

На правах рукописи



Коваленко Наталья Андреевна

**ЧИСЛЕННО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
МНОГОУРОВНЕВОГО РАЗРУШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
С КОНЦЕНТРАТОРАМИ НАПРЯЖЕНИЙ**

Специальность: 05.07.03 – прочность и тепловые режимы летательных аппаратов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», в федеральном государственном унитарном предприятии «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Олегин Игорь Павлович

Официальные оппоненты: Каледин Валерий Олегович,
доктор технических наук, профессор,
Новокузнецкий институт (филиал)
федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Кемеровский
государственный университет», декан
факультета информационных технологий

Фирсов Вячеслав Анатольевич,
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Казанский национальный
исследовательский технический
университет им. А. Н. Туполева-КАИ»,
профессор кафедры прочности конструкций

Ведущая организация: Филиал Публичного акционерного общества
«Компания «Сухой» «ОКБ Сухого»,
г. Москва

Защита диссертации состоится «09» февраля 2017 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.13 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Новосибирского государственного технического университета www.nstu.ru

Автореферат разослан «__» декабря 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тюрин Андрей Геннадиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Активное использование композиционных материалов (КМ) в авиации побуждает к поиску расчетных подходов, способных без дорогостоящих затрат на эксперимент прогнозировать поведение композита в составе конструкции, проводить оценку прочности наиболее опасных зон и давать представление о характере разрушения композита. Детальное исследование многоуровневого разрушения в слоях композита дает глубинное понимание поведения элемента конструкции из КМ, что позволяет избежать возможных ошибок при проектировании деталей из подобных элементов. Для композитной конструкции исследование многоуровневого разрушения особенно актуально, поскольку создание такой конструкции сопровождается большим числом испытаний по сравнению с металлической конструкцией в связи с тем, что материал создается вместе с конструкцией путем варьирования положения слоев с различной ориентацией волокон в укладке и использования тех или иных технологий изготовления. Получить приемлемые сроки и снизить затраты на испытания удастся привлечением расчетных подходов. В связи с этим важно иметь расчетные подходы на каждом этапе создания композитной конструкции, начиная с определения механико-прочностных свойств материала слоев и заканчивая расчетом несущей способности конструкции из КМ.

Среди известных подходов к расчету прочности элементов конструкций, выполненных из слоистых КМ, отдельное место занимает подход, основанный на модели прогрессирующего разрушения (МПР). Особенность этого подхода состоит в способности моделировать зарождение повреждения в слоях многослойного материала и его развитие до разрушения элемента конструкции, что позволяет проводить исследование многоуровневого разрушения. Однако, по известным публикациям, подход применялся для анализа разрушения отдельных видов концентраторов напряжений при частных видах нагружения. В связи с этим представляется актуальным создание универсальной программы, реализующей предложенный подход, которая позволила бы с достаточной степенью точности определять разрушающую нагрузку и прогнозировать возможные виды разрушения для образцов и элементов конструкций с концентраторами любой формы или системами концентраторов с гладкими контурами.

Степень разработанности темы исследования

Вклад в развитие механики КМ, теории упругости анизотропных тел, теории многослойных пластин внесли С.Г. Лехницкий, А.Л. Рабинович, В.В. Болотин, В.В. Васильев, Г.А. Ванин, В.А. Ломакин, Ю.В. Немировский, Л.П. Хорошун, Л.А. Фильштинский, В.П. Тамуж, Г.А. Тетерс, Э.И. Григолюк, Ю.М. Тарнапольский, *S.W. Tsai* и другие. Вопросы определения механико-прочностных свойств волокнистых КМ освещаются в трудах следующих исследователей: А.К. Малмейстер, А.М. Скудра, В.Л. Бидерман, А.В. Розе, В.М. Андриенко, Г.П. Сухобокова, И.И. Гольденблат, В.А. Копнов, Г.Н. Савин,

Е.К. Ашкенази, *W.T. Chen, S. Cheng, B.W. Shaffer, R. Hill, Z. Hashin* и других; вопросы прочности образцов и элементов конструкций из КМ освещали: А.Н. Гузь, С.В. Сукнев, *C.A. Soutis, S. Tang, R.J. Nuismer, J.M. Whitney, J.D. Labor, P.P. Camanho, F.L. Matthews, K.I. Tserpes, T. Ireman, F.K. Chang* и других.

Цель работы

Провести исследование многоуровневого разрушения элементов конструкций из слоистых КМ, содержащих широкий класс конструктивных концентраторов напряжений, присутствующих в реальных элементах авиационных конструкций, путем разработки и реализации численного алгоритма для исследования методом конечных элементов механизмов разрушения, возникающих в элементах конструкции при их нагружении, и сопоставлении полученных результатов с экспериментальными данными.

Задачи исследования:

1. Определить упругие свойства однонаправленного слоя, основываясь на информации об упругих свойствах компонент и объемном содержании армирующего компонента. Создать универсальную программу, основанную на численном решении задачи теории упругости методом конечных элементов, для определения эффективных модулей среды, армированной непрерывными волокнами круглого или эллиптического сечения, для различных комбинаций упругих свойств составляющих фаз, в диапазоне изменения содержания волокна от 1 до 76%, для квадратной и гексагональной схем армирования.

2. Выработать рекомендации по применимости приближенных формул для оценки упругих эффективных модулей однонаправленных КМ, основываясь на численном решении задачи теории упругости.

3. Программно осуществить и автоматизировать алгоритм реализации модели прогрессирующего разрушения для исследования возникновения и развития разрушений в элементах конструкций из слоистых КМ с концентраторами напряжений при нагружении.

4. Верифицировать подход, основанный на МПР, путем сравнения с экспериментальными данными для образцов с различными концентраторами;

5. Исследовать развитие повреждений в слоях многослойного пакета при нагружении образца/элемента конструкции из слоистых КМ с концентраторами вплоть до потери несущей способности. Определить вид разрушения и разрушающие нагрузки для образцов и элементов конструкции, выполненных из слоистых КМ, содержащих концентраторы напряжений.

6. Выработать рекомендации по проектированию металлокомпозитных болтовых соединений, основываясь на полученных результатах.

Научная новизна:

1. Рекомендации по практическому применению известных приближенных формул расчета эффективных модулей однонаправленных КМ.

2. Реализованный блок программ-алгоритмов для расчета прочности образцов из слоистых КМ, содержащих широкий класс концентраторов

напряжений, и определения вида разрушения в образцах металлокомпозитных болтовых соединений из слоистых КМ.

3. Способность автоматизированного численного алгоритма на основе МПР прогнозировать вид разрушения в зависимости от типа концентратора, схемы армирования и типа нагружения элемента конструкции из слоистых КМ. Для образцов многорядных металлокомпозитных болтовых соединений при растяжении и при нагружении сдвигом и образцов металлокомпозитных болтовых соединений при нагружении в зонах пересечения силовых потоков прогнозируемые разрушения соответствуют наблюдаемым в эксперименте. Для таких соединений подобные исследования ранее не встречаются.

4. Расчетные характеристики несущей способности образцов из слоистых КМ, охватывающие широкий класс конструктивных концентраторов, таких как: ненагруженные зенкованные отверстия и такие же отверстия с крепежным болтом; ряд отверстий; многорядные металлокомпозитные болтовые соединения при одноосном растяжении и при сдвиговом нагружении; металлокомпозитные болтовые соединения при нагружении в зонах пересечения силовых потоков. Исследования по используемому подходу для перечисленных образцов ранее не были представлены.

5. Рекомендации по проектированию металлокомпозитных болтовых соединений.

