

Исследование несущей способности композитных конструкций в зоне отверстия при различных схемах армирования

Д.Ю. КОНСТАНТИНОВ,
В.И. ХАЛИУЛИН,
д-р техн. наук,
В.В. БАТРАКОВ,
канд. техн. наук,
Р.Ю. ПЕТРУШЕНКО,
канд. техн. наук
(КНИТУ-КАИ, Казань)
pla.kai@mail.ru

Проводится оценка несущей способности композитных высоконагруженных конструкций, изготовленных различными методами подготовки преформ. Исследованы механические характеристики конструктивно-подобных образцов с помощью расчетов и экспериментов. Предложена технология для создания одноосно-нагруженных конструкций из композитов.

Интегральные конструкции, схемы армирования, напряжения в зоне отверстий, направленная укладка волокна, преформа, композиционный материал

Современное производство авиационных деталей из композиционных материалов отличается большим разнообразием конструкций и технологий [1–5]. За счет изменения структуры армирования возможно обеспечить требуемые свойства композиционного материала.

Проведение настоящего исследования обусловлено потенциальной возможностью снижения массы одноосно-нагруженных конструкций, имеющих отверстия, заменой металлических элементов на композитные.

Известно, что свойства композиционного материала проявляются в полной мере, если укладка армирующих волокон совпадает с линиями векторов главных напряжений в изделии [6]. Реализовать это условие для конструкций с отверстиями – трудная задача, так как большинство методов армирования рассчитано на создание регулярной структуры с линейно расположенными волокнами.

Одним из процессов создания рациональной армирующей структуры является выкладка волокна по заданной траектории (метод Tailored Fiber Placement (TFP)) [7]. Фиксирование армирующего волокна к вспомогательному несущему слою осуществляется при помощи верхней и нижней тонких сшивных нитей, которые соединяются, образуя петли [8].

При испытаниях на растяжение образцов с отверстием в случае армирования методом TFP получены положительные результаты [9]. Результаты испытаний образцов, в которых реализовано локальное подкрепление отверстия или огибание концентратора, близки к результатам исследований эталонных образцов без отверстий. В то же время при исследовании несущей способности образцов с отверстием на конце, изготовленных с различной схемой армирования [10], использование метода TFP мало повлияло на прирост критической нагрузки разрушения. Несущая способность образцов с кольцевым армированием превысила прочность образца с квазиизотропной укладкой всего на 9 %.

С точки зрения механики работы материала в зоне отверстия такой результат плохо объясним. Было сделано предположение, что при укладке преформы вокруг отверстия армирующие волокна плоскостяются. Сечение лент находится в плоскости растяжения с образованием свободного пространства между волокнами при огибании отверстия (рис. 1, а). В результате при нагружении волокна в работу включаются поочередно: сначала только волокна, близко расположенные к отверстию, а после их деформации – остальные. Очевидно, изменяя форму размещения волокна (переход от лент к жгутам) [11] можно приблизиться к схеме, обеспечивающей более плотное армирование материала (рис. 1, б).

В работах [9–11] по изучению схем армирования композитных деталей с отверстиями не доказано преимущество той или иной схемы.

Для подтверждения правильности выбора формы размещения ровинга проведен эксперимент по определению критической нагрузки разрушения образцов с отверстием при различных схемах армирования. Основным видом испытания выбрано растяжение образца.

Исследовалась деталь типа «проушина» (рис. 2, а), являющаяся составной частью втулки рулевого винта вертолета, которая, в свою очередь, была упрощена до конструктивно-подобного элемента «серьга» (рис. 2, б).

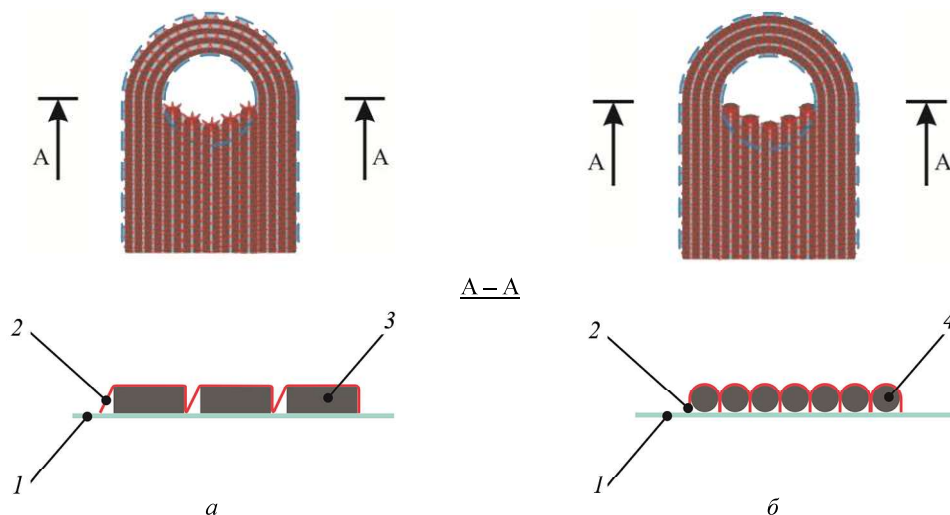


Рис. 1. Варианты реализации укладки волокна:
а – укладка лентой; *б* – укладка жгутом (1 – подложка; 2 – прошивная нить; 3 – лента; 4 – жгут)

