

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 «Прогрестех»

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 высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте [www.bmstu.ru](http://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  $S=53\text{ м}^2/\text{г}$  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  $\text{SiO}_2$  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.

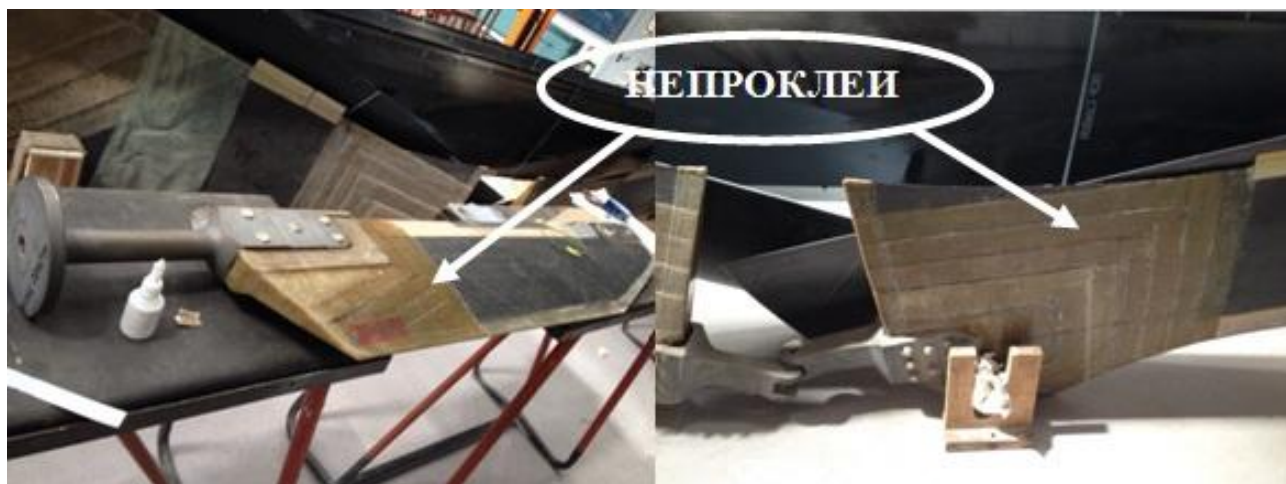


Рис. 1. Межслойные дефекты

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. Григолюк, А.В. Кармишин, Р. Кристенсен, И.А. Кунин, 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. Бохоевой.

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  $[0_5, -90_5]$ ,  $[45_5, -45_5]$ . 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 выскальзыванию 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  $P_{кр.}$  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  $P_{разр.}$ , 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

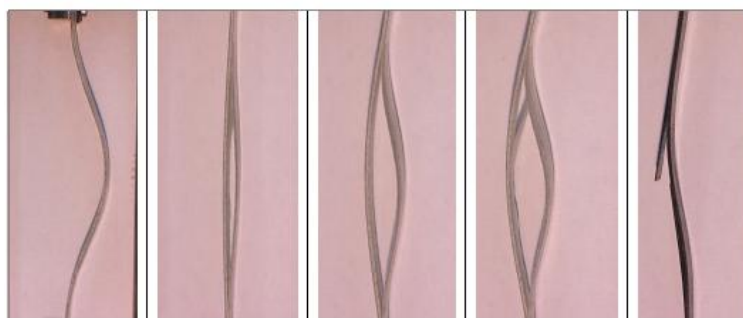


Рис. 3. Результаты испытаний образцов из стекло- и углепластика

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:  $C_{нап}=0,3\%$ ;  $C_{нап}=0,6\%$ ;  $C_{нап}=0,9\%$ ;  $C_{нап}=1,2\%$ ;  $C_{нап}=1,5\%$ ;  $C_{нап}=1,8\%$ . 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:  $C = 0,1\% \text{ мас.}$ ;  $C = 0,3\% \text{ мас.}$ ;  $C = 0,5\% \text{ мас.}$ . 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.

