным покрытием и нагревалась, далее на нее выкладывалось несколько слоёв раскроенного препрега; затем прессформа помещалась в гидравлический пресс и сжималась. Размеры образцов получались следующими: длина L=200 мм, ширина b=20 мм. При этом толщина образца зависела от количества слоев препрега. Модели дефектов, имитирующих отслоения, изготавливались в образцах следующим способом: между слоями закладывалась тонкая полоска из тефлона с выходом на кромку образца, в последствии она извлекалась. При проведении пробных испытаний было отмечено, что большинство образцов при сжатии разрушались на торцах. Данный факт объяснялся низкой жесткостью

торцов слоистых образцов, и как следствие выскользыванию образца из захвата испытательной машины. Причем при увеличении усилия зажима на торцах, образец начинал повреждаться в захватах. Такая проблема возникла, когда площадь поперечного сечения образца была одинаковой по всей длине. В связи с этим образцы были усилены в захватываемой части при помощи слоистых накладок.

В процессе экспериментальных исследований осуществлялась фотосъемка образцов до и после испытания. Процесс нагружения, деформации, потери устойчивости и разрушения фиксировался на видеокамеру (Рис. 3). При испытании на сжатие, задавалась постоянная скорость сближения захватов, при этом фиксировалась приложенная сила. Проведенные опыты показали, что механизм разрушения слоистых композитных образцов с межслойными дефектами следующий. При достижении сжимающей силы критического значения $P_{\text{кр}}$ происходит потеря устойчивости (выпучивание) межслойного дефекта. После этого жесткость образца уменьшается и дальнейшее сближение захватов происходит при уменьшающейся нагрузке. Расслоение дефекта и полное разрушение происходит при значении силы, равной $P_{\text{разр.}}$, которая зависит от размеров дефекта, углов армирования слоев и концентрации нанодобавок.



Рис. 2. Образцы №2,3,4 из углепластика, образцы №5,6,7 из стеклопластика

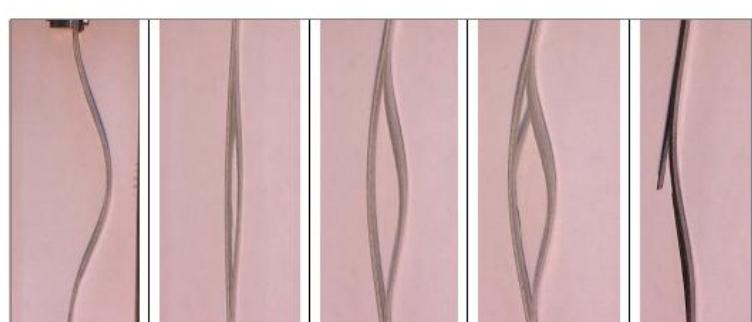


Рис. 3. Результаты испытаний образцов из стекло- и углепластика

Для повышения прочностных свойств ПКМ разработана методика введения нанодисперсных добавок в полимерную матрицу. Рассмотрен процесс получения наиболее распространенных дисперсных частиц диоксида кремния марки Таркосил Т-20 (средний размер частиц 20-25 нм, гидрофобный, полученный методом газофазного синтеза).

Для проведения экспериментальных исследований (Рис. 4) по испытаниям образцов из ПКМ с введением нанодисперсных добавок в связующее и исследование влияния их на прочностные свойства ПКМ с дефектами было изготовлено 60 образцов (Рис. 5) из эпоксидной смолы с нанодисперсными частицами диоксида кремния с различной массовой концентрацией: $C_{\text{нап}}=0,3\%$; $C_{\text{нап}}=0,6\%$; $C_{\text{нап}}=0,9\%$; $C_{\text{нап}}=1,2\%$; $C_{\text{нап}}=1,5\%$; $C_{\text{нап}}=1,8\%$. Удельная площадь поверхности частиц составляла $S=53 \text{ м}^2/\text{г}$. Для выбора наиболее эффективного нанопорошка было изготовлено 30 образцов из

эпоксидной смолы с нанодисперсными частицами с разной удельной площадью поверхности: $S=76 \text{ м}^2/\text{г}$; $S=96 \text{ м}^2/\text{г}$; $S=150 \text{ м}^2/\text{г}$. Для испытаний пластин из ПКМ с заложенным межслойным дефектом было изготовлено по 10 образцов с различной массовой концентрацией нанопорошка в растворе: $C = 0,1\%$ мас.; $C = 0,3\%$ мас.; $C = 0,5\%$ мас. Общее количество слоев в образце равнялось 10, в зоне отслоения 2 слоя. Для сравнительного анализа было изготовлено 10 контрольных образцов без нанодобавок с заложенным межслойным дефектом. Испытания проводились в лабораторных условиях на электромеханической испытательной машине. Для испытания образцов на сжатие испытательная машина была модернизирована путем замены деталей захвата на спроектированные и изготовленные специальные зажимы.