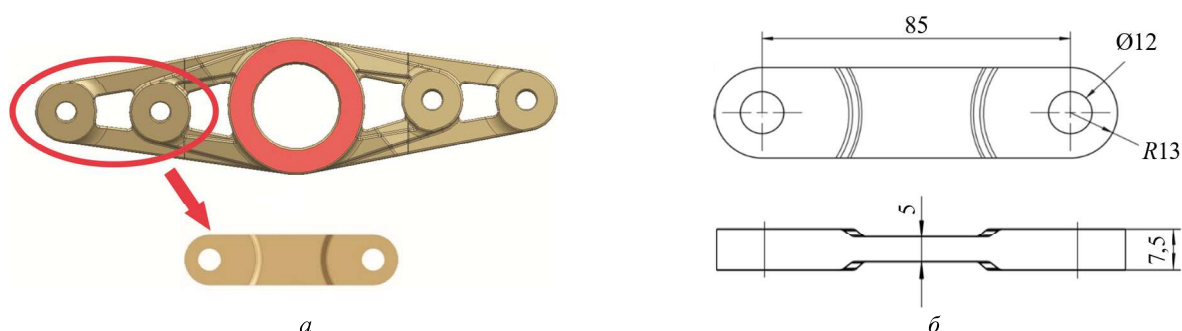


Рис. 2. Объекты исследования

Были рассмотрены три типа образцов конструктивно-подобного элемента «серьга»: 1) образцы, изготовленные методом направленной укладки, армированные лентой и жгутом; образец со схемой укладки 0° с размещением ленты и жгута с огибанием отверстия; 3) образец, изготовленный из тканого композита со схемой укладки 0° , 90° , $\pm 45^\circ$.

Геометрические параметры каждого типа образца выбраны с учетом соблюдения равенства по массе (27 г), а также с учетом коэффициента наполнения волокном $V_f = 56\%$. В качестве материала для композитных образцов использовались углеродная ткань саржевого переплетения Hexcel G0986E012F на основе волокна HTA51316K с нанесенным биндером в количестве 5 % от массы ткани и углеродное волокно Togausa T700.

Проведение конечно-элементных расчетов на упрощенных образцах «серьга» и сравнение с экспериментальными данными необходимо для верификации характеристик материала и расчетной модели. Подтверждение и уточнение модели материалов и схемы нагружения позволит с достаточной точностью оценить напряженно-деформированное состояние, жесткость и прочность композитного корпуса втулки рулевого винта и провести оптимизацию схемы армирования на раннем этапе конструирования. Исходные данные следующие: геометрия образцов «серьга», схема испытания, физико-механические характеристики материалов и схема армирования.

Модели образцов представляют собой срединные поверхности, т. е. плоскость симметрии выкладки пакета слоев, поскольку в качестве материала исследуется слоистый композит (рис. 3).

Для определения напряженно-деформированного состояния используется метод конечных элементов. На рис. 4 представлено разбиение на конечные элементы. Использованы оболочечные конечные элементы Shell181 – четырехузловые элементы с шестью степенями свободы в каждом узле. Толщина образца визуализирована для удобства и контроля правильности задания укладки слоев пакета. Размер

сетки конечных элементов подобран таким образом, что обеспечить достаточную точность решения при сокращении необходимых вычислительных ресурсов. Для основных расчетов принята сетка с размером элемента 1 мм. Общее количество элементов конструктивно-подобного элемента «серьга» – 6600. Кроме того, в расчетной модели использованы конечные элементы SOLID186 (объемные двадцатиузловые) для моделирования шпилек испытательной оснастки.



Рис. 3. Срединная поверхность



Рис. 4. Конечно-элементная модель конструктивно-подобного элемента «серьга»

Контактное взаимодействие осуществлено с помощью специальных элементов – Conta175 и Targe170 по соответствующим парам (трехмерная линия – поверхность). Тип контакта жесткий, с коэффициентом трения, равным бесконечности.

Конечно-элементный расчет проводился по критерию максимальных напряжений (нормальных и сдвиговых) и квадратичного критерия Цая – Ву [12].

