

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2025-87-2-168-180

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОРТОТРОПНЫХ ПЛАСТИН С ПРЯМЫМИ И ЗЕНКОВАННЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

© 2025 г. Смагин Е.И.¹, Вестяк В.А.², Мартиросов М.И.²

¹Публичное акционерное общество «Яковлев», Москва, Российская Федерация

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

Smagin_ei@mail.ru

Поступила в редакцию 28.10.2024

Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований прочности ортотропных пластин, изготовленных из полимерного композиционного материала, со свободным и нагруженным отверстиями. Рассмотрены различные методы испытаний для образцов, моделирующие работу конструкции с проходящей и сминающей нагрузкой, а также методы, моделирующие совместное действие указанных выше нагрузок. Для различных методов испытаний представлены виды образцов, схемы нагружения. На образцах со свободным и нагруженным отверстиями проведены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния и остаточной прочности полимерного композиционного материала на основе эпоксидной матрицы и высокомодульного волокна. Представлены подходы оценки области несущей способности односрезного и двухсрезного соединений с учетом совместного воздействия смятия и проходящей нагрузки. Разработаны конечно-элементные модели и проведены расчеты на несущую способность ортотропных пластин с односрезным и двухсрезным соединениями. Представлены граничные условия моделирования численного эксперимента, описаны критерии прочности, применяемые в ходе конечно-элементных расчетов. Рассмотрены причины различного поведения и характера разрушения образцов, сделан послойный анализ прочности. Показаны преимущества исследования несущей способности пластин и соединений при комбинированном нагружении. Проведено сравнение экспериментальных результатов для различных схем армирования с учетом совместного действия смятия и проходящей нагрузки и без нее. Показано, что расчетные и экспериментальные результаты удовлетворительно согласуются между собой.

Ключевые слова: ортотропная пластина, статическая нагрузка, полоса с отверстием, полимерные композиционные материалы, смятие, проходящая нагрузка, испытания полимерных композиционных материалов, LS-DYNA, метод конечных элементов, критерии разрушения, напряженно-деформированное состояние.

Введение

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) получают широкое применение в силовых ответственных и несилowych элементах конструкции в различных отраслях

промышленности. ПКМ могут успешно применяться и замещать традиционно используемые металлы в конструкционных силовых элементах. Уникальное сочетание свойств ортотропных материалов, в частности ПКМ, способствует повышению прочности конструкции и повышению весовой эффективности [1, 2]. При проектировании следует учитывать факторы, препятствующие широкому внедрению ПКМ [3]. Для ПКМ на основе углеродных волокон характерно хрупкое разрушение, они особенно чувствительны к концентраторам напряжений в виде отверстий. В отраслях промышленности могут встречаться различные типы болтовых соединений ортотропных пластин с другими элементами конструкций [4–6]. Места нагруженных соединений, как правило, находятся в защищенных зонах, и визуально обнаружить последствия действия нагрузок высокой интенсивности не всегда возможно, что, в свою очередь, может привести к растрескиванию и расслоению используемого ПКМ, а также вызывает снижение местной и общей прочности всей конструкции. Использование результатов механических испытаний образцов для проектирования и моделирования ответственных соединений в конструкции далеко не всегда может полностью отражать характер работы соединения в конструкции. Для более эффективного проектирования мест соединения в различных конструкциях предлагается использовать расчетно-экспериментальный подход, описанный в настоящей статье.

1. Экспериментальные исследования

В различных отраслях промышленности могут встречаться в основном двухсрезные и односрезные соединения. Для оценки односрезного соединения лабораторные образцы должны отражать основные конструктивные особенности. К таким особенностям можно отнести схему армирования, толщину пластин в соединении, тип крепежа, наличие зенковки, момент затяжки.

С учетом особенностей соединения и теоретических закономерностей при растяжении ортотропной пластины напряжения распределяются симметрично относительно главных направлений упругости [7]. Для ортотропных пластин с одинаковыми геометрическими параметрами, но различными значениями модуля Юнга значения коэффициентов концентрации напряжений различаются.