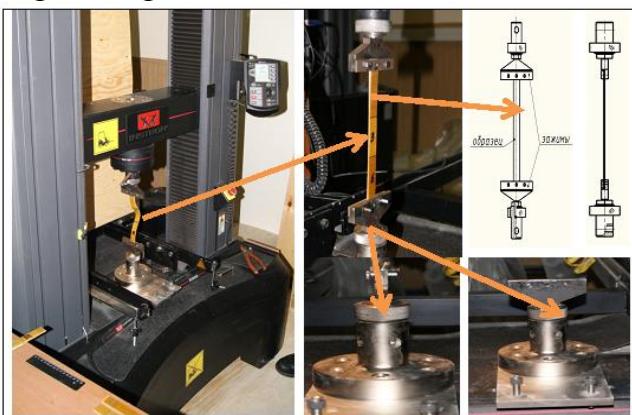


Рис. 4. Процесс испытания образцов из ПКМ с нанодобавками

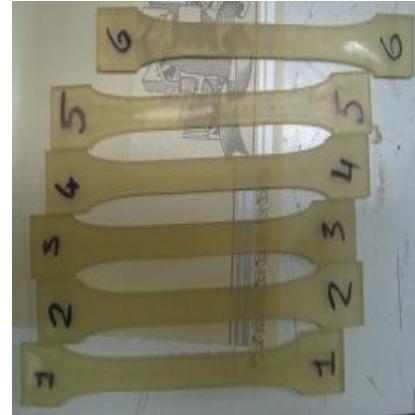


Рис. 5. Образцы из наноматериалов

В качестве иллюстрации на Рис. 6 представлены машинные диаграммы образцов из слоистых ПКМ при сжатии для 4-х образцов с различной концентрацией нанонадбавок и без них.

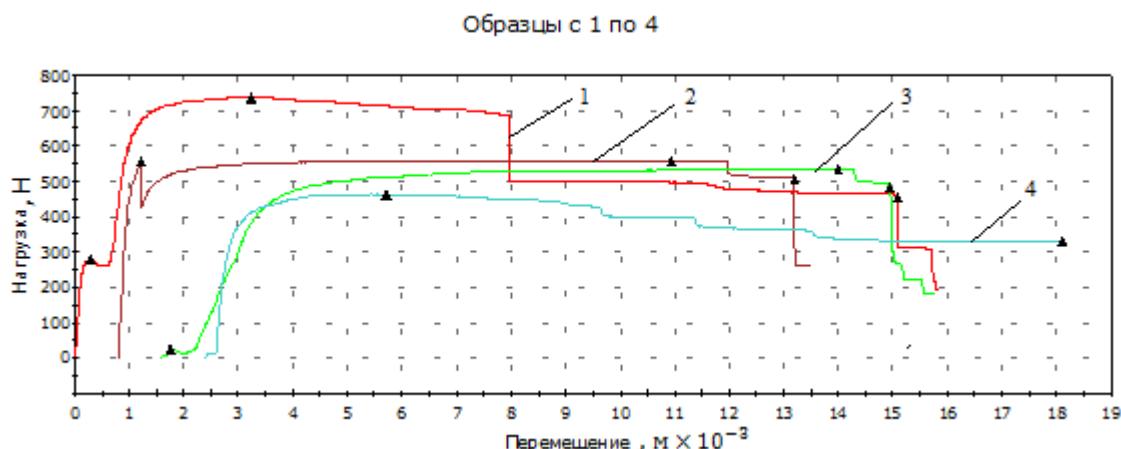


Рис. 6. Машинные диаграммы при сжатии образцов из ПКМ с добавкой Таркосил-20 % в масse: 1 – 0,3; 2 – 0,5; 3 – 0,1; 4 – КО без нанодобавок

Результаты испытаний показывают, что введение нанопорошка Таркосил-20 в ПКМ приводит к повышению прочностных характеристик смеси на его основе. Причем максимальное значение критической нагрузки P_{kp} получается

при концентрации нанопорошка Таркосил-20 равной 0,3% в масс. Установлено, что за счет введения в матрицу дисперсных наполнителей повышается прочность композитных элементов конструкций с межслойными дефектами на 20-25%. Показано, что излишнее увеличение концентрации приводит к затруднению равномерного распределения и диспергации частиц наполнителя, что негативно влияет на однородность материала, и как следствие к снижению прочностных характеристик.

В третьей главе решены задачи потери устойчивости и процесса разрушения (аналитическое решение и численный расчет) на примере тонкостенной сжатой пластины из слоистых композиционных материалов с межслойными сквозными дефектами (Рис. 7). Проведено сравнение полученных результатов аналитического решения и численного расчета с экспериментальными данными, полученными в главе 2.

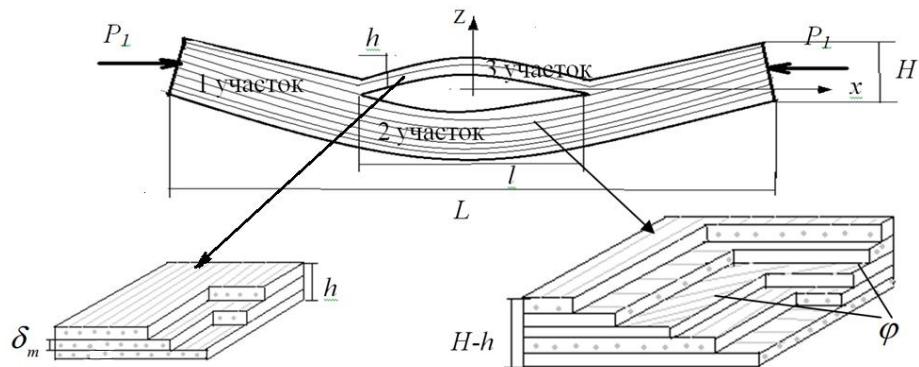


Рис. 7. Пластина толщиной H , единичной ширины, длиной L , имеющая единственное тонкое сквозное отслоение толщиной h

Дифференциальные уравнения прогиба W_i различных участков пластины: основной (1), дефектной (2) и зоны отслоения (3) для рассматриваемой пластины при цилиндрическом изгибе имеют вид

$$D^{(i)} \frac{d^4 W_i}{dx_i^4} + P_i \frac{d^2 W_i}{dx_i^2} = 0, \quad (1)$$

где $i=1,2,3$; $P_i, D^{(i)}$ – нормальная погонная сила и цилиндрическая жесткость при изгибе i -го участка.