Критерий Цая – Ву учитывает суммарную энергию деформации. Для напряжения, принятого для композитных оболочек, вычисляется индекс разрушения следующим образом:

$$f = (F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2) + (F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{66}\tau_{12}^2);$$

$$\text{где } F_1 = \frac{1}{X_1^T} - \frac{1}{X_1^C}; F_2 = \frac{1}{X_2^T} - \frac{1}{X_2^C}; F_{11} = \frac{1}{X_1^T X_1^C}; F_{22} = \frac{1}{X_2^T X_2^C}; F_{66} = \frac{1}{(S_{12})^2}; F_{12} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{X_1^T X_1^C X_2^T X_2^C}}.$$

Здесь: X_1 – предел прочности в направлении материала «1»; X_2 – предел прочности в направлении материала «2»; S_{12} – предел прочности при сдвиге.

Граничные условия (рис. 5) соответствуют схеме стенда для статических испытаний. При этом вводится условие симметрии образцов в виде ограничения перемещения вдоль оси OX и фиксации поворотов линии на плоскости симметрии (B). К шпильке прикладывается сила $F_n = 9806,6$ Н, действующая вдоль оси OX (C). Для предотвращения смещения модели как единого целого дополнительно введено ограничение перемещения вдоль оси OZ для поверхностей образцов (D) и ограничение перемещения вдоль оси OY единственной точки модели (A).

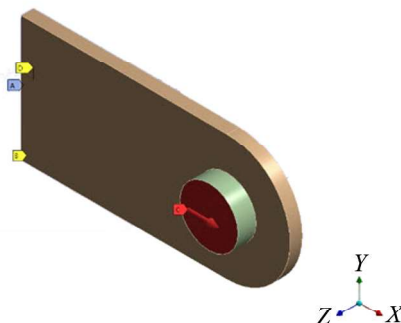


Рис. 5. Граничные условия

Растяжение образцов происходит за счет приложенной к оснастке нагрузке и контактного взаимодействия со шпилькой. Данное усложнение расчета введено в связи со значительным влиянием способа передачи нагрузки образца на результаты моделирования.

Исследуем напряженно-деформированное состояния образца «серьга».

На рис. 6, а показано поле напряжений, на рис. 6, б – картина распределения векторов главных напряжений.

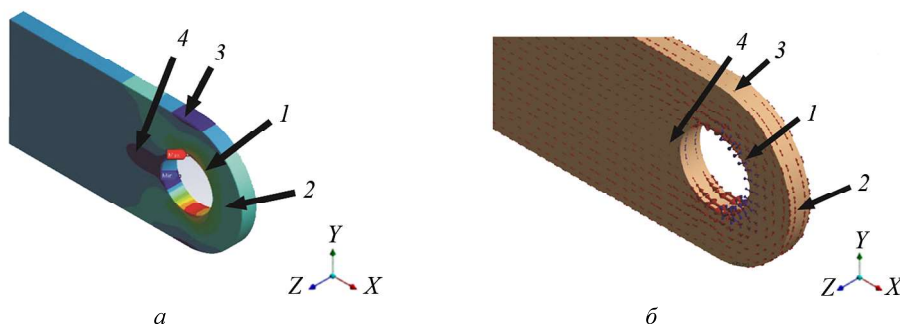


Рис. 6. Распределение эквивалентных и главных напряжений по объему «серьги»

На рис. 6 выделяются четыре характерные зоны, отличающиеся уровнем напряжений: зона 1 с большими напряжениями смятия в зоне контакта с болтом; зона 2, охватывающая отверстие; зона 3, расположенная в месте наименьшего сечения; зона 4, расположенная за отверстием. В зонах 1–3 наблюдается наибольший уровень напряжений, в зоне 4 – наименьший. Как и следовало ожидать, в зоне контакта с болтом главные напряжения направлены по нормали к отверстию. В зоне 2 векторы располагаются в кольцевом направлении, а в зоне 3 – по касательной к отверстию.

На основании полученных результатов интенсивности напряжений и их ориентации были предложены рекомендации по армированию конструктивно-подобного элемента «серьга». Было увеличено сечение по толщине (количество слоев армирующего материала) в зонах с высоким уровнем напряжений и расположение армирующих волокон по линиям главных напряжений.

На рис. 7 показана послойная разбивка преформы конструктивно-подобного элемента «серьга».

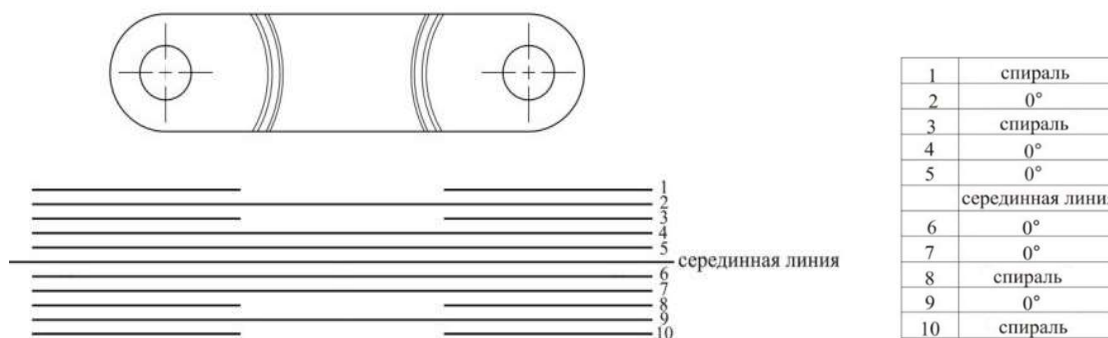


Рис. 7. Послойная укладка конструктивно-подобного элемента «серьга»