Теоретическая и практическая значимость работы

На этапе проектирования и проведения поверочных расчетов прочности деталей и элементов конструкций, выполненных из слоистых КМ, металлокомпозитных и прочих соединений, в силу специфики структуры КМ и разброса экспериментальных данных, определяющих механические свойства КМ, возникает необходимость проведения широкомасштабного эксперимента по определению механико-прочностных свойств и несущей способности соединения или элемента конструкции. Реализованный на базе метода конечных элементов подход к прогнозированию прочности элементов конструкций из слоистых КМ с конструктивными концентраторами напряжений позволяет избегать дорогостоящих экспериментов и существенно сократить время проектировочных и поверочных расчетов. Показана эффективность модели прогрессирующего разрушения, подтвержденная расчетными и экспериментальными исследованиями, применительно к анализу прочности и характеру разрушения слоистых КМ с концентраторами напряжений широкого класса. Выявлены и описаны особенности их разрушения в зоне контактных напряжений.

Личный вклад автора заключается в разработке и программной реализации универсального алгоритма расчета эффективных модулей однонаправленных КМ по известным упругим свойствам составляющих компонент и объемному содержанию армирующего компонента; в проведении расчетов по определению эффективных модулей волокнистых КМ; в разработке и реализации алгоритма подхода, основанного на модели прогрессирующего разрушения, для расчета несущей способности элементов

конструкций из слоистых КМ и определения типа разрушения этих элементов; в проведении расчетов по определению прочности образцов с различными концентраторами напряжений; в сопоставлении результатов расчета с результатами эксперимента; в подготовке и проведении испытаний образцов (частично).

Методология и методы исследования

В качестве основного метода исследований использовался метод конечных элементов, реализованный в программной среде ANSYS. При решении поставленных задач использовались методы теории многослойных пластин и теории упругости.

Положения, выносимые на защиту:

1. Рекомендации по применимости приближенных формул для расчета эффективных модулей однонаправленного КМ.

2. Алгоритмы и реализующие их программы, ориентированные на практическое использование при оценке несущей способности образцов/элементов конструкции из слоистых КМ, содержащих концентраторы напряжений, и позволяющие прогнозировать вид разрушения в этих объектах.

3. Расчетные характеристики несущей способности образцов, выполненных из слоистых КМ с конструктивными концентраторами напряжений.

4. Рекомендации по проектированию металлокомпозитных болтовых соединений.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность исследований диссертационной работы подтверждается экспериментальными исследованиями, проведенными в ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина» и в ФГУП «ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского», и результатами численных экспериментов по обеспечению сходимости численных решений.

Основные результаты диссертационной работы докладывались на Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», посвященной 50-летию полета Ю.А. Гагарина в космос (г. Новосибирск, 2011 г.); XV Международной научной конференции «Решетневские чтения» (г. Красноярск, 2011 г.); Всероссийской олимпиаде студентов «Авиация и авиационная техника» (г. Москва, 2010 г.); XII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона» (г. Новосибирск, 2013 г.); III Всероссийской конференции «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций» (г. Новосибирск, 2014 г.); I Международной научной конференции «Электротехника. Энергетика. Машиностроение», секция Машиностроение (г. Новосибирск, 2014 г.); школе-семинаре СибНИА «Проблемы прочности авиационных конструкций и материалов» (г. Новосибирск, 2013, 2015, 2016 гг.); XXIV Всероссийской конференции «Численные методы решения задач теории упругости и пластичности» (г. Омск, 2015 г.); 14 Российско-китайской научной конференции «*Fundamental Problems*

of Aircraft Aerodynamics, Flight Dynamics, Strength and Flight Safety” (г. Шеньян, 2015 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 печатных работ. Из них шесть статей, входящих в перечень российских рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК РФ; 10 — в сборниках научных трудов Всероссийских и международных научных конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы (из 114 наименований) и восьми приложений. Диссертация содержит 192 страницы основного текста, 84 рисунка, 78 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложено обоснование актуальности выбранной темы диссертационной работы; определены цели и задачи исследования; обозначена практическая значимость результатов работы, их достоверность, научная новизна и применимость; сформулированы основные положения, выносимые на защиту диссертационной работы.

Первый раздел диссертационной работы посвящен обзору существующих подходов к оценке прочности элементов конструкций из слоистых КМ с концентраторами и без, обоснован выбор рассматриваемого в диссертации подхода.

Второй раздел диссертации посвящен определению эффективных модулей однонаправленно армированной среды путем решения задачи теории упругости методом конечных элементов (МКЭ) в постановке, свободной от допущений, которые используются в известных формулах. Цель исследования состоит в определении упругих свойств однонаправленного слоя и определении области применимости известных в инженерной расчетной практике приближенных формул для оценки модулей однонаправленного слоя, основываясь на сопоставлении с результатами решения задачи теории упругости и результатами эксперимента. Необходимость подобного исследования обусловлена тем, что паспортные данные монослоев, образующих слоистый КМ, могут быть неизвестны, а известны упругие свойства и объемное содержание составляющих компонент.

Усредненные эффективные модули можно определить на основании понятия представительного элемента (ПЭ) среды, который обладает свойствами однонаправленного КМ в целом и выбирается из физических и геометрических соображений. Задача определения эффективных модулей сводится к установлению связи между усредненными по объему ПЭ компонентами тензоров напряжений и деформаций при заданных граничных условиях на его поверхности. В диссертации методом конечных элементов для определения эффективных модулей решены три задачи:

1. одноосного растяжения относительно трех осей ортотропии (для определения модулей упругости и коэффициентов Пуассона);
2. чистого сдвига в плоскости XU (для определения модуля сдвига G_{xy});

3. чистого сдвига в плоскости XZ (для определения модуля сдвига G_{xz}).

На рисунке 1 приведены ПЭ для соответствующих задач (задача одноосного растяжения — рисунки 1 а и 1 б, задачи чистого сдвига относительно плоскостей XU и XZ , соответственно, на рисунках 1 в и 1 г). В зависимости от характера взаимного расположения волокон однонаправленные КМ можно рассматривать как однородные материалы: ортотропные (прямоугольная схема армирования — рисунок 1 а) или трансверсально-изотропные (гексагональная схема армирования — рисунок 1 б).

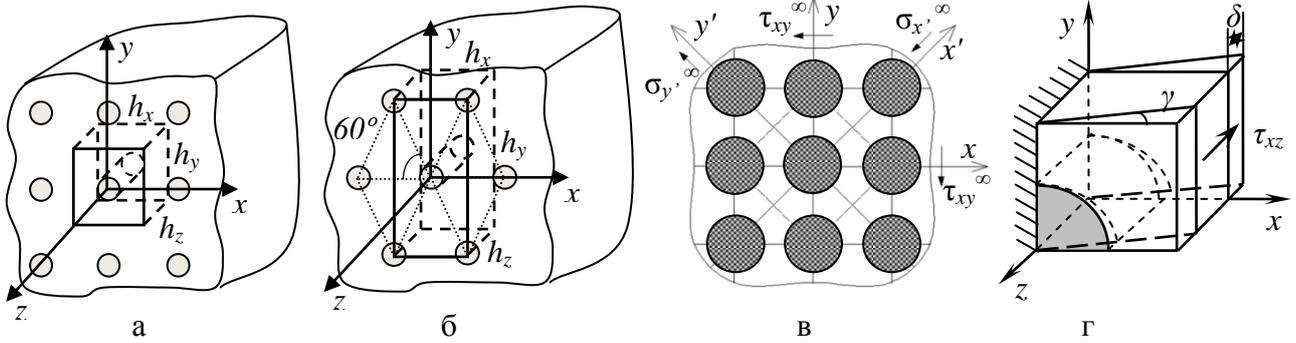


Рисунок 1 — ПЭ для задачи одноосного растяжения: а — ортотропная среда; б — трансверсально-изотропная среда. ПЭ среды для задачи чистого сдвига: в — в плоскости XU ; г — в плоскости XZ