Для экспериментальной оценки несущей способности в ортотропных пластинах с концентраторами [8, 9] в виде свободных отверстий и отверстиями с зенковкой проведены статические нагружения образцов с одинаковой схемой армирования в соответствии с существующими стандартами [10–17].

Исследование прочности образцов с прямым и зенкованным под 90° отверстием из ортотропного материала на основе эпоксидной матрицы и высокомодульного волокна с укладками монослоев из 50% слоев по направлению 0° , 37% слоев по направлению 45° , 13% слоев по направлению 90° (50/37/13) позволяет оценить изменение несущей способности от разных форм концентраторов напряжений. Так, при испытании образцов на наиболее чувствительный вид нагружения – сжатие – наблюдается снижение несущей способности до 0,86 относительно прямого отверстия (рис. 1). На рисунке представлено: *а*) образцы с прямым отверстием; *б*) образец на сжатие, установленный в испытательную машину; *в*) образцы с зенкованным под 90° отверстием; *г*) результаты испытания образцов. Эксперименты подтверждают чувствительность ортотропных пластин на основе эпоксидной матрицы и высокомодульного волокна к геометрическим концентраторам напряжений. При анализе изменения концентратора на отверстия с наличием зенковки под 90° и с глубиной

конуса 2,92 мм внутрь материала можно наблюдать незначительное изменение площади поперечного сечения до 0,96 относительно прямого отверстия.

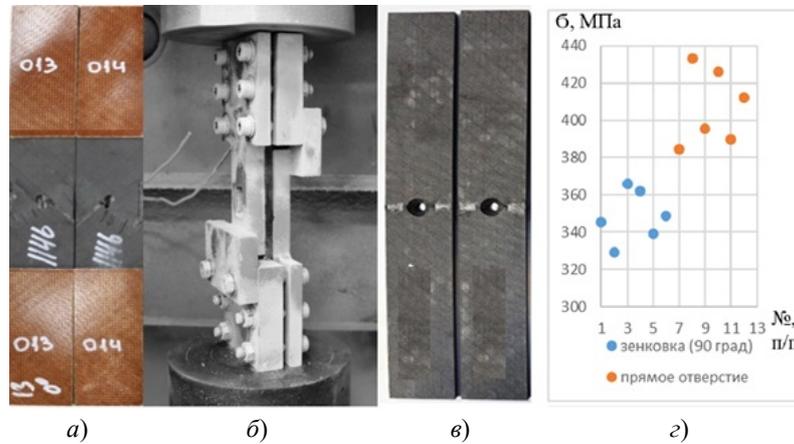


Рис. 1. Типовая мода разрушения образцов на растяжение и сжатие со свободным отверстием

Для экспериментальной оценки несущей способности, влияния плоскости среза и зенковки ортотропных пластин, изготовленных из ПКМ, проведены испытания на статическое нагружение в соответствии с [11,18] с использованием различных типов образцов с концентраторами в виде нагруженных отверстий.

Указанные методы дают возможность получить оценку механических характеристик материала и области их применений. Обработка результатов испытаний ПКМ на основе эпоксидной матрицы и высокомодульного волокна позволяет определить область несущей способности при совместном действии сминающей и проходящей нагрузок (рис. 2), что, в свою очередь, может служить консервативной оценкой соединения с ортотропной пластиной при заданных условиях смятия.