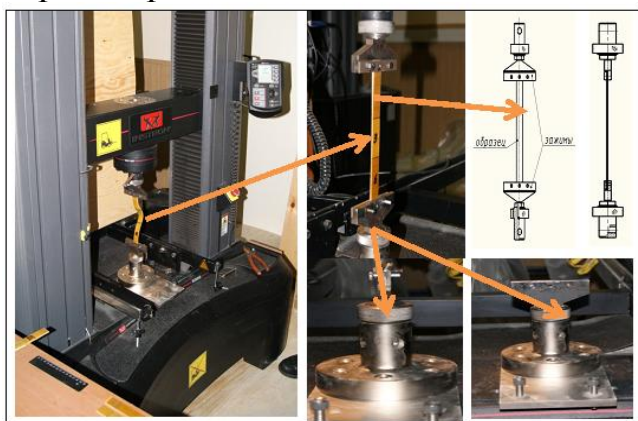


Рис. 4. Процесс испытания образцов из ПКМ с нанодобавками



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 нанодобавок и без них.

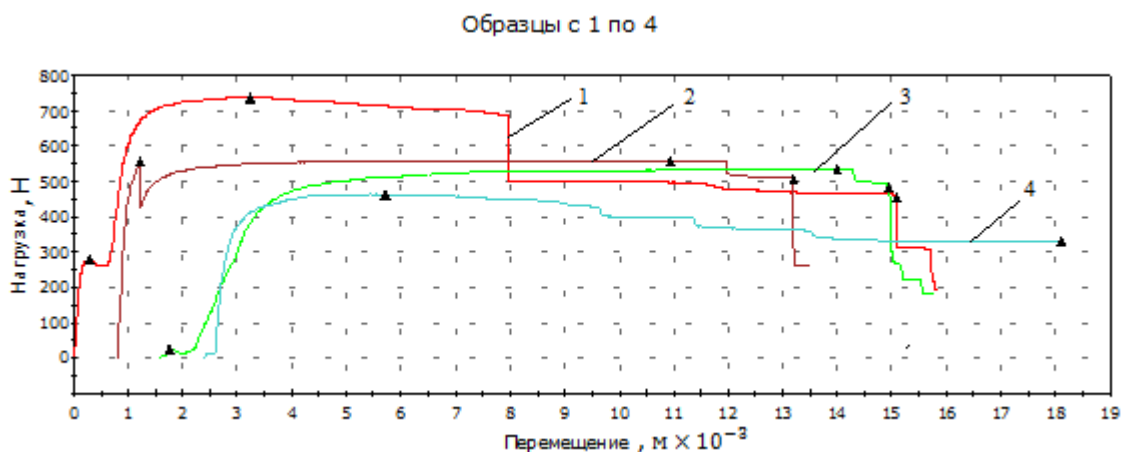


Рис. 6. Машинные диаграммы при сжатии образцов из ПКМ с добавкой Таркосил-20 % в массу: 1 – 0,3; 2 – 0,5; 3 – 0,1; 4 – КО без нанодобавок

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

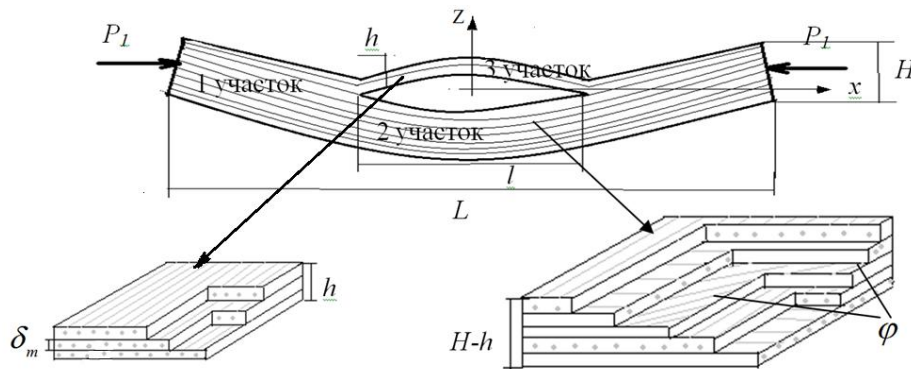


Рис. 7. Пластина толщиной  $H$ , единичной ширины, длиной  $L$ , имеющая единственное тонкое сквозное отслоение толщиной  $h$

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

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

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

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

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

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

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 однонаправленного слоя  $\varphi$  и количества слоев на участке.

Для определения критической нагрузки  $P_{кр.}$  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

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

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  $\theta$  получается выражение

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

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

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

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 потере устойчивости слоистой пластины с дефектом

$$P_{кр.} = D^{(1)} k_{1\min}^2,$$

где  $k_{1\min}$  – 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  $\Gamma$ ;  $ds$  – малый элемент контура интегрирования.