Решения уравнений (1) на бездефектном участке W_1 , дефектной части W_2 и зоне отслоения W_3 , удовлетворяющие граничным условиям задачи, имеют вид

$$W_1 = \frac{\theta}{k_1 \sin(k_1 b)} (1 - \cos[k_1(L/2 - x)]),$$

$$W_2 = \frac{\theta}{k_1 \sin(k_1 \cdot b)} \left\{ \frac{k_1 \sin(k_1 \cdot b)}{k_2 \sin(k_2 \cdot l/2)} [\cos(k_2 \cdot x) - \cos(k_2 \cdot l/2)] + 1 - \cos(k_1 \cdot b) \right\},$$

$$W_3 = \frac{\theta}{k_1 \sin(k_1 \cdot b)} \left\{ \frac{k_1 \sin(k_1 \cdot b)}{k_3 \sin(k_3 \cdot l/2)} [\cos(k_3 \cdot x) - \cos(k_3 \cdot l/2)] + 1 - \cos(k_1 \cdot b) \right\},$$

где $k_1^2 = P_1 / D^{(1)}$, $D^{(1)} = \frac{E_x^{(1)} H^3}{12(1 - \mu_{xy}^{(1)} \mu_{yx}^{(1)})}$, $k_2^2 = P_2 / D^{(2)}$, $D^{(2)} = \frac{E_x^{(2)} (H-h)^3}{12(1 - \mu_{xy}^{(2)} \mu_{yx}^{(2)})}$, $k_3^2 = P_3 / D^{(3)}$,

$$D^{(3)} = \frac{E_x^{(3)} h^3}{12(1 - \mu_{xy}^{(3)} \mu_{yx}^{(3)})}, \quad b = L/2 - l/2, \quad \theta - \text{угол поворота пластины в начале отслоения.}$$

Упругие характеристики ортотропного материала для каждого i -го участка $E_x^{(i)}, \mu_{xy}^{(i)}, \mu_{yx}^{(i)}$ рассчитывались по значениям модулей упругости, сдвига, коэффициентов Пуассона $E_1, E_2, G_{12}, \mu_{12}, \mu_{21}$, угла ориентации волокон одностороннего слоя φ и количества слоев на участке.

Для определения критической нагрузки P_{kp} потери устойчивости сжатой пластины с дефектом типа отслоение получена система уравнений, которая включала в себя уравнения равновесия для осевых сил

$$D^{(1)} k_1^2 = D^{(2)} k_2^2 + D^{(3)} k_3^2 \quad (2)$$

уравнение равновесия для моментов

$$\begin{aligned} D^{(1)} \theta \cdot k_1 \operatorname{ctg}(k_1 \cdot b) + D^{(2)} \theta \cdot k_2 \operatorname{ctg}(k_2 \cdot l/2) + D^{(3)} \theta \cdot k_3 \operatorname{ctg}(k_3 \cdot l/2) - \\ - \frac{1}{2} D^{(3)} k_3^2 (H - h) + \frac{1}{2} D^{(2)} k_2^2 h = 0 \end{aligned}, \quad (3)$$

а также условие совместности сближения торцов для отслоения (3 участок) и дефектной части (2 участок)

$$(1 - \mu_{xy}^{(3)} \mu_{yx}^{(3)}) \frac{D^{(3)} k_3^2 \cdot l}{E_x^{(3)} \cdot h} - (1 - \mu_{xy}^{(2)} \mu_{yx}^{(2)}) \frac{D^{(2)} k_2^2 \cdot l}{E_x^{(2)} \cdot (H - h)} = -\theta H. \quad (4)$$

После освобождения в уравнениях (3) и (4) от θ получается выражение

$$\begin{aligned} (1 - \mu_{xy}^{(3)} \mu_{yx}^{(3)}) \frac{D^{(3)} k_3^2 \cdot l}{E_x^{(3)} \cdot h \cdot H} - (1 - \mu_{xy}^{(2)} \mu_{yx}^{(2)}) \frac{D^{(2)} k_2^2 \cdot l}{E_x^{(2)} \cdot (H - h) \cdot H} + \\ + \frac{D^{(3)} k_3^2 (H - h) - D^{(2)} k_2^2 h}{2(D^{(1)} k_1 \operatorname{ctg}(k_1 \cdot b) + D^{(2)} k_2 \operatorname{ctg}(k_2 \cdot l/2) + D^{(3)} k_3 \operatorname{ctg}(k_3 \cdot l/2))} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