Приведем результаты расчета прочности образцов. В случае образца, полученного TFR-методом, волокна которого работают в идеальных условиях, критическая нагрузка $F_{\text{крит}} = 47,94$ кН; в случае образца из ткани (0°, 90°, ±45°) $F_{\text{крит}} = 22,9$ кН. В расчетах методом конечных элементов условия площения волокна не были заданы, так как сложно было прогнозировать поведение волокна.

Рассмотрим процесс изготовления образцов конструктивно-подобного элемента «серьга» методом TFR – укладкой лентой и жгутом. Формирование слоев методом TFR – укладкой лентой и жгутом – осуществляется настроечными параметрами машины.

На первом этапе методом направленной укладки волокна изготавливаются преформы. Затем преформы укладываются в формообразующую оснастку и формируются методом RTM.

Технологический процесс изготовления конструктивно-подобного элемента «серьга» из слоистой текстильной преформы методом RTM состоит из следующих операций:

- раскрой армирующей ткани (согласно карте раскроя на плоттере производится нарезка армирующего материала на заготовки с учетом направления армирования);

- выкладка заготовки армирующей ткани согласно схеме выкладки;
- фиксация слоев углеродной ткани производится при помощи термовакуумного пресса при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 30 мин.

Отверстия на образцах тканого типа создавались механической обработкой на станке с ЧПУ.

После изготовления образцов проводились испытания с целью определения критической нагрузки при растяжении. Результаты показаны на построенных диаграммах (рис. 8), характер разрушения продемонстрирован на рис. 9.