Рассматриваемый подход применим для включений, обладающих геометрической и упругой симметрией относительно плоскостей симметрии решетки. Для определения модулей упругости и коэффициентов Пуассона решена задача теории упругости с кинематическими граничными условиями, исходя из периодичности структуры материала, совпадающей с периодичностью напряженного состояния при одноосном растяжении. На гранях ПЭ (рисунок 1 а) задаются три комбинации линейно независимых перемещений (где Δ — произвольные малые перемещения):

$$\begin{aligned} u_x^{(1)} \Big|_{x=\pm h_x/2} &= \Delta, & u_y^{(1)} \Big|_{y=\pm h_y/2} &= 0, & u_z^{(1)} \Big|_{z=\pm h_z/2} &= 0, \\ u_x^{(2)} \Big|_{x=\pm h_x/2} &= 0, & u_y^{(2)} \Big|_{y=\pm h_y/2} &= \Delta, & u_z^{(2)} \Big|_{z=\pm h_z/2} &= 0, & \Delta = const \\ u_x^{(3)} \Big|_{x=\pm h_x/2} &= 0, & u_y^{(3)} \Big|_{y=\pm h_y/2} &= 0, & u_z^{(3)} \Big|_{z=\pm h_z/2} &= \Delta, \end{aligned} \quad (1)$$

Используя МКЭ, определяются усредненные напряжения $\sigma_x^{(i)}$, $\sigma_y^{(i)}$, $\sigma_z^{(i)}$ ($i=1,2,3$) на соответствующих гранях ПЭ, совпадающие со средними напряжениями на бесконечности, которым соответствуют задаваемые на гранях ПЭ перемещения Δ . Эквивалентный элемент при перемещениях (1) находится в однородном напряженном состоянии. По найденным усредненным напряжениям и деформациям с использованием (1) в соответствии с законом Гука можно получить модули упругости и коэффициенты Пуассона эквивалентной среды.

При нахождении модуля сдвига G_{xy} (для волокон круглого поперечного сечения) рассматривается бесконечная однородная изотропная среда, армированная двоякопериодической системой включений, находящаяся

в состоянии чистого сдвига (рисунок 1 в), — среда с квадратной схемой армирования, как частный случай прямоугольной двоякопериодической схемы. Для нахождения G_{xy} в рассматриваемой неоднородной среде необходимо определить средние напряжения $\sigma_{x'}$ и $\sigma_{y'}$ на границе ПЭ, соответствующие чистому сдвигу ($\sigma_{y'}^{\infty} = -\sigma_{x'}^{\infty} = \tau_{xy}^{\infty}$). Периодичность напряженного состояния имеет место в направлении осей x' , y' , $z'=z$, повернутых относительно оси z на 45° , также будет существовать симметрия перемещений относительно новых координатных плоскостей. В качестве ПЭ выбирается элемент с гранями, параллельными новым координатным плоскостям. Модуль поперечного сдвига для ортотропного материала определяется соотношением: $G_{xy} = E_{x'} / (2 \cdot (1 + \mu_{x'y'}))$. Для его нахождения требуется определить $E_{x'}$ и $\mu_{x'y'}$ для ПЭ среды относительно новых осей (x' , y' , $z'=z$), находящегося в напряженном состоянии, соответствующем чистому сдвигу, используя ранее описанный подход. Для трансверсально-изотропного материала поворота осей координат не требуется.

Для определения модуля сдвига G_{xz} рассмотрена задача чистого сдвига в плоскости XZ для ПЭ, при котором на его гранях действуют только касательные напряжения (рисунок 1 г). Из ПЭ среды выбирается элемент малого объема $dz \times h_x \times h_y$ и в нем усредняются по объему касательные напряжения при смещении грани на величину δ (при этом грань смещается на угол γ — угол сдвига), и модуль сдвига G_{xz} выражается из закона Гука: $G_{xz} = \tau_{xz} / \gamma$.

Для решения поставленной задачи в программной среде ANSYS был создан блок программ-алгоритмов, позволяющий осуществлять автоматический расчет эффективных модулей в требуемом диапазоне объемного содержания волокна и при заданных свойствах компонент.

В рамках диссертационной работы была проведена оценка эффективных модулей для сред, армированных волокнами круглого сечения с квадратной и гексагональной схемой армирования, в диапазоне объемного содержания волокна ψ от 0,01 до 0,76 для различных соотношений упругих свойств составляющих фаз (при равных коэффициентах Пуассона армирующего компонента (волокна) μ_a и связующего μ_c и различных соотношениях модулей упругости волокна и связующего $E_a/E_c = 10^n$; где $n = -2; -1; 0; 1; 2$; при равных E_a и E_c и $\mu_a/\mu_c = m$, где $m = 0,33; 0,50; 0,80; 1,00; 1,25; 1,50; 2,00$); волокнами эллиптического сечения с коэффициентом сжатия эллипса (эллиптичностью) $k = 1,0; 1,1; 1,2; 1,5; 2,0; 3,0; 5,0; 7,0; 10,0$. Основываясь на экспериментальных данных, приведенных в научных статьях, показана достоверность результатов расчета эффективных модулей.

Проведено сопоставление эффективных модулей для сред, армированных волокнами круглого сечения, для различных схем армирования при одном и том же ψ . Показано, что величина E_z нечувствительна к изменению схемы армирования. Изменение схемы армирования влияет на величины E_x , G_{zx} , G_{xy} и μ_{xy} (при $\psi > 0,7$ различие в результатах может составлять 87,7%, 61,1%, 65,5% и 88,6%, соответственно). Указанные тенденции прослеживаются как при варьировании n , так и при варьировании m . Наличие эллиптичности волокон в направлении оси X оказывает влияние на E_x , μ_{xy} и G_{zx} (максимальное различие

в результатах расчета (для $k=1,0$ и $k=10,0$) составляет 45,5%, 28,8% и 47,6%, соответственно). Показано, что технологические несовершенства, связанные с кривизной контура волокна, и изменение схемы расположения волокон в большей степени влияют на модуль упругости E_x , коэффициент Пуассона μ_{xy} , модули сдвига G_{zx} и G_{xy} . Это обстоятельство необходимо учитывать при расчетах. При использовании вышеописанного МКЭ подхода этот учет возможен.

Проведено сопоставление результатов расчета по приближенным формулам с результатами по КЭ расчету в зависимости от ψ и от соотношения упругих свойств составляющих фаз. В работе анализируются наиболее известные приближенные формулы: оценка типа Рейсса и Фойхта, правило смесей; формула Уитни и Райли; формула Хашина и Розена; формула Малмейстера; формулы, основанные на модели Болотина; формулы, представленные И.Н. Карпиносом и Д.М. Францевичем. На основании сопоставления результатов, полученных по приближенным формулам, с результатами ЧЭ выработаны рекомендации по применимости приближенных формул: для определения E_z рекомендованы к расчету все рассматриваемые формулы; для определения E_x — формула, представленная Францевичем и Карпиносом; для μ_{zx} — формула Хашина и Розена и формула Уитни и Райли; для G_{zx} — формула Уитни и Райли; для G_{xy} возможно использование формулы Малмейстера при $\psi < 10\%$. Результаты сравнения подтверждают целесообразность проведенного исследования.

Показана возможность перехода от прочностных характеристик составляющих фаз к прочностным характеристикам однонаправленной среды. При отсутствии паспортных данных материала механико-прочностные характеристики могут быть определены по описанному МКЭ подходу или по приближенным формулам (в указанных пределах). Результаты, полученные во втором разделе, служат отправной точкой к исследованию многоуровневого разрушения конструкции из слоистого КМ.