На основании условия, что до потери устойчивости деформация при сжатии второго и третьего равна, k_2 и k_3 можно выразить через k_1 по формулам

$$\begin{aligned} k_2 &= k_1 \sqrt{\frac{D^{(1)}}{D^{(2)}} k_1^2 / \left(1 - \frac{(1 - \mu_{xy}^{(2)} \mu_{yx}^{(2)}) \cdot E_x^{(3)} \cdot h}{(1 - \mu_{xy}^{(3)} \mu_{yx}^{(3)}) E_x^{(2)} \cdot (H - h)} \right)}, \\ k_3 &= k_1 \sqrt{\frac{D^{(1)} (1 - \mu_{xy}^{(2)} \mu_{yx}^{(2)}) \cdot E_x^{(3)} \cdot h}{D^{(3)} (1 - \mu_{xy}^{(3)} \mu_{yx}^{(3)}) E_x^{(2)} \cdot (H - h)} / \left(1 - \frac{(1 - \mu_{xy}^{(2)} \mu_{yx}^{(2)}) \cdot E_x^{(3)} \cdot h}{(1 - \mu_{xy}^{(3)} \mu_{yx}^{(3)}) E_x^{(2)} \cdot (H - h)} \right)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Подстановка k_2 и k_3 в выражение (5) приводит к трансцендентному уравнению относительно k_1 . Решая в среде MathCad полученное уравнение можно определить погонную критическую силу при потери устойчивости слоистой пластины с дефектом

$$P_{kp} = D^{(1)} k_{1min}^2,$$

где k_{1min} – наименьший корень при решении уравнения.

Для определения сжимающей силы $P_{разр.}$, при которой происходит отслоение и полное разрушение слоистой пластины из ПКМ с дефектом типа

расслоение, использовано решение задачи механики разрушения с использованием понятия J -интеграла.

Для пластины выражение для J -интеграла выглядит следующим образом:

$$J = \int_{\Gamma} (W dz - T_i \frac{du_i}{dx} ds)$$

где W – упругий потенциал (удельная потенциальная энергия деформации); T_i, u_i – компоненты вектора поверхностной силы и полного перемещения на направленном против часовой стрелки контуре интегрирования Γ ; dS – малый элемент контура интегрирования.

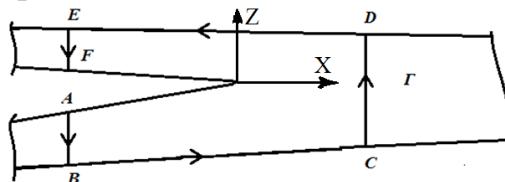


Рис. 8. Контур интегрирования Γ

В качестве контура интегрирования Γ рассмотрен направленный против часовой стрелки контур $ABCDEF$ Рис. 8. Очевидно, что на границе пластины (участки BC, DE) и на ненагруженном участке CD J -интеграл равен нулю. Тогда выражение J -интеграла для выбранного контура интегрирования будет складываться из интегралов на участке AB и EF .

$$J = \frac{1}{2} \left(\int_{-(H-h)/2}^{(H-h)/2} \sigma_x^{(2)} \varepsilon_x^{(2)} dz + \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x^{(3)} \varepsilon_x^{(3)} dz \right) = \frac{1 - \mu_{xy}^{(2)} \mu_{yx}^{(2)}}{2E_x^{(2)}} \int_{-(H-h)/2}^{(H-h)/2} (\sigma_x^{(2)})^2 dz + \frac{1 - \mu_{xy}^{(3)} \mu_{yx}^{(3)}}{2E_x^{(3)}} \int_{-h/2}^{h/2} (\sigma_x^{(3)})^2 dz . \quad (7)$$

Для упрощения вычисления J -интеграла продольные силы и изгибающие моменты на трех участках представлены на основании принципа суперпозиции в виде суммы двух составляющих (Рис. 9), причем таким образом, чтобы для первого состояния бездефектный участок был ненагружен, а для второго состояния кривизна на участках была одинаковой. В этом случае раскрытия трещиноподобного дефекта (отслоения) для второго состояния происходит не будет и для анализа трещиностойкости достаточно будет рассмотреть только первую систему нагрузок.

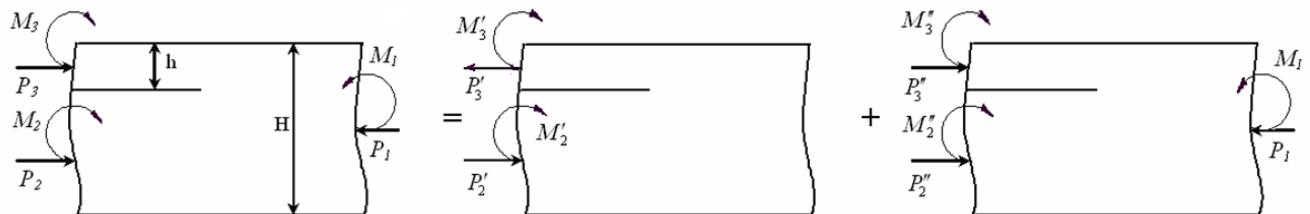


Рис. 9. Разложение нагрузки

После введения обозначения $P^* = P'_3$, $M^* = M'_3$ и учитывая, что $M'_2 = P^*h/2 - M^*$ выражение J -интеграла (7) после подстановки напряжений через силы и моменты приобретает вид

$$J = \frac{1 - \mu_{xy}^{(2)} \mu_{yx}^{(2)}}{2E_x^{(2)}} \int_{-(H-h)/2}^{(H-h)/2} \left(\frac{P^*}{H-h} + \frac{12M^*z}{(H-h)^3} \right)^2 dz + \frac{1 - \mu_{xy}^{(3)} \mu_{yx}^{(3)}}{2E_x^{(3)}} \int_{-h/2}^{h/2} \left(\frac{P^*}{h} + \frac{12M'_2 z}{h^3} \right)^2 dz . \quad (8)$$