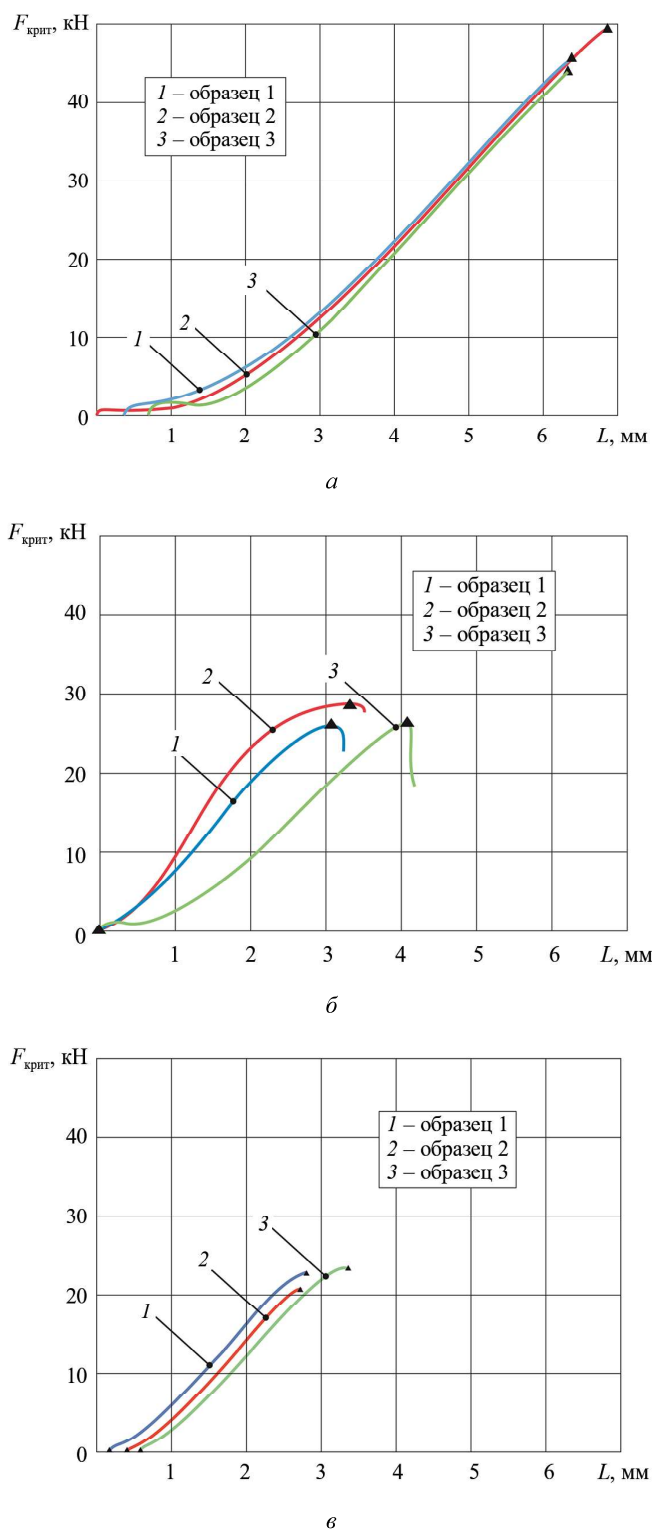


Рис. 8. Диаграммы нагружения образцов:
a – «жгут» (44,9 кН); *б* – лента (25,9 кН); *в* – ткань (22,5 кН) (▲ – зоны разрушения)

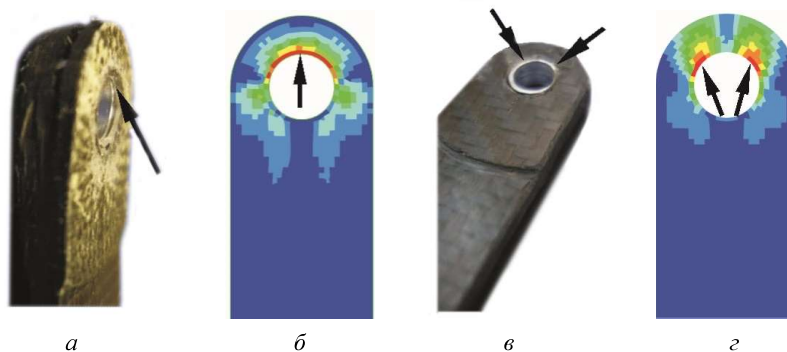


Рис. 9. Разрушения образцов типа «серьга» при растяжении

Согласно результатам эксперимента образцы с размещением ровингов в виде жгута (рис. 8, 9, а) имеют наибольшие значения по реализации несущей способности, данные образцы превосходили подобные образцы с размещением ровингов в виде ленты, на 80 % (рис. 8, 9, б). Несущая способность образцов, армированных тканью (рис. 9, з), существенно ниже, чем в случае первых двух вариантов.

Разрушение всех образцов произошло в зоне отверстия под втулкой. У образцов из ткани и образцов, изготовленных методом TFP (рис. 9, в, з) с размещением ровинга в виде ленты, наблюдается схожий характер разрушения, т. е. произошел разрыв волокон. В случае образцов из ткани это объясняется тем, что из-за нарушения целостности армирующего материала в зоне отверстия в работе участвует в основном связующее. В случае образцов, изготовленных методом TFP, армированных ровингом в виде ленты, как и предполагалось, произошло поочередное разрушение волокон в связи образовавшимися смоляными зонами между волокнами вокруг отверстия.

Характер разрушения образцов, изготовленных методом TFP с размещением ровинга в виде жгута, показал иную картину разрушения, произошло межслоевое разрушение (см. рис. 9, а, б).

На рис. 10 показано сравнение расчетных значений прочности с результатами эксперимента в зависимости от способа изготовления образцов.

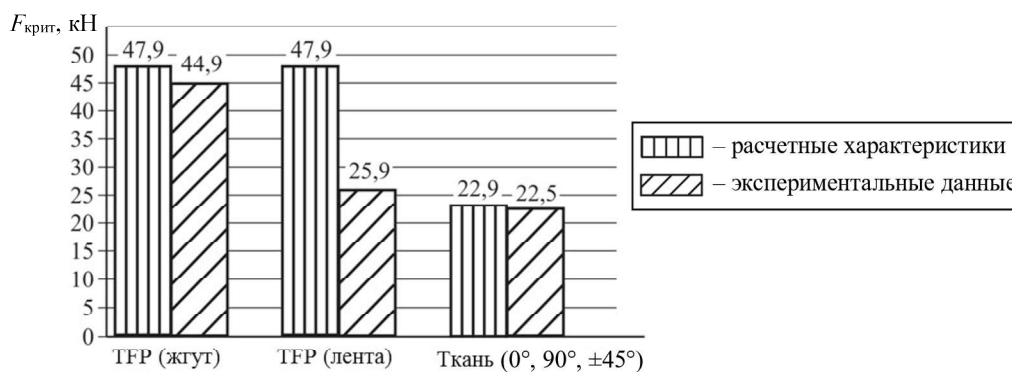


Рис. 10. Сравнительная диаграмма расчетных и экспериментальных данных

Как следует из гистограммы (см. рис. 10), прочность образцов с однонаправленным армированием в виде жгута почти в два раза превышает прочность текстильно-армированных образцов и однонаправленных образцов, армированных лентой.

Согласно полученным результатам наиболее рациональным армированием является направленная укладка волокна в виде жгута; моделирование напряженного состояния адекватно отражает состояние реальной детали под нагрузкой.