Третий раздел диссертации посвящен расчету несущей способности элементов конструкции из слоистых КМ с концентраторами напряжений при использовании подхода, основанного на МПР; реализации и автоматизации алгоритма расчета по данному подходу в программной среде ANSYS, а также верификации результатов расчета относительно экспериментальных данных для образцов с различными концентраторами. Данный подход был выбран, исходя из того, что он позволяет не только предсказать величину разрушающей нагрузки, но и исследовать весь путь развития идентифицированного повреждения (разрушение волокна, разрушение матрицы, отрыв матрицы от волокна и расслоение) в любой точке конструкции. Кроме того по картине распределения разрушенного материала вблизи концентратора прогнозировать тип разрушения болтового соединения (разрыв, скол, смятие). МПР представляет собой совокупность трех основных процедур: анализ напряженно-деформированного состояния (НДС), анализ разрушения на основе выбранных

критериев разрушения и деградация (ослабление) механических свойств материала. Блок-схема алгоритма расчета представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 — Блок-схема алгоритма расчета на основе МПП

Для анализа НДС исследуемого объекта применялся КЭ комплекс *ANSYS* при использовании встроенного языка программирования *APDL*, при этом решалась задача в трехмерной постановке с учетом контактного взаимодействия поверхностей при наличии трения. Описание создания конечно-элементной модели (КЭМ) и выбора размера КЭ вблизи концентратора приведено в диссертации. После создания КЭМ осуществляется расчет НДС при заданном уровне нагружения и запись напряжений в каждом узле КЭМ.

Процедура анализа разрушения проводится на базе набора критериев, описывающих разрушения в слоях многослойного пакета. В данном исследовании использовался набор критериев Хашина для задачи в трехмерной постановке (таблица 1). Выбранные критерии позволяют различить следующие виды разрушения внутри многослойного пакета: разрушение матрицы и волокна при растяжении и сжатии, отрыв матрицы от волокна посредством сдвига и расслоение. При текущем уровне нагрузки проводится анализ НДС исследуемого объекта и в каждом узле КЭМ проверяется условие возникновения повреждения (критерий разрушения). Предполагается, что разрушение по тому или иному механизму происходит в соответствии с критериями разрушения (таблица 1). При наличии повреждений проводится соответствующая деградация механических свойств КМ в соответствии

с выбранным правилом, которая заключается в локальной замене свойств материала на ослабленные (деградированные) путем введения понижающих коэффициентов, предписанных правилом деградации. Использованное правило деградации (или мера деградации) механических свойств, основанное на подходе *S. C. Tan* и распространенное на трехмерный случай *P. P. Camanho* и *F. L. Matthews*, представлено в таблице 1.

Таблица 1 — Виды и критерии разрушения, мера деградации свойств

Вид разрушения	Критерий разрушения	Мера деградации свойств
Разрушение матрицы при растяжении ($\sigma_y > 0$)	$\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2bt}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12b}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{\sigma_{23b}}\right)^2 = 1$ (2)	$E_1=0,2E_1; G_{12}=0,2G_{12}; G_{23}=0,2G_{23}$
Разрушение матрицы при сжатии ($\sigma_y < 0$)	$\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2bc}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12b}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{\sigma_{23b}}\right)^2 = 1$ (3)	$E_1=0,4E_1; G_{12}=0,4G_{12}; G_{23}=0,4G_{23}$
Разрыв волокна ($\sigma_x > 0$)	$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1bt}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12b}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{\sigma_{13b}}\right)^2 = 1$ (4)	$E_1=0,07E_1$
Разрушение волокна при сжатии ($\sigma_x < 0$)	$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1bc}}\right) = 1$ (5)	$E_1=0,14E_1$
Отрыв матрицы от волокна посредством сдвига ($\sigma_x < 0$)	$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1bc}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{\sigma_{12b}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{\sigma_{13b}}\right)^2 = 1$ (6)	$G_{12}=\mu_{12}=0$
Расслоение при растяжении ($\sigma_z > 0$)	$\left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{3bt}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{\sigma_{13b}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{\sigma_{23b}}\right)^2 = 1$ (7)	$E_3=G_{23}=G_{13}=0;$ $\mu_{23}=\mu_{12}=0$
Расслоение при сжатии ($\sigma_z < 0$)	$\left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{3bc}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{\sigma_{13b}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{23}}{\sigma_{23b}}\right)^2 = 1$ (8)	
Примечание — $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{13}$ — нормальные и касательные напряжения в слое в процессе нагружения; $\sigma_{1bt}, \sigma_{2bt}, \sigma_{3bt}, \sigma_{1bc}, \sigma_{2bc}, \sigma_{3bc}$ и $\sigma_{12b}, \sigma_{23b}, \sigma_{13b}$ — значения пределов прочности монослоя на растяжение, сжатие и сдвиг; $E_1, E_2, E_3, G_{12}, G_{23}, G_{13}, \mu_{12}, \mu_{23}, \mu_{13}$ — модули упругости, модули сдвига и коэффициенты Пуассона слоя относительно осей 1, 2 и 3 (1 — вдоль волокна, 2 — поперек волокна, 3 — по толщине).		

После деградации механических свойств требуется проводить повторный анализ НДС для исследуемого объекта с деградированными механическими свойствами, анализ разрушения и деградацию при возникновении новых видов разрушений или при развитии ранее определенных видов, находясь при этом на одном и том же уровне нагрузки. Процедура пересчета прекращается, когда на текущем уровне нагрузки накопление новых повреждений останавливается, тогда уровень нагрузки повышается на выбранный шаг нагружения и процедура расчета по схеме: анализ НДС/анализ разрушений/деградация свойств повторяется. Расчет продолжается до тех пор, пока уровень нагрузки, прикладываемой к объекту исследования, не достигнет величины разрушающей нагрузки. Для контроля разрушающей нагрузки на основе КЭ расчета выстраивается диаграмма «нагрузка-перемещение» контрольных точек образца,

на которой наличие скачка в перемещениях свидетельствует о переходе к активной фазе накопления повреждений в КМ. Последнее, как правило, сопровождается приростом объема КЭ, поврежденных по наиболее критичным комбинациям механизмов разрушения. Рост объема поврежденных КЭ контролируется на протяжении всего расчета. Данный подход потенциально может быть применен к конструкциям с концентраторами любой формы и типа, поскольку набор критериев разрушения позволяет учитывать все возможные механизмы разрушения. В этом состоит преимущество и универсальность подхода.

Опираясь на экспериментальные данные, проведена верификация результатов расчета прочности по МПР подходу для следующих образцов, выполненных из различных углепластиков:

- образцы с отверстием;
- образцы с зенкованным отверстием;
- образцы с рядом отверстий;
- образцы с отверстием, заполненным болтом;
- образцы с зенкованным отверстием, заполненным болтом;
- образцы двусрезного болтового металлокомпозитного соединения;
- образцы многорядного металлокомпозитного болтового соединения.

Все вышеперечисленные образцы были испытаны и рассчитаны на разрыв при растяжении. Для образцов многорядных болтовых соединений испытания и расчет были проведены для сдвигового нагружения. Исследовался также образец с отверстием, заполненным болтом, для случая нагружения в зонах пересечения силовых потоков.