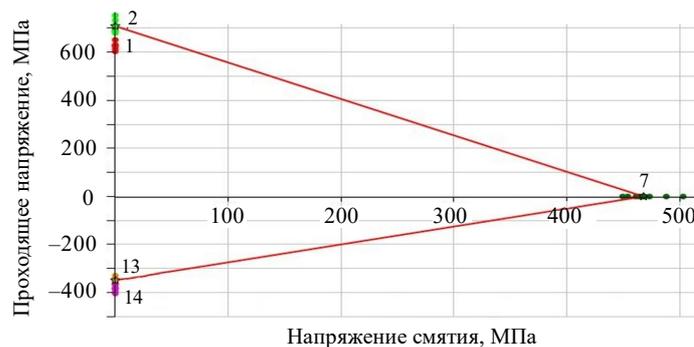


Рис. 2. Диаграмма при совместном действии сминающей и проходящей нагрузок для односрезного образца

Точки, указанные на рис. 2, – это множества точек с результатами эксперимента, они подписаны номерами и выделены цветом: красные – сжатие с незаполненным отверстием, т. 1; светло-зеленые – растяжение с заполненным отверстием, т. 2; темно-зеленые – смятие образца с одним отверстием, т. 7; желтые – сжатие с незаполненным отверстием, т. 13; розовые – сжатие с заполненным отверстием, т. 14; красные со

звездочкой – средняя кривая. Точки лежат на осях графика или внутри каждой области. Для построения графика, представленного на рис. 2, используются результаты испытаний по следующим стандартам: для т. 1 – ГОСТ Р 33375-2015 [16]; т. 2, 14 – ГОСТ Р 33377-2015; т. 7 – ГОСТ Р 33498-2015 [11]; т. 13 – ГОСТ Р 56788-2015 [14].

При оценке несущей способности конструктивных решений из ортотропного материала описанный выше подход может привести к избыточному усилению схемы армирования и весовых показателей. Для решения этой проблемы проводятся исследования, позволяющие существенно расширить область несущей способности соединений из ортотропного материала. Для экспериментальной оценки несущей способности в ортотропных пластинах с концентраторами в виде нагруженных отверстий проводятся испытания на статическое нагружение по стандарту, описанному в [19, 20]. Методы испытаний, представленные в [19], позволяют учитывать различные концентраторы напряжений в виде заполненных зенкованных, прямых отверстий, а также комбинации нагружения растяжения и сжатия.

Для учета влияния плоскости среза по ГОСТ Р 56790 [19, 20] предусмотрены различные схемы нагружения образца по методу А и методу Б. В образце реализуется сложное напряженное состояние, состоящее из растягивающих/сжимающих, а также сдвиговых напряжений в пластине и сминающего напряжения в отверстии. На рис. 3 представлена технологическая оснастка и образцы при действии комбинации сминающей и проходящей нагрузок, закрепленные в испытательной машине.

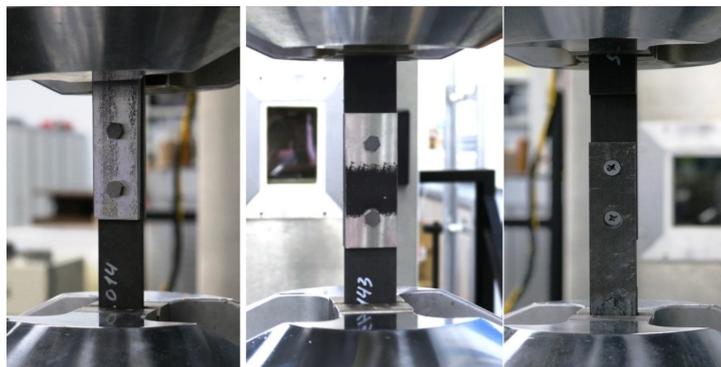


Рис. 3. Испытательная оснастка и образцы при действии комбинации сминающей и проходящей нагрузок, установленные в испытательную машину

Использование комплексного подхода по определению несущей способности полосы с отверстием, смятия и серии вариантов комбинации смятия и проходящей нагрузки позволяет получить иную область применения материала с учетом типа соединения в конструкции (рис. 4). Для построения графика, представленного на рис. 4, используются результаты испытаний по стандарту: для т. 1 – ГОСТ Р 33375-2015; т. 2, 14 – ГОСТ Р 33377-2015 [16]; т. 5, 16 – ГОСТ Р 56790-2015 [19]; т. 13 – ГОСТ Р 56788-2015 [14]. На рис. 4 выделено цветом: красные точки – растяжение с заполненным отверстием, т. 1; зеленые – растяжение с заполненным отверстием, т. 2; голубые – проходящее напряжение (метод Б), т. 5; желтые – сжатие с незаполненным отверстием, т. 13; светло-красные – проходящее напряжение сжатием (метод Б), т. 16; темно-зеленые – смятие образца с одним отверстием, т. 7; розовые – сжатие с заполненным отверстием, т. 14; красные со звездочкой – средняя кривая.