На основании критерия разрушения для J -интеграла быстрый неустойчивый рост трещины, предшествующий полному долому, происходит, когда значение J -интеграла достигает критического значения $J_{lc} = G_{lc}$. Тогда после взятия интегралов в выражении (8) условие разрушения получит вид

$$\frac{1}{2H^3} \left\{ \frac{1 - \mu_{xy}^{(2)} \mu_{yx}^{(2)}}{E_x^{(2)}} \left(\frac{(HP^*)^2}{1 - \bar{h}} + \frac{12(P^*H/2 - M^*)^2}{(1 - \bar{h})^3} \right) + \frac{1 - \mu_{xy}^{(3)} \mu_{yx}^{(3)}}{E_x^{(3)}} \left(\frac{(HP^*)^2}{\bar{h}} + \frac{12(M^*)^2}{\bar{h}^3} \right) \right\} = G_{lc}, \quad (9)$$

где $\bar{h} = h/H$ – относительная толщина отслоения.

Формулы для P^* и M^* получаются из уравнения равновесия и уравнений совместности деформаций и имеют следующий вид

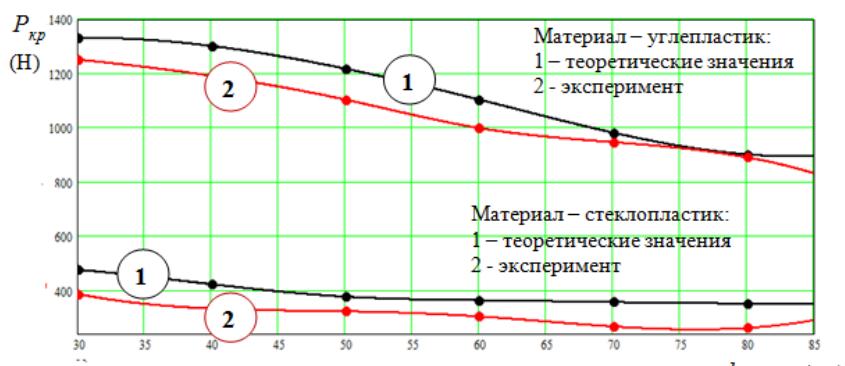
$$P^* = \frac{2D^{(1)} \cdot k_1 \cos(k_1 \cdot b)}{H} \left(1 - (1 - \bar{h})^3 \frac{E_x^{(2)} (1 - \mu_{xy}^{(1)} \mu_{yx}^{(1)})}{E_x^{(1)} (1 - \mu_{xy}^{(2)} \mu_{yx}^{(2)})} - (\bar{h})^3 \frac{E_x^{(3)} (1 - \mu_{xy}^{(1)} \mu_{yx}^{(1)})}{E_x^{(1)} (1 - \mu_{xy}^{(3)} \mu_{yx}^{(3)})} \right) \times \frac{D^{(3)} k_3^2 (H - h) - D^{(2)} k_2^2 h}{2(D^{(1)} k_1 \operatorname{ctg}(k_1 \cdot b) + D^{(2)} k_2 \operatorname{ctg}(k_2 \cdot l/2) + D^{(3)} k_3 \operatorname{ctg}(k_3 \cdot l/2))},$$

$$M^* = - \left(D^{(3)} \cdot k_3 \cos(k_3 \cdot l/2) - (\bar{h})^3 \frac{E_x^{(3)} (1 - \mu_{xy}^{(1)} \mu_{yx}^{(1)})}{E_x^{(1)} (1 - \mu_{xy}^{(3)} \mu_{yx}^{(3)})} 2D^{(1)} \cdot k_1 \cos(k_1 \cdot b) \right) \times \frac{D^{(3)} k_3^2 (H - h) - D^{(2)} k_2^2 h}{2(D^{(1)} k_1 \operatorname{ctg}(k_1 \cdot b) + D^{(2)} k_2 \operatorname{ctg}(k_2 \cdot l/2) + D^{(3)} k_3 \operatorname{ctg}(k_3 \cdot l/2))}. \quad (10)$$

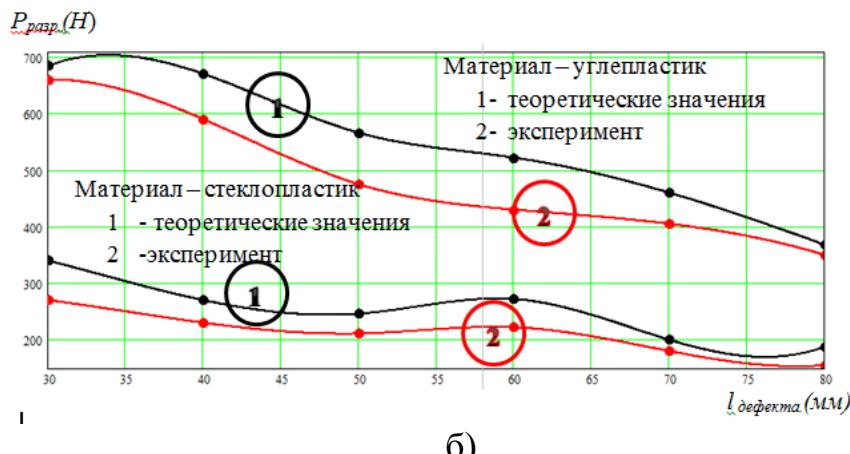
Подстановка выражений для P^* и M^* по формулам (10) с учетом соотношений (6) в условие разрушения (9) приводит к трансцендентному уравнению относительно k_1 . Наименьший корень данного уравнения $k_{1\min}$ дает значение погонной разрушающей силы