Для испытаний образцов, выполненных из углепластика ВКУ-30, изготовленных в ОАО «ОКБ Сухого» и содержащих концентраторы в виде отверстий и зенкованных полых отверстий и отверстий, заполненных крепежным болтом, использовалась универсальная электрогидравлическая машина *BiSS UTM-100kN*. Нагружение образцов выполнялось с применением гидрозхватов, управление нагружением осуществлялось по перемещению штока со скоростью 6 мм/мин. Всего было испытано 60 образцов трех различных укладок — по пять образцов на каждую укладку для каждого концентратора напряжений. Образцы с отверстием, выполненные из КМКУ и *Torayca T700*, и образцы из КМКУ с рядом отверстий были испытаны на испытательной машине *MTS-50* ступенчато с шагом нагружения 50, 100 и 250 кгс. Испытания указанных образцов сопровождались акустико-эмиссионным контролем. Испытания двухсрезных болтовых соединений проводились на машине *BiSS UTM-100kN*, нагружение производили по перемещению штока со скоростью 6 мм/мин. Всего было испытано 40 образцов, выполненных из КМКУ, распределенных по 19-ти группам, сформированным по конструктивным особенностям (расположение слоев в укладке, диаметр болта, ширина образца и расстояние от отверстия под болт до края образца в направлении приложения нагрузки) и по величине затяжки болта; пять образцов, выполненных из материала *Torayca T700*. Образцы

многорядных соединений из КМКУ испытывались на *MTS-10*. Испытания многорядных болтовых соединений (выполненных из *Torayca T700*) при сдвиге и при имитации нагружения в зонах пересечения силовых потоков для образца однорядного болтового соединения проводились на испытательной машине *BISS UTM-100kN*. Для этих образцов были разработаны и изготовлены специальные приспособления для испытаний. При испытаниях на сдвиг нагружение производилось с постоянной скоростью 6 мм/мин, при испытаниях для нагружения в зонах пересечения силовых потоков нагружение производилось с постоянной скоростью 3 мм/мин. Все вышеописанные испытания проводились в ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина». Двухрядные и трехрядные образцы болтового соединения из *CYCOM* были испытаны в Центральном аэродинамическом институте имени профессора Н. Е. Жуковского на испытательной машине *MTS 810* ступенчато с интервалом нагружения в 250 и 500 кгс.

При исследовании прочности образцов с отверстием проводился подробный анализ развития повреждений в образцах с ростом нагрузки вплоть до разрушения. Для этого проводилась оценка роста объема поврежденного материала с увеличением нагрузки. На рисунке 3 для образца с отверстием, выполненного из *Torayca T700*, с укладкой $[\pm 45^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/\pm 45^\circ]$ представлен рост процентного содержания поврежденного материала во всем объеме образца $\lambda = 100 \cdot V_{\text{повр}}/V_{\text{об}}$ с ростом нагрузки P , где $V_{\text{повр}}$ — объем накопленного повреждения по определенному механизму разрушения или по их комбинации во всем образце, $V_{\text{об}}$ — общий объем образца/слоя.

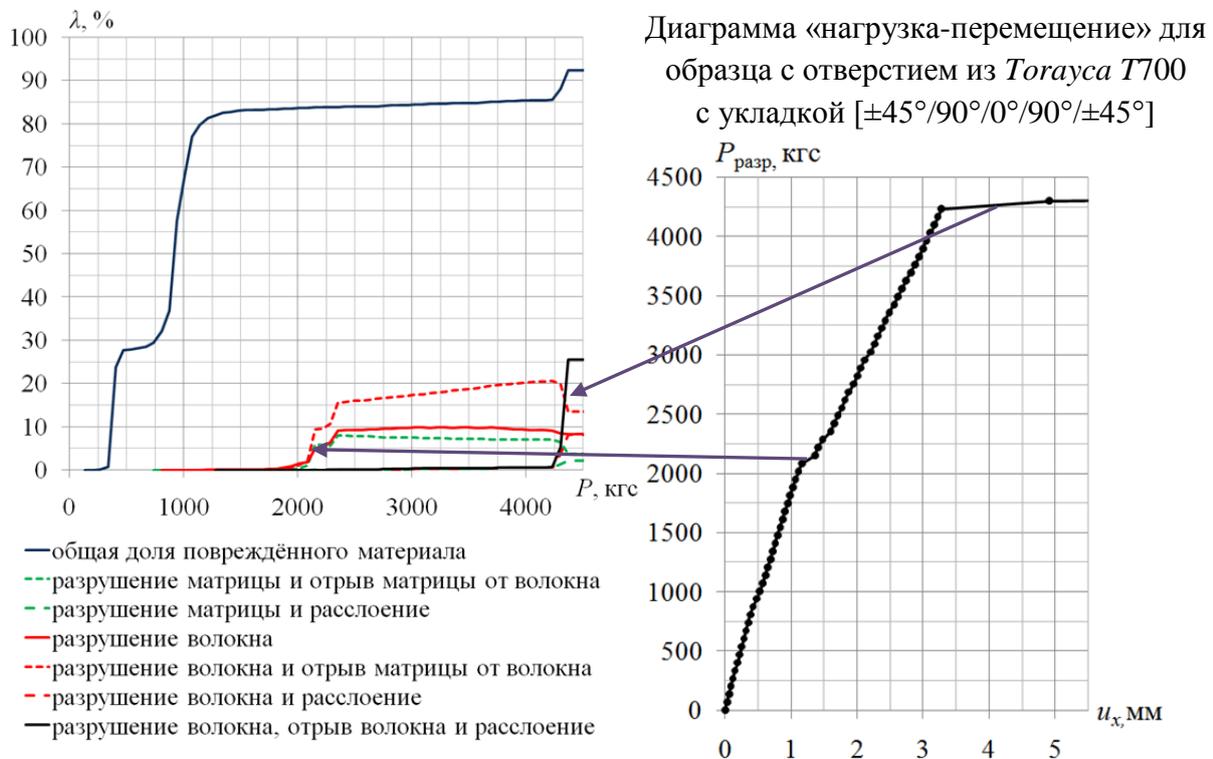


Рисунок 3 — Процент накопления повреждений λ в образце с ростом нагрузки P и расчетная диаграмма «нагрузка-перемещение» для образца с отверстием

На рисунке 3 виден рост общей доли повреждения, которую на первых этапах нагружения обеспечивает лишь разрушение матрицы, и далее рост доли поврежденного материала по различным механизмам разрушения. Здесь же представлена расчетная диаграмма «нагрузка-перемещение» для этого образца, на которой скачками в перемещениях при неизменном шаге нагружения отражается резкий рост доли поврежденного материала в образце. На диаграмме просматриваются два явных скачка перемещений. При первом скачке перемещений в образце возрастает содержание разрушенного волокна, но это не приводит к разрушению образца. При втором, более явном, скачке в перемещениях доля поврежденного волокна, отрыв матрицы от волокна и расслоение в слоях достигают такого уровня, что перемещения захватов образцов возрастают в 1,5 раза. В этот момент происходит разрушение образца. Отличие результатов расчета от эксперимента для образца составляет 0,7%.

Для образцов с отверстием проведено сопоставление результатов расчета по данному подходу с результатами расчета по критерию Нуизмера, используемому в инженерной практике для оценки прочности образцов с отверстием при осевом растяжении. При использовании критерия Нуизмера образец моделируется как однородная ортотропная среда с эффективными характеристиками укладки. В результате сравнения оказалось, что подход, основанный на МПР, показывает меньшее отличие от экспериментальных данных для большинства из рассмотренных образцов, чем критерий Нуизмера. Кроме того, критерий Нуизмера не позволяет определять вид разрушения.

В таблице 2 представлены результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных (верификации) для исследуемых в диссертации образцов с различными конструктивными особенностями, где приведен диапазон значений δ ($\delta = (P_{\text{разр}} - P_{\text{экс}}) \cdot 100\% / P_{\text{экс}}$, где $P_{\text{экс}}$ — экспериментально полученная разрушающая нагрузка для образца, $P_{\text{разр}}$ — расчетная разрушающая нагрузка).