Полученные результаты служат основанием для принятия окончательного решения в пользу формирования преформы направленной укладкой волокна (TFP) с размещением ровинга в виде жгута.

Далее исследовалась деталь типа «проушина» – наиболее нагруженная часть втулки рулевого винта вертолета, по сути, определяющая работоспособность втулки. В конструкции втулки проушина имеет

закрутку, что существенно усложняет ее изготовление. В связи с этим был рассмотрен конструктивно-подобный плоский вариант проушины (рис. 11).

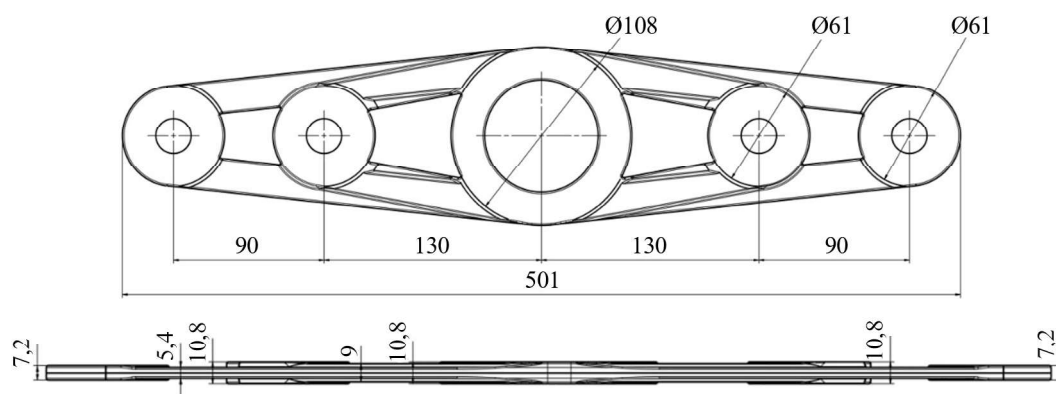


Рис. 11. Геометрия детали типа «проушина»

Исследование композитной углепластиковой проушины позволит определить влияние зон укладки, схемы армирования на напряженно-деформированное состояние и прочность конструкции. Методика расчета аналогична расчету образцов типа «серьга» и «ромб».

Оценка характеристик образцов осуществляется по следующим параметрам: 1) критическая нагрузка потери несущей способности; 2) распределение обратного коэффициента запаса прочности по слоям композитного материала по критерию Цая – Ву.

На рис. 12 показана картина распределения эквивалентных напряжений для проушины. Наиболее напряженными участками конструкции является отверстие справа от центра. Наименьшие напряжения имеет отверстие, расположенное по центру.

На рис. 13 показано распределение векторов главных напряжений. В значительной степени картина совпадает с картиной распределения векторов главных напряжений детали «серьга». В целом принятая схема армирования на изделии «серьга» адекватна полю напряжений, т. е. положение волокон близко к линиям ориентирования главных напряжений.

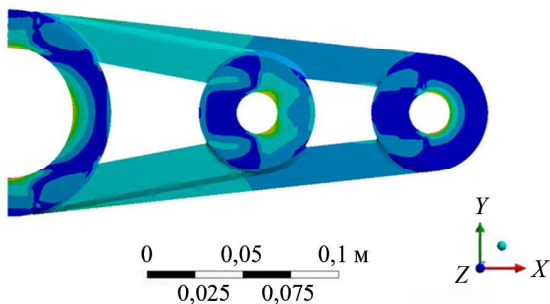


Рис. 12. Эквивалентные напряжения по Мизесу

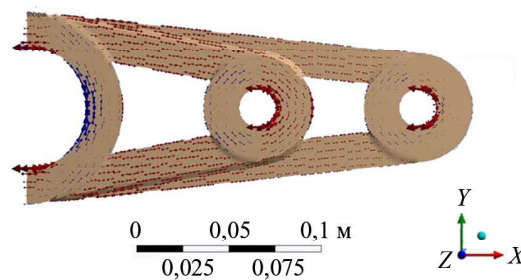


Рис. 13. Картина распределения векторов главных напряжений

Для определения количества слоев и корректировки схемы укладки проведены расчеты напряженно-деформированного состояния и прочности конструкции. Расчеты проводились согласно критериям, рассмотренным в первой серии экспериментов.

Результаты распределения обратного коэффициента критерия прочности по слоям образцов представлены на рис. 14.

Расчетная критическая нагрузка разрушения $F_{\text{крит}} = 183,3$ кН.

На основании полученных результатов была предложена рекомендация по армированию проушины. Армирующая преформа характеризуется несколькими характерными зонами укладки волокна (рис. 15):

- однонаправленная укладка с линейными участками и участками огибания малых и большого отверстий;

- однонаправленная укладка по нормали к малым и большому отверстиям, замыкающая преформы вокруг этих отверстий;
- спиральная укладка, усиливающая как большое, так и малые отверстия.