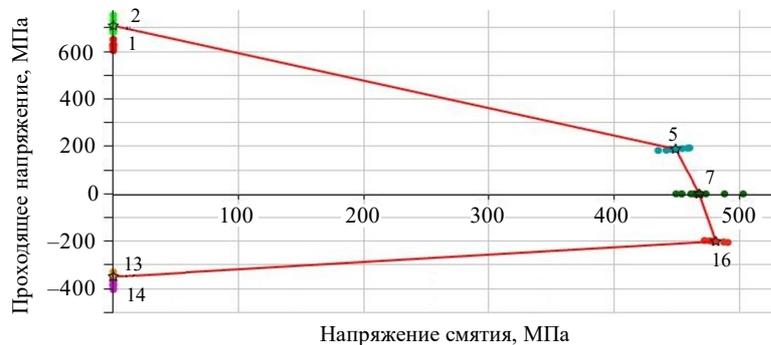


Рис. 4. Диаграмма при совместном действии сминающей и проходящей нагрузок с учетом типа соединения

2. Моделирование виртуального эксперимента

Для определения возможности аппроксимации полученных результатов для иных упаковок проведена серия расчетов с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Методика определения параметров материала основана на моделировании приведенных выше испытаний в программном комплексе LS-DYNA и сравнении результатов расчета с результатами испытаний [21]. Для моделирования ПКМ на основе эпоксидной матрицы и высокомодульного волокна используются восьмиузловые объемные конечные элементы первого порядка [7].

Базовые механические характеристики монослоя ПКМ были приняты согласно таблице 1.

Таблица 1

Механические характеристики монослоя ПКМ

E_1	E_2	E_{-1}	E_{-2}	G_{12}	ν_{12}	σ_1	σ_2	σ_{-1}	σ_{-2}	τ_{12}
158000	8010	146000	9170	4460	0,32	2725	60,1	1259	200	94

В таблице E_1, E_2, E_{-1}, E_{-2} – модули упругости монослоя при растяжении и сжатии в направлениях осей ортотропии; G_{12} – модуль упругости при сдвиге в плоскости монослоя; ν_{12} – коэффициент Пуассона; σ_1, σ_2 – пределы прочности монослоя при растяжении; σ_{-1}, σ_{-2} – пределы прочности монослоя при сжатии; τ_{12} – предел прочности при сдвиге в плоскости монослоя. Все значения с размерностью давления приведены в МПа.

Для исследования напряженно-деформированного состояния типовых соединений ортотропных пластин с механическими крепежными элементами создавались серии конечно-элементных моделей с различными схемами армирования.

При исследовании прочности односрезного соединения ортотропных пластин с титановым крепежным элементом, имеющим потайное крепление с углом 90° , были разработаны конечно-элементные модели. В месте соприкосновения ортотропных пластин и крепежного элемента задавались условия контакта. В разработанных конечно-элементных моделях пластины имеют различные схемы армирования с 13 до 50%-го содержания слоев вдоль направления 0° . Общий вид модели и граничные условия модели представлены на рис. 5.