Таблица 2 — Результаты верификации подхода для образцов

Образец	Материал	δ , %
с отверстием	ВКУ-30	-23,7...3,6
	КМКУ	-11,3
	<i>Torayca T700</i>	-13,3...-0,7
с зенкованным отверстием	ВКУ-30	-18,6...-13,8
с рядом отверстий	КМКУ	15,1
с отверстием, заполненным болтом	ВКУ-30	-18,9...-5,2
с зенкованным отверстием, заполненным болтом	ВКУ-30	-19,1...-6,3
	КМКУ	-10,9...11,4
двусрезного одноболтового металлокомпозитного соединения	<i>Torayca T700</i>	-15,9...11,5
	КМКУ	-11,6
многорядного металлокомпозитного болтового соединения	<i>CYCOM</i>	-10,4...-4,9
	КМКУ	-11,6
многорядного металлокомпозитного болтового соединения (нагружение сдвигом)	<i>Torayca T700</i>	8,5...9,8
с отверстием, заполненным болтом (нагружение в зонах пересечения силовых потоков)	<i>Torayca T700</i>	-10,3...23,2

Результаты верификации демонстрируют способность данного подхода с удовлетворительной точностью предсказывать разрушающую нагрузку для образцов с рассмотренными концентраторами.

По распределению поврежденного материала вблизи отверстия можно судить о типе разрушения в болтовых соединениях (смятие, скол, разрыв). На рисунке 4 представлено распределение КЭ с деградированными свойствами для образцов двухсрезного болтового соединения для случая разрушения смятием, разрывом и сколом с фотографиями образцов после испытаний. В таблице 3 приведено соответствие цвета КЭ механизму разрушения или их комбинации.

Таблица 3 — Соответствие обозначения КЭ механизму разрушения

КЭ	Механизм разрушения/комбинация
	Разрушение волокна при растяжении/сжатии
	Разрушение матрицы при растяжении/сжатии и отрыв матрицы от волокна посредством сдвига
	Разрушение волокна при растяжении/сжатии и отрыв матрицы от волокна посредством сдвига
	Растрескивание матрицы при растяжении/сжатии и расслоение
	Разрушение волокна при растяжении/сжатии и расслоение
	Разрушение матрицы при растяжении/сжатии; отрыв матрицы от волокна посредством сдвига и расслоение
	Разрушение волокна при растяжении/сжатии; отрыв матрицы от волокна посредством сдвига и расслоение

Картина распределения поврежденного материала при разрушении болтового соединения *смятием* представляет собой скопление КЭ, поврежденных по комбинациям разрушающих механизмов, содержащих расслоение. Поврежденные КЭ скапливаются в зоне контакта болта с КМ по всей толщине образца, при этом область повреждения распространяется по ширине шляпки болта в направлении действия силы, что соответствует видимой зоне смятия за болтом при испытаниях. Для случая разрушения *сколом* характерно наличие обширной зоны КЭ, содержащих разрушенное волокно, которая распространяется по ширине образца и пересекает перемычку до свободного края по направлению приложения нагрузки. При наличии затяга в образцах, разрушаемых сколом, к вышеуказанному распределению КЭ сразу за болтом добавляется зона с КЭ, поврежденными преимущественно по типу разрушения расслоение и его комбинациям, как для случая смятия, но при смятии отсутствует разрушение волокна по ширине перемычки. Для случая разрушения *разрывом* имеет место скопление КЭ, содержащих расслоение, но в меньшей степени, и зона повреждения здесь концентрируется вблизи отверстия и распространяется не столь обширно по сравнению с остальными

случаями. Прогнозируемые разрушения образцов, наблюдаемые при расчетах, подтвердились наблюдениями при испытаниях (рисунок 4).

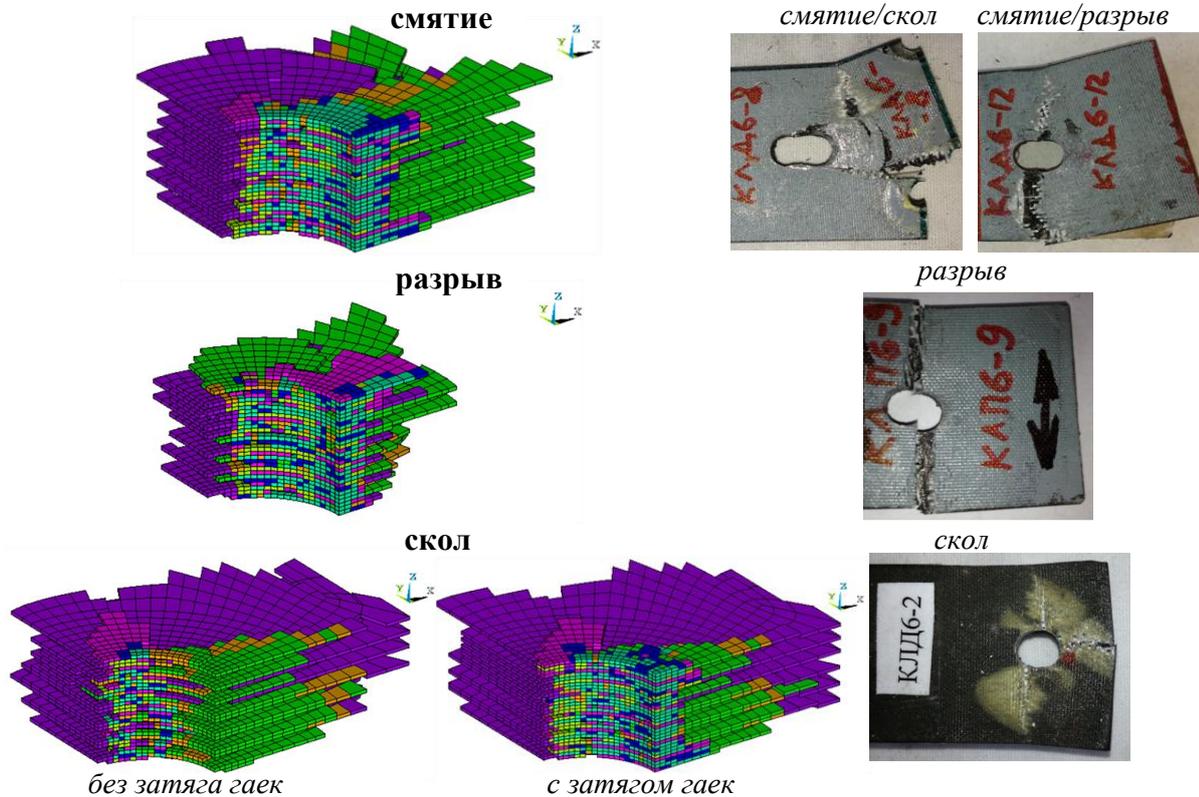


Рисунок 4 — Распределение поврежденного материала вблизи болта для образцов двухсрезного болтового металлокомпозитного соединения

На рисунке 5 для образцов металлокомпозитных болтовых соединений с двумя и тремя болтами (случай нагружения — растяжение) приведены картины распределения поврежденных КЭ вблизи отверстий, где можно наблюдать два основных типа разрушения (смятие и разрыв), видимые при испытаниях.