$$P_{разр.} = D^{(1)} k_{1\min}^2.$$

На Рис. 10 представлены результаты аналитического расчета и экспериментального исследования критической нагрузки и нагрузки при разрушении пластины из ПКМ с дефектами типа отслоения из углепластика и стеклопластика.



a)



б)

Рис. 10. Зависимость критической нагрузки (а) и нагрузки при разрушении (б) от размеров дефекта для углепластика и стеклопластика: 1 – теоретическая кривая (аналитический расчет), 2 – результаты экспериментов.

Таким образом, решены задачи потери устойчивости и процесса разрушения (аналитический и численный расчет) на примере тонкостенной сжатой пластины из слоистых композиционных материалов с межслойными сквозными дефектами. Получены аналитические выражения для величин, характеризующих критическую нагрузку и описывающих закритическое поведение после потери устойчивости многослойной пластины с межслойным дефектом. Верификация полученных данных показала, что расхождение между аналитическими и численными значениями составляет 2-3%, а между аналитическими и экспериментальными данными 7-8%.

В четвертой главе представлены результаты испытания кольцевых и полукольцевых образцов из слоистых ПКМ (стеклопластика), имеющих межслойные дефекты. Образцы были изготовлены в заводских условиях из композиционного материала – стеклопластика. В формообразующую оснастку (прессформу), в форме стального кольца разного внутреннего диаметра, смазанного антиадгезионным покрытием, выкладывался предварительно раскроенный препрег в десять слоёв. Затем в сердцевину кольца вкладывался силиконовый вкладыш для создания необходимого внутреннего давления. Дефекты создавались путем прокладки фторопластовой пленки между определенными слоями. С торцов прессформа закрывалась металлическими пластинами, после чего сборку стягивали струбциной и помещали в печь для полимеризации. Для проведения экспериментов были спроектированы и изготовлены два варианта специальных зажимов и нагружающих устройств (Рис. 11), обеспечивающих всестороннее сжимающее давление колец с межслойными дефектами. Таким образом, было испытано 8 кольцевых образцов с диаметром 90 мм, 20 кольцевых образцов с диаметром 50 мм, 16 полуколец с диаметром 90 мм (Рис. 12).

В процессе исследования изучено влияния схемы армирования пакета из ПКМ, размеров дефекта, технологии изготовления ткани из стеклопластика и размеров образцов на величину критической нагрузки при потере устойчивости дефекта и нагрузки при разрушении. На Рис. 13 представлены

экспериментальные и численные значения для образца диаметром 90 мм из материала Т-10 с укладкой волокон $[0_5, 90_5]$ и $[45_5, -45_5]$.



Рис. 11. Специальные зажимы и нагружающие устройства для проведения эксперимента



Рис. 12. Образцы в виде кольца и полукольца

Кроме экспериментального исследования кольцевых и полукольцевых образцов из ПКМ был проведен широкий спектр примеров численного расчета для установления взаимосвязи между глубиной залегания дефекта, геометрическими размерами, структурой композита и напряженно-деформированным состоянием элемента конструкции. Сравнение результатов показало, что опытные данные сопоставимы с численными значениями, степень сходимости лежит в интервале 3-5%.

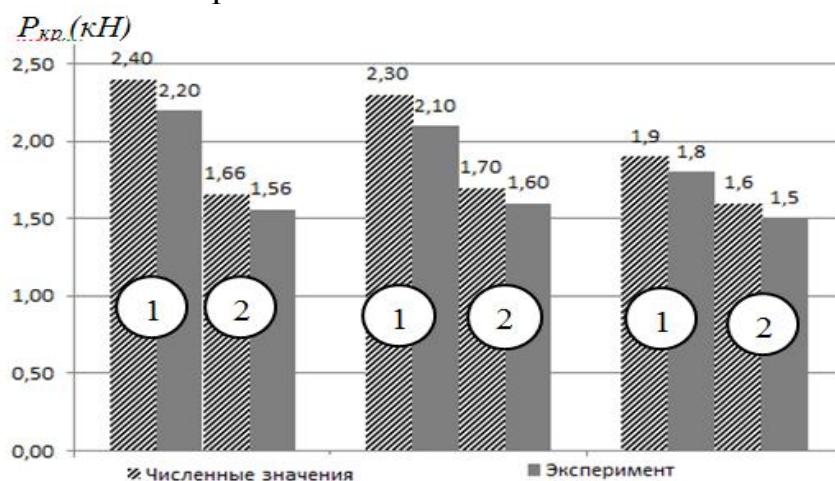


Рис. 13. Диаграмма сравнения экспериментальных значений критической нагрузки и нагрузки при разрушении с численными результатами: 1 - стеклопластик с укладкой волокон $[0_5, 90_5]$, 2 - стеклопластик с укладкой волокон $[45_5, -45_5]$