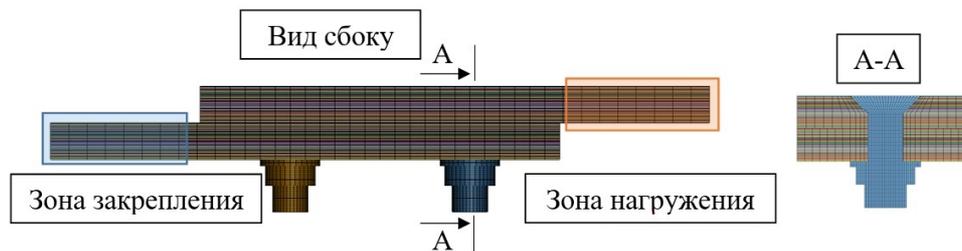


Рис. 5. Общий вид и граничные условия модели односрезного соединения с потайным крепежным элементом

При исследовании прочности двухсрезного соединения ортотропной и стальных пластин с выступающим крепежным элементом были разработаны конечно-элементные модели. В месте соприкосновения пластин и крепежных элементов задавались условия контакта. В разработанных конечно-элементных моделях пластины имеют различные схемы армирования с 9 до 36%-го содержания слоев вдоль направления 0° . Общий вид модели и граничные условия модели представлены на рис. 6.

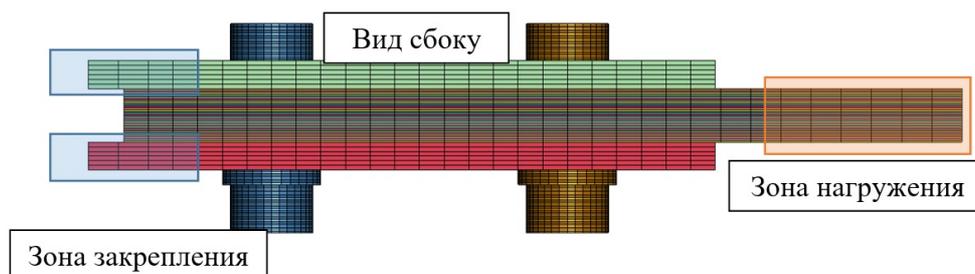


Рис. 6. Общий вид и граничные условия модели двухсрезного соединения

В расчетах используется модель материала ПКМ «MAT_221_ORTHOTROPIC_SIMPLIFIED_DAMAGE» [22], основанная на критерии разрушения максимальных деформаций [23, 24]. Согласно используемому критерию, разрушение наступает, когда одна из компонент деформации, отнесенная к осям ортотропии, достигает предельного значения, определяемого из испытаний на одноосное нагружение и чистый сдвиг:

$$\varepsilon_1 = e_1^\alpha, \quad \varepsilon_2 = e_2^\alpha, \quad \varepsilon_3 = e_3^\alpha, \quad \gamma_{12} = e_4, \quad \gamma_{23} = e_5, \quad \gamma_{31} = e_6, \quad (1)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – деформации в направлениях осей ортотропии; $\gamma_{12}, \gamma_{23}, \gamma_{31}$ – деформации сдвига в плоскостях ортотропии; $e_1^\alpha, e_2^\alpha, e_3^\alpha, e_4, e_5, e_6$ – предельные деформации монослоя; $\alpha = \pm$ (плюс соответствует растяжению, минус – сжатию); индексы означают соответствующие направления.

По результатам расчета [25, 26] были определены слои, получившие повреждения в результате достижения предельного значения согласно критерию разрушения и значению нагрузки, при которой фиксируется потеря несущей способности образца.

В модели материала MAT_221 предполагается, что зависимость напряжений от деформаций в ортотропном слоистом ПКМ имеет три участка: зона упругого поведения, зона повреждения, зона разрушения.

По полученным результатам расчета модели с односрезным соединением наглядно наблюдается совместное действие растягивающих и изгибающих усилий в центральной части. В связи с установкой потайного крепежа наблюдается высокая степень подмятия зонкованной области ортотропной пластины, которая, в свою очередь, провоцирует потерю несущей способности образца. В случае с моделью двухсрезного соединения наблюдается равномерное нагружение модели с выраженной сдвиговой модой разрушения (рис. 7).