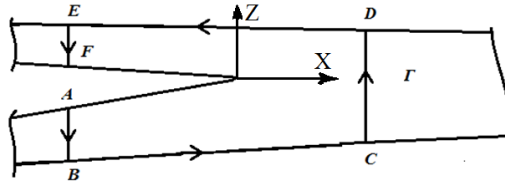


Рис. 8. Контур интегрирования  $\Gamma$

В качестве контура интегрирования  $\Gamma$  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 происходить не будет и для анализа трещиностойкости достаточно будет рассмотреть только первую систему нагрузок.

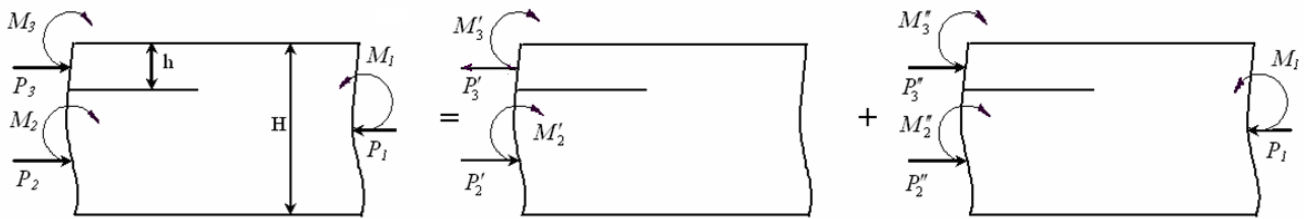


Рис. 9. Разложение нагрузки

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

$$J = \frac{1 - \mu_{xy}^{(2)} \mu_{yx}^{(2)}}{2E_x^{(2)}} \int_{-(H-h)/2}^{(H-h)/2} \left( \frac{P^*}{H-h} + \frac{12M^*z}{(H-h)^3} \right)^2 dz + \frac{1 - \mu_{xy}^{(3)} \mu_{yx}^{(3)}}{2E_x^{(3)}} \int_{-h/2}^{h/2} \left( \frac{P^*}{h} + \frac{12M'_2z}{h^3} \right)^2 dz. \quad (8)$$

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

$$P^* = \frac{2D^{(1)} \cdot k_1 \cos(k_1 \cdot b)}{H} \left( 1 - (1 - \bar{h})^3 \frac{E_x^{(2)} (1 - \mu_{xy}^{(1)} \mu_{yx}^{(1)})}{E_x^{(1)} (1 - \mu_{xy}^{(2)} \mu_{yx}^{(2)})} - (\bar{h})^3 \frac{E_x^{(3)} (1 - \mu_{xy}^{(1)} \mu_{yx}^{(1)})}{E_x^{(1)} (1 - \mu_{xy}^{(3)} \mu_{yx}^{(3)})} \right) \times$$

$$\times \frac{D^{(3)} k_3^2 (H - h) - D^{(2)} k_2^2 h}{2(D^{(1)} k_1 \operatorname{ctg}(k_1 \cdot b) + D^{(2)} k_2 \operatorname{ctg}(k_2 \cdot l/2) + D^{(3)} k_3 \operatorname{ctg}(k_3 \cdot l/2))},$$

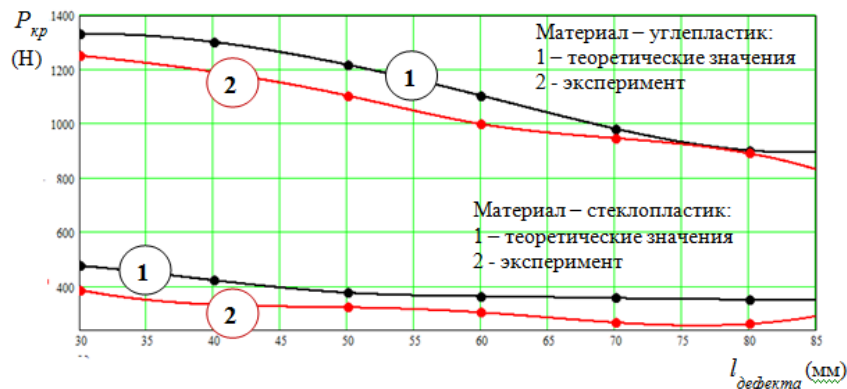
$$M^* = - \left( D^{(3)} \cdot k_3 \cos(k_3 \cdot l/2) - (\bar{h})^3 \frac{E_x^{(3)} (1 - \mu_{xy}^{(1)} \mu_{yx}^{(1)})}{E_x^{(1)} (1 - \mu_{xy}^{(3)} \mu_{yx}^{(3)})} 2D^{(1)} \cdot k_1 \cos(k_1 \cdot b) \right) \times$$

$$\times \frac{D^{(3)} k_3^2 (H - h) - D^{(2)} k_2^2 h}{2(D^{(1)} k_1 \operatorname{ctg}(k_1 \cdot b) + D^{(2)} k_2 \operatorname{ctg}(k_2 \cdot l/2) + D^{(3)} k_3 \operatorname{ctg}(k_3 \cdot l/2))}. \quad (10)$$