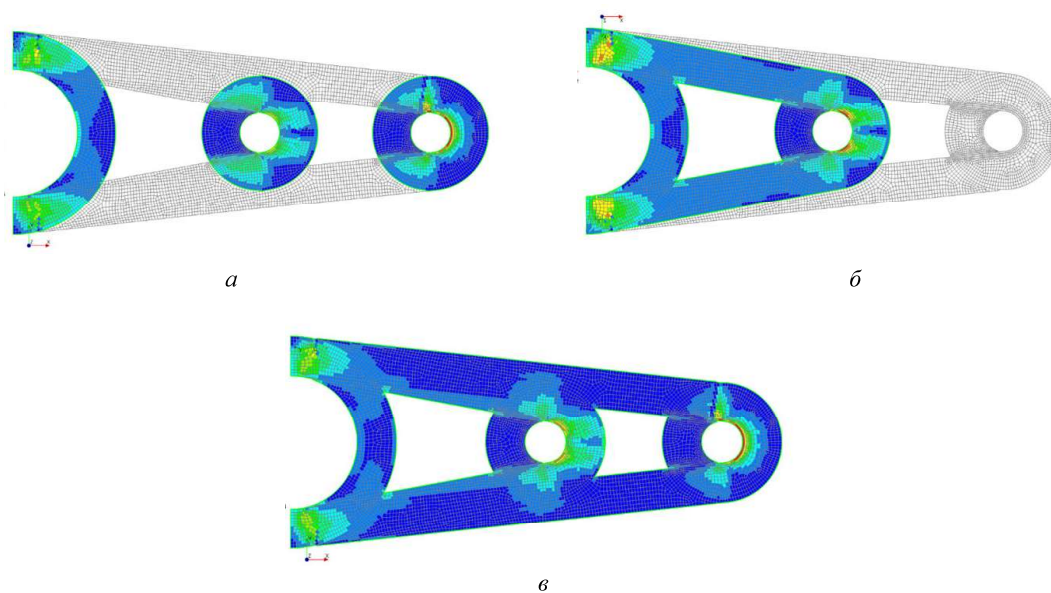


Рис. 14. Распределение обратного коэффициента критерия прочности по слоям:
a – внешний слой (только вокруг отверстий); *б* – срединный слой (внутреннее отверстие);
в – внутренний слой (внешнее отверстие)

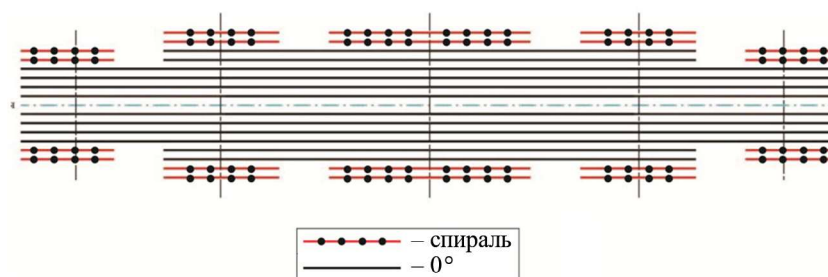


Рис. 15. Схема армирования по слоям детали «проушина»

После проведенных расчетов была изготовлена партия деталей типа «проушина» для проведения статических испытаний для определения критической нагрузки разрушения (рис. 16).

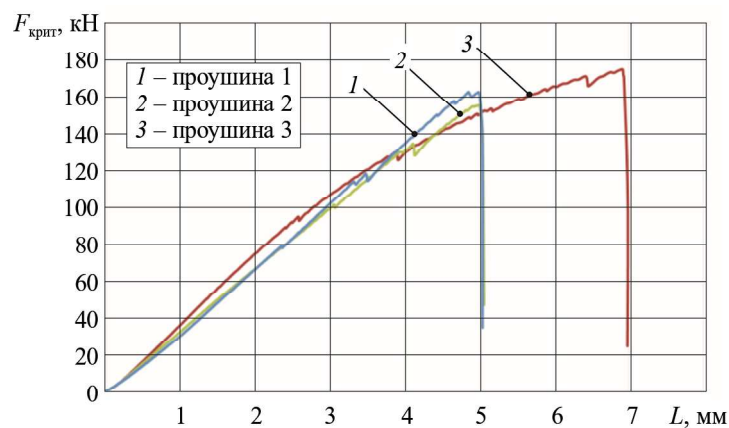


Рис. 16. Результаты испытаний

Согласно результатам эксперимента (рис. 17, *а*) разрушение деталей типа «проушина» происходит вследствие разрыва слоев и значительного межслоевого разрушения материала вокруг втулки в отверстиях. Это совпадает с данными предварительного расчета (рис. 17, *б*).