Таким образом, кольцевые образцы диаметром 90 мм с дефектами под углом $\varphi=120^0$ с укладкой волокон $[0_5, 90_5]$ выдерживают нагрузку в среднем на 20-25% больше, чем образцы с укладкой волокон $[45_5, -45_5]$. Кольцевые

образцы диаметром 50 мм с дефектами под углом $\varphi=120^0$ с укладкой волокон [0₅, 90₅] выдерживают нагрузку в среднем на 18-21% больше, чем образцы с укладкой волокон [45₅, -45₅]. Полукольцевые образцы диаметром 90 мм с дефектом под углом $\varphi=120^0$ с укладкой волокон [0₅, 90₅] выдерживают нагрузку в среднем на 18-24% больше, чем образцы с укладкой волокон [45₅, -45₅]. Технология изготовления материалов типа Т-10 и ПС-ИФ не оказывает существенного влияния на потерю устойчивости дефекта, но ткани ПС-ИФ прочнее на 2-3% чем ткани Т-10. Диаметры образцов колец и полуколец практически не влияют на значение критической нагрузки потери устойчивости дефекта. Результаты, полученные в ходе эксперимента сопоставимы с численными расчетами, погрешность составляет 3-5%.

Основные результаты и выводы

В диссертационной работе решена задача, связанная с повышением прочности тонкостенных элементов конструкций из слоистых композиционных материалов с межслойными дефектами и получены следующие результаты:

1. Выполнен цикл экспериментальных исследований многослойных пластин, кольцевых и полукольцевых образцов со сквозными межслойными дефектами из слоистых композиционных материалов (стеклопластик и углепластик) при сжатии. Выявлена зависимость критических и разрушающих нагрузок сжатых пластин, колец и полуколец со сквозными отслоениями от размеров трещиноподобных дефектов и углов укладки слоев композита.

2. Предложена методика введения нанодисперсных порошков с различной массовой концентрацией нанопорошка Таркосил в полимерную матрицу композита. Установлено, что эффективным является наполнитель диоксида кремния марки Таркосил Т-20 с удельной площадью поверхности $S=53\text{м}^2/\text{г}$ и массовой долей концентрации 0,3%. Экспериментально установлено, что за счет введения этой добавки повышается прочность сжатых тонкостенных слоистых элементов конструкций с межслойными дефектами на 20-25%.

3. Предложено аналитическое решение задачи устойчивости тонкостенной сжатой пластины из слоистых ПКМ с межслойными сквозными дефектами с учетом углов укладки слоев композита.

4. Разработана методика аналитического решения задачи механики разрушения с использованием понятия *J*-интеграла применительно к сжатой композитной пластине с расслоением с учетом различия упругих характеристик ортотропного материала на участках.

5. Созданы методики численного вычисления в конечно-элементной среде ANSYS критической и разрушающей сил сжатых пластин, колец и полуколец с межслойными дефектами. Произведены расчеты для разных композитных материалов с различным армированием.

6. Проведена верификация разработанных аналитических и численных методик определения критических и разрушающих нагрузок для сжатых тонкостенных слоистых пластин, колец и полуколец с дефектами типа

расслоение. Сравнительный анализ показал допустимые расхождения между экспериментальными результатами и значениями аналитических и численных расчетов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Бохоева Л.А., Чермошенцева А.С. Уточненный метод для решения задачи устойчивости пластин с дефектами с учетом деформаций сдвига // Системы. Методы. Технологии. 2010. №4(8). С. 14-18. (0.3125 п.л. / 0.1562 п.л.)
2. Бохоева Л.А., Пнев А.Г., Чермошенцева А.С. Испытание на прочность кольцевых образцов из слоистых композиционных материалов с межслойными дефектами // Вестник БГУ. 2011. №9. С. 230-236. (0.4375 п.л. / 0.1458 п.л.)
3. Разработка стендов для ресурсных испытаний изделий авиационной и другой техники / Чермошенцева А.С. [и др.] // Вестник ВСГУТУ. 2013. №6(45). С. 31-36. (0.375 п.л. / 0.075 п.л.)
4. Моделирование и технология изготовления конструкций авиационной техники из композиционных материалов / Чермошенцева А.С. [и др.] // Вестник ВСГУТУ. 2013. №2(41). С. 12-18. (0.4375 п.л. / 0.1093 п.л.)
5. Экспериментальное определение характеристик сопротивления усталости изделий авиационной техники / Чермошенцева А.С. [и др.] // Вестник ВСГУТУ. 2013. №5(44). С. 46-53. (0.5 п.л. / 0.083 п.л.)
6. Покровский А.М., Чермошенцева А.С. Оценка живучести растянутой пластины с поперечной полуэллиптической трещиной // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. №3(648). С. 42-46. (0.3125 п.л. / 0.1562 п.л.)
7. Бохоева Л.А., Рогов В.Е., Чермошенцева А.С. Устойчивость круглых дефектов типа отслоений в элементах конструкций с учетом поперечного сдвига // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. №4(44). С. 19-22. (0.25 п.л. / 0.083 п.л.)
8. Бохоева Л.А., Рогов В.Е., Чермошенцева А.С. Определение критических нагрузок с помощью энергетического критерия устойчивости для локального круглого дефекта // Системы. Методы. Технологии. 2014. №4(24). С. 32-37. (0.375 п.л. / 0.125 п.л.)
9. Определение ресурсных характеристик изделий авиационной техники на основе стендовых испытаний с использованием компьютерных технологий на примере лопасти винта вертолета / Чермошенцева А.С. [и др.] // Системы. Методы. Технологии. 2015. №4(28). С. 36-42. (0.4375 п.л. / 0.0875 п.л.)
10. Испытания элементов конструкций и узлов вертолета на усталостную прочность / Чермошенцева А.С. [и др.] // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24, №1. С. 7-16. (0.625 п.л. / 0.104 п.л.)
11. Покровский А.М., Чермошенцева А.С. Экспериментальное исследование влияния нанодобавок на свойства композиционных материалов с межслойными дефектами // Вестник Московского авиационного института. 2017. Т. 24, №3. С. 212-221. (0.625 п.л. / 0.3125 п.л.)