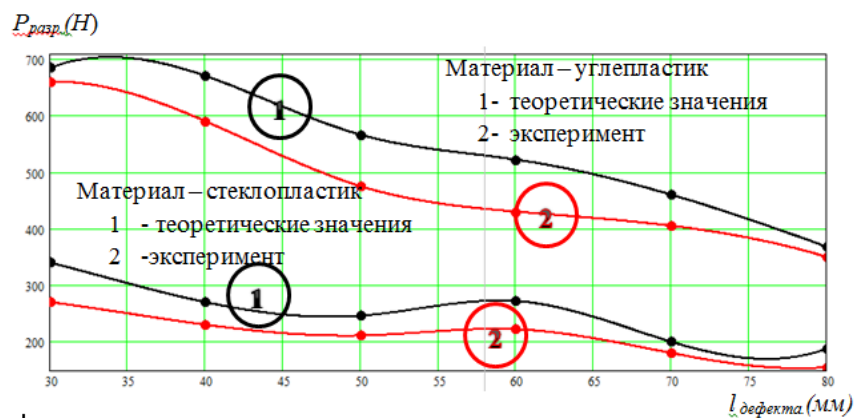
Подстановка выражений для  $P^*$  и  $M^*$  по формулам (10) с учетом соотношений (6) в условие разрушения (9) приводит к трансцендентному уравнению относительно  $k_1$ . Наименьший корень данного уравнения  $k_{1min}$  дает значение погонной разрушающей силы

$$P_{разр.} = D^{(1)} k_{1min}^2.$$

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.



а)



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 (стеклопластик), 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%.

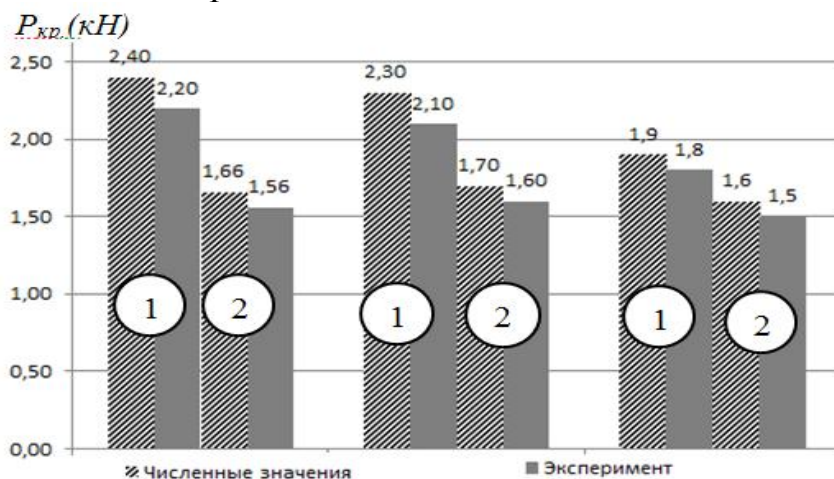


Рис. 13. Диаграмма сравнения экспериментальных значений критической нагрузки и нагрузки при разрушении с численными результатами: 1 - стеклопластик с укладкой волокон  $[0_5, 90_5]$ , 2 - стеклопластик с укладкой волокон  $[45_5, -45_5]$

Таким образом, кольцевые образцы диаметром 90 мм с дефектами под углом  $\varphi=120^\circ$  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  $[0_5, 90_5]$  выдерживают нагрузку в среднем на 18-21% больше, чем образцы с укладкой волокон  $[45_5, -45_5]$ . Полукольцевые образцы диаметром 90 мм с дефектом под углом  $\varphi=120^0$  с укладкой волокон  $[0_5, 90_5]$  выдерживают нагрузку в среднем на 18-24% больше, чем образцы с укладкой волокон  $[45_5, -45_5]$ . 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., Бохоева 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.)