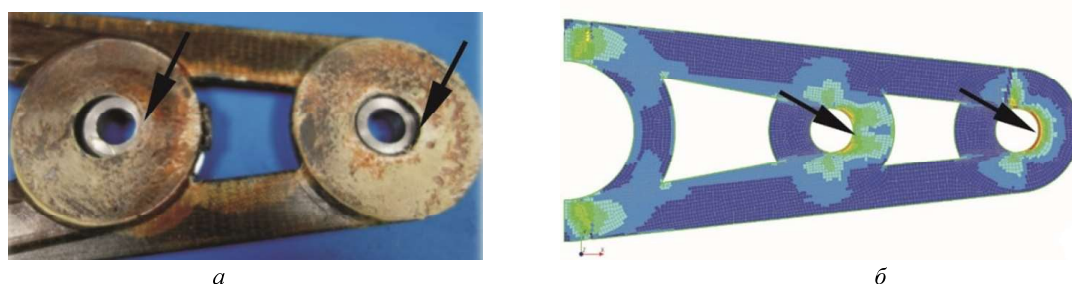


Рис. 17. Характер разрушения конструктивно-подобного элемента «проушина» (стрелками показаны зоны разрушения)

Результаты испытаний образцов показали хорошую сходимость с расчетными данными как по характеру разрушения, так и по значению разрушающих усилий, разница составляет менее 10 % от полученных результатов.

Таким образом, вторая серия экспериментов подтвердила правильность выбора метода направленной укладки волокна для создания преформы одноосно-нагруженных конструкций. Подготовка преформ методом TFP с укладкой ровинга в форме жгута позволяет обеспечить высокую удельную прочность конструкции, превышающую прочность аналогов. Сочетание методов TFP и RTM обеспечит повторяемость расчетных и экспериментальных данных как по геометрии, так и по механическим показателям.

Статья подготовлена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020–2025 гг. при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение от 17.05.2022 г. № 075-15-2022-1023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Халиулин В.И., Хилов П.А., Торонцова Д.М. О перспективах применения TFP-технологии при производстве авиационных композитных деталей // Изв. вузов. Авиационная техника. 2015. № 4. С. 127–132.
2. Халиулин В.И., Батраков В.В. Анализ применения инновационных методов для производства интегральных конструкций из композитов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. № 3. С. 129–133.
3. Дудченко А.А. и др. Расчет, проектирование и технология изготовления термостабильного композитного стержня // Конструкции из композиционных материалов. 2016. № 1. С. 3–11.
4. Халиулин В.И., Батраков В.В., Беззаметнова Д.М. Исследование стабильности геометрии преформы, изготавливаемой методом направленной укладки волокна // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2016. № 1. С. 72–78.
5. Людоговский П.Л., Наумов А.В., Ульянова Н.В. Интеграция современных методов и средств контроля в технологии производства изделий из композиционных материалов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2020. № 2. С. 147–150.
6. Ван Фо Фы Г.А. Конструкции из армированных пластмасс. Киев: Техніка, 1971. 220 с.
7. Константинов Д.Ю. и др. Влияние способа изготовления преформ на механические характеристики углепластика // Изв. вузов. Авиационная техника. 2021. № 1. С. 104–108.
8. Mattheij P., Glische K., Feltin D. Tailored Fiber Placement-Mechanical Properties and Applications // Journal of Reinforced Plastics and Composites. 1998. Vol. 17. Iss. 9. P. 774–786.
9. Glische K., Hubner T., Orawetz H. Application of the Tailored Fiber Placement (TFP) Process for a Local Reinforcement on an “Open-Hole” Tension Plate from Carbon/Epoxy Laminates // Composite Science and Technology. 2003. Vol. 63. Iss. 1. P. 81–88.
10. Mills A. et al. Resin Transfer Molding of Highly Loaded Carbon Fiber Composite Aircraft Spars Using Novel Fabrics and Tow Placement Techniques // SAMPE Journal. 2007. Vol. 43. № 3. P. 67–72.
11. Spickenheuer A. et al. Process-Dependent Material Properties for Structural Simulation of Composites Made by Tailored Fibre Placement [Electronical Resource]. URL: <https://www.escm.eu.org/eccm16/assets/03553.pdf> (дата обращения: 27.01.2024).

Поступила в редакцию 27.02.24

После доработки 6.03.24

Принята к публикации 6.03.24

Study of the Load-Bearing Capacity of Composite Structures with Various Reinforcement Patterns in the Zone of the Open Hole

D.YU. KONSTANTINOV, V.I. KHALIULIN, V.V. BATRAKOV, AND
R.YU. PETRUSHENKO

Tupolev Kazan National Research Technical University, Kazan

The paper describes the estimation of the load-bearing capacity of highly loaded composite structures made of preforms produced by various methods. Mechanical properties of structurally similar specimens were studied using simulated and experimental data. A technology for the production of uniaxially loaded composite structures is proposed.

Integral structures, reinforcement patterns, stresses in the zone of the open hole, tailored fiber placement, preform, composite material