Для двухрядного болтового соединения вблизи наиболее нагруженного отверстия наблюдается скопление КЭ, поврежденных по механизмам разрушения, содержащих расслоение, распространяющихся вдоль оси приложения нагрузки, что соответствует разрушению смятием. Распределение поврежденных КЭ вблизи наиболее нагруженного отверстия в образце с тремя болтами соответствует вышеописанному распределению КЭ для случая разрыва. Распределение разрушенных КЭ соответствует видимым разрушениям при испытаниях. Для образцов многорядного болтового соединения (нагружение сдвигом) для двух случаев постановки двух и четырех болтов и однорядного болтового соединения (случай нагружения в зонах пересечения силовых потоков) при изменении расстояния от кромки образца до кромки отверстия картина распределения разрушенных элементов сопоставима с наблюдениями при испытаниях. Распределения поврежденных КЭ, определенные в ходе расчета для образцов болтовых соединений, позволяют корректно прогнозировать вид разрушения.

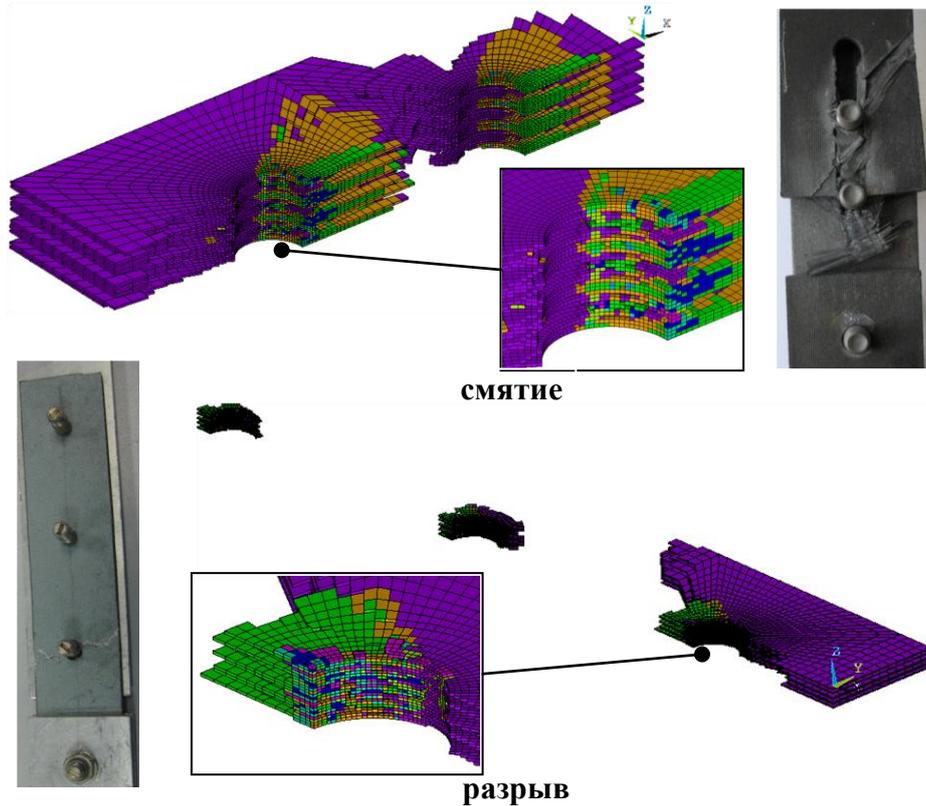


Рисунок 5 — Распределение поврежденного материала вблизи отверстий для многорядных металлокомпозитных болтовых соединений

В четвертом разделе приведены результаты параметрического исследования прочности металлокомпозитных болтовых соединений на основе верифицированного МПР подхода. В качестве исследуемых параметров выступали (рисунок 6): укладка слоев; расстояние от центра отверстия до свободной кромки — b ; расстояние от центра отверстия до края пластины по ширине — a ; расстояние между центрами отверстий по ширине поперечного стыка — $2w$; затяжка болта; коэффициент «протекающей» нагрузки α : $\alpha = \sigma_n / \sigma_{см}$, где $\sigma_n = P_n / (t \cdot d)$, $\sigma_{см} = P_6 / (t \cdot w)$, $P_n = P - P_6$, P — приложенная нагрузка.

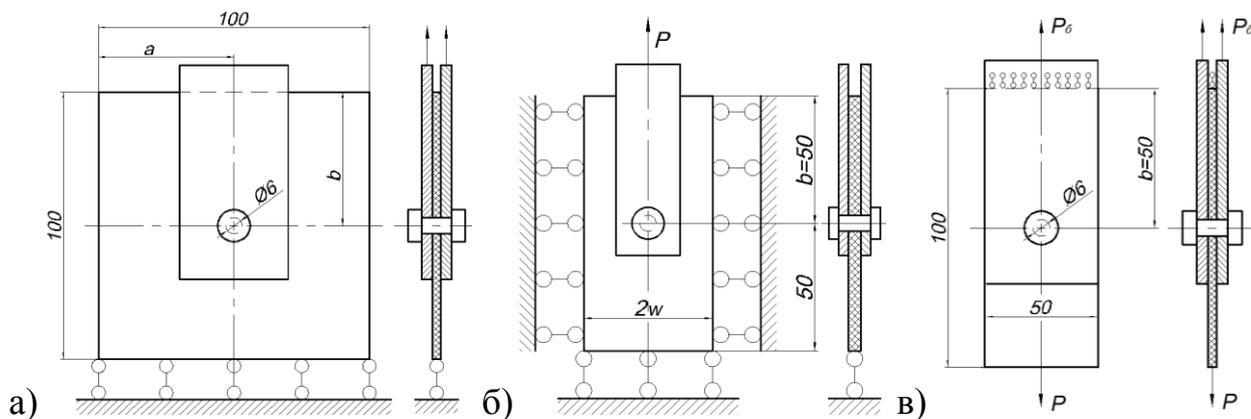


Рисунок 6 — Основные исследуемые параметры: а) расстояния a и b ; б) расстояние между отверстиями $2w$; в) коэффициент «протекающей» нагрузки α

По результатам параметрического исследования выработаны следующие рекомендации по проектированию металлокомпозитных болтовых соединений: использование слоев $\pm 45^\circ$ в пакете должно составлять 30-40%, слоев 90° — не более 20%; расстояние от отверстия до свободной кромки должно составлять не менее трех диаметров отверстия; расстояние от отверстия до края панели — не менее двух диаметров; расстояние между отверстиями в стыке — не менее пяти диаметров; величина осевого усилия в болте при затяжке — не более 900 кгс.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведено исследование многоуровневого разрушения элементов конструкций из слоистых КМ с концентраторами напряжений на основании реализованного численного алгоритма для определения методом конечных элементов механизмов разрушения, возникающих в слоях многослойных элементов при их нагружении вплоть до потери несущей способности исследуемого элемента, и позволяющего оценить тип разрушения элемента.

2. Определены усредненные эффективные модули при различных комбинациях упругих свойств составляющих компонент на основе решения краевой задачи теории упругости для представительного элемента среды, армированной непрерывными волокнами круглого и эллиптического поперечного сечения (однонаправленного монослоя). Проанализировано влияние схемы расположения волокон и эллиптичности волокна на усредненные эффективные модули эквивалентной среды. Показано и проанализировано влияние технологических несовершенств, связанных с формой поперечного сечения волокна. Их наличие, а также изменение схемы армирования оказывает наибольшее влияние на модуль упругости в направлении поперек волокон, на модуль сдвига и коэффициент Пуассона μ_{xy} .

3. Определены границы применимости приближенных формул в зависимости от объемного содержания волокна и выработаны рекомендации по их применимости путем сопоставления результатов расчета эффективных характеристик по приближенным формулам и по подходу, основанному на решении задачи теории упругости. Показано, что для определения модуля упругости в направлении поперек волокон E_x рекомендуется формула, представленная Францевичем и Карпиносом; для μ_{zx} рекомендованы формула Хашина и Розена и формула Уитни и Райли; для G_{zx} рекомендована формула Уитни и Райли.