Статьи в зарубежных научных изданиях, входящих в реферативные базы Scopus и Web of Science

12. Stability and process of destruction of compressed plate of layered composite materials with defects / Chermoshentseva A.S. [и др.] // Innovative technologies in engineering. 2016. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/142/1/012077/pdf> (дата обращения: 18.12.2017) (0.375 п.л. / 0.0937 п.л.)

13. Chermoshentseva A.S., Pokrovskiy A.M., Bokhoeva L.A. The behavior of delaminations in composite materials – experimental results // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/116/1/012005/pdf> (дата обращения: 18.12.2017) (0.3125 п.л. / 0.104 п.л.)

Работы, опубликованные в других изданиях

14. Чермошенцева А.С., Булдакова Е.С. Моделирование элементов конструкций из слоистых композиционных материалов при наличии дефектов в системе ANSYS // XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»: Тез. докл. Томск: Изд-во НИ ТПУ, 2009. Т. 1. С. 346-348. (0.1875 п.л. / 0.0937 п.л.)

15. Чермошенцева А.С., Булдакова Е.С. Экспериментальное исследование слоистых композиционных материалов с технологическими дефектами типа отслоений // XVI Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»: Тез. докл. Томск: Изд-во НИ ТПУ, 2010. Т. 1. С. 367-368. (0.125 п.л. / 0.0625 п.л.)

16. Чермошенцева А.С., Булдакова Е.С. Моделирование каркаса остекления кабины вертолета МИ-8 из композиционных материалов // XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»: Тез. докл. Томск: Изд-во НИ ТПУ, 2011. Т. 1. С. 381-383. (0.1875 п.л. / 0.0937 п.л.)

17. Динамические испытания изделий авиационной техники / Чермошенцева А.С. [и др.] // V Международная конференция «Проблемы механики современных машин»: Тез. докл. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2012. С. 65-69. (0.3125 п.л. / 0.0625 п.л.)

18. Бохоева Л.А., Чермошенцева А.С., Ергонов В.П. Исследование дефектов типа «отслоение» в элементах конструкций из композиционных материалов // V Международная конференция «Проблемы механики современных машин»: Тез. докл. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2012. С. 18-23. (0.375 п.л. / 0.125 п.л.)

19. Чермошенцева А.С., Булдакова Е.С. Испытание образцов труб из слоистых композиционных материалов с дефектами // XVIII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»: Тез. докл. Томск: Изд-во НИ ТПУ, 2012. Т. 1. С. 331-332. (0.125 п.л. / 0.0625 п.л.)

20. Введение нанопорошков и механические свойства материалов на основе эпоксидных смол / Чермошенцева А.С. [и др.] // Наноиндустрия. 2013. №3. С. 24-31. (0.5 п.л. / 0.0714 п.л.)
21. Покровский А.М., Чермошенцева А.С. Экспериментальное исследование механических свойств материалов на основе эпоксидных смол // VI Международная конференция «Проблемы механики современных машин»: Тез. докл. Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2015. С. 311-315. (0.3125 п.л. / 0.1562 п.л.)
22. Покровский А.М., Чермошенцева А.С. Экспериментальное исследование механических свойств инновационных композиционных материалов, имеющих в составе нанопорошки // XXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»: Тез. докл. Томск: Изд-во НИ ТПУ, 2015. Т. 1. С. 455-457. (0.1875 п.л. / 0.0937 п.л.)
23. Chermoshentseva A.S., Bokhoeva L.A., Rogov V.E. Experimental research of models of thin-walled-compressed rings with defects type of delamination of layered composite materials // The 11th International Forum on Strategic Technology IFOST-2016, Novosibirsk. 2016. Part 1. P. 112-114. (0.1875 п.л. / 0.0625 п.л.)
24. Покровский А.М., Бокоева Л.А., Чермошенцева А.С. Оценка устойчивости и процесс разрушения тонкостенной сжатой пластины из слоистых композиционных материалов с межслойными сквозными дефектами // Всероссийская научно-техническая конференция «Механика и математическое моделирование в технике», посвященная 100-летию со дня рождения В.И. Феодосьева: Тез. докл. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. С. 335-339. (0.3125 п.л. / 0.104 п.л.)
25. Покровский А.М., Чермошенцева А.С. Экспериментальное исследование авиационных материалов с дефектами // 15-ая Международная конференция «Авиация и космонавтика»: Тез. докл. М.: Изд-во МАИ, 2016. С. 240-242. (0.1875 п.л. / 0.0937 п.л.)