4. Реализован подход, основанный на модели прогрессирующего разрушения, в программном комплексе *ANSYS* при использовании встроенного языка программирования *APDL*. Для этого был разработан блок программ-алгоритмов, позволяющий в автоматическом режиме проводить расчет образцов с различными концентраторами и предназначенный для использования в расчетной практике при проектировании элементов конструкций из слоистых КМ.

5. Проведена верификация подхода, основанного на модели прогрессирующего разрушения, путем сравнения результатов расчета с экспериментальными данными. Продемонстрирована способность подхода проводить исследование развития повреждений в слоях элемента конструкции из слоистого КМ при нагружении вплоть до потери несущей способности, т.е. проводить анализ многоуровневого разрушения в элементах КМ конструкций. Показана возможность использования подхода к оценке прочности образцов с отверстием цилиндрической формы и цилиндрической формы с частичной зенковкой, с отверстием, заполненным болтом, с рядом отверстий, образцов однорядного и многорядного болтового соединения при различных случаях нагружения и предсказывать тип разрушения для болтовых соединений (смятие, скол, разрыв).

6. На основании результатов параметрического исследования выработаны рекомендации по проектированию металлокомпозитных болтовых соединений. Они предполагают, что использование слоев $\pm 45^\circ$ в пакете должно составлять 30-40%, слоев 90° — не более 20%; расстояние до свободной кромки должно составлять не менее трех диаметров отверстия; расстояние от отверстия до края панели — не менее двух диаметров; расстояние между отверстиями в стыке — не менее пяти диаметров; величина осевого усилия в болте при затяжке гаек — не более 900 кгс.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ ВСЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК:

1. Олегин, И. П. Определение эффективных жесткостей однонаправленных композитов методом численного моделирования [Текст] / И. П. Олегин, К. А. Матвеев, Н. А. Коваленко // Доклады АН ВШ РФ. — Новосибирск, 2012. — №1 (18). — С. 116-122.

2. Коваленко, Н. А. Численно-экспериментальное исследование прочности элементов конструкций из слоистых углепластиков [Текст] / Н. А. Коваленко, И. П. Олегин, Т. Б. Гоцелюк, В. Н. Чаплыгин, П. М. Петров // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты, материаловедение). — 2014. — № 1 (62). — С.69-75.

3. Степанова, Л. Н. Использование метода конечных элементов, тензометрии и акустической эмиссии для определения механизма разрушения образцов из углепластика при прочностных испытаниях [Текст] / Л. Н. Степанова, Н. А. Коваленко, Е. С. Огнянова, В. В. Чернова, Е. А. Дробяз, В. А. Батаев // Контроль. Диагностика. — 2015. — № 4 — С. 29-36.

4. Степанова, Л. Н. Прочностные испытания фрагмента руля высоты самолета SSJ-100 методами акустической эмиссии и тензометрии [Текст] / Л. Н. Степанова, В. В. Чернова, Е. С. Огнянова, Н. А. Коваленко // Деформация и разрушение материалов. — 2015. — № 7 — С. 38-46.

5. Беспалов, В. А. Использование модели развивающегося повреждения при оценке прочности слоистых углепластиков с различными концентраторами напряжений [Текст] / В. А. Беспалов, Т. Б. Гоцелюк, Н. А. Коваленко, И. П. Олегин // Омский научный вестник. – 2015. – № 3 (143). – С. 329-333.

6. Гоцелюк, Т. Б. Исследование прочности болтовых соединений в слоистых композитах с использованием модели прогрессирующего разрушения [Текст] / Т. Б. Гоцелюк, В. Н. Гришин, Н. А. Коваленко // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2016. – Т. 22, № 2. – С. 225-244.

В прочих изданиях:

7. Олегин, И. П. Определение эффективных характеристик жесткости в однонаправленных композитах методом КЭ [Текст] / И. П. Олегин, Н. А. Коваленко // Труды 12 Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», посвященной 50-летию полета Ю.А. Гагарина в космос. – Новосибирск, 2011. – С.273-277.

8. Олегин, И. П. Математическое моделирование эффективных механических характеристик однонаправленных композитов [Текст] / И. П. Олегин, Н. А. Коваленко // Решетневские чтения: материалы 15 междунар. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-косм. систем акад. М. Ф. Решетнева, Красноярск: в 2 ч. – Красноярск, 2011. – Ч. 2. – С. 486-487.

9. Коваленко, Н. А. Численно-экспериментальное определение параметров критерия Нуизмера для слоистых углепластиков с различными типами концентраторов напряжений [Текст] / Н. А. Коваленко, И. П. Олегин, П. М. Петров, В. Н. Чаплыгин // Решетневские чтения: материалы 17 междунар. науч. конф., посвящ. памяти генер. конструктора ракет.-косм. систем акад. М.Ф. Решетнева, Красноярск: в 2 ч. – Красноярск, 2013. – Ч. 1. – С. 419-421.

10. Коваленко, Н. А. Исследование краевого эффекта в слоистых композитах методом конечных элементов [Текст] / Н. А. Коваленко, И. П. Олегин // Труды 14 Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», посвященной 100-летию со дня рождения А.И. Покрышкина. – Новосибирск, 2013. – С. 245-248.

11. Олегин, И. П. Определение эффективных характеристик жесткости композиционных материалов, содержащих эллиптические волокна [Текст] / И. П. Олегин, Н. А. Коваленко // Сборник научных трудов *SWorld*. – 2014. – Т. 8, вып. 1. – С. 91-96.

12. Гоцелюк, Т. Б. Численно-экспериментальное исследование критериев разрушения для слоистых углепластиков с различными концентраторами напряжений [Текст] / Т. Б. Гоцелюк, Н. А. Коваленко, И. П. Олегин, П. М. Петров, В. Н. Чаплыгин // сборник тезисов III Всероссийской конференции «Деформирование и разрушение структурно-неоднородных сред и конструкций», посвящ. 100-летию со дня рождения акад. Ю. Н. Работнова. – Новосибирск, 2014. – С. 36-37.

13. Гоцелюк, Т. Б. Расчетно-экспериментальное исследование прочности слоистых композитов [Текст] / Т. Б. Гоцелюк, Н. А. Коваленко // Сбор. науч. трудов I Международной научной конференции молодых ученых «Электротехника. Энергетика. Машиностроение», Ч. 3. Секция Машиностроение. – Новосибирск, 2014. – С. 280-283.

14. Беспалов, В. А. Модель развивающегося повреждения для оценки прочности слоистых композитов [Текст] / В. А. Беспалов, Т. Б. Гоцелюк, Н. А. Коваленко, И. П. Олегин // Материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности», БТИ. – Бийск, 2015. – С. 125-128.

15. Коваленко, Н. А. Оценка прочности слоистых композитов, содержащих концентраторы напряжений, на основе модели развивающегося повреждения [Текст] / Н. А. Коваленко, Т. Б. Гоцелюк, И. П. Олегин // Материалы XXIV Всероссийской конференции «Численные методы решения задач теории упругости и пластичности». – Омск, 2015. – С. 79-83.

16. *Kovalenko, N. A. Strength estimation of bolted joints in laminated composites by progressive damage model [Text] / N. A. Kovalenko, T. B. Gotseluk, V. A. Bepalov // Abstracts of 14th Sino-Russian Scientific Conference “Fundamental Problems of Aircraft Aerodynamics, Flight Dynamics, Strength and Flight Safety”. – Shenyang, 2015. – P. 19. [Оценка прочности болтовых соединений слоистых композиционных материалов с использованием модели развивающегося повреждения]*

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
Тел./факс: (383) 346-08-57
Формат 60 x 84/16. Объем 1.5 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ № 1659. Подписано в печать 28.11.2016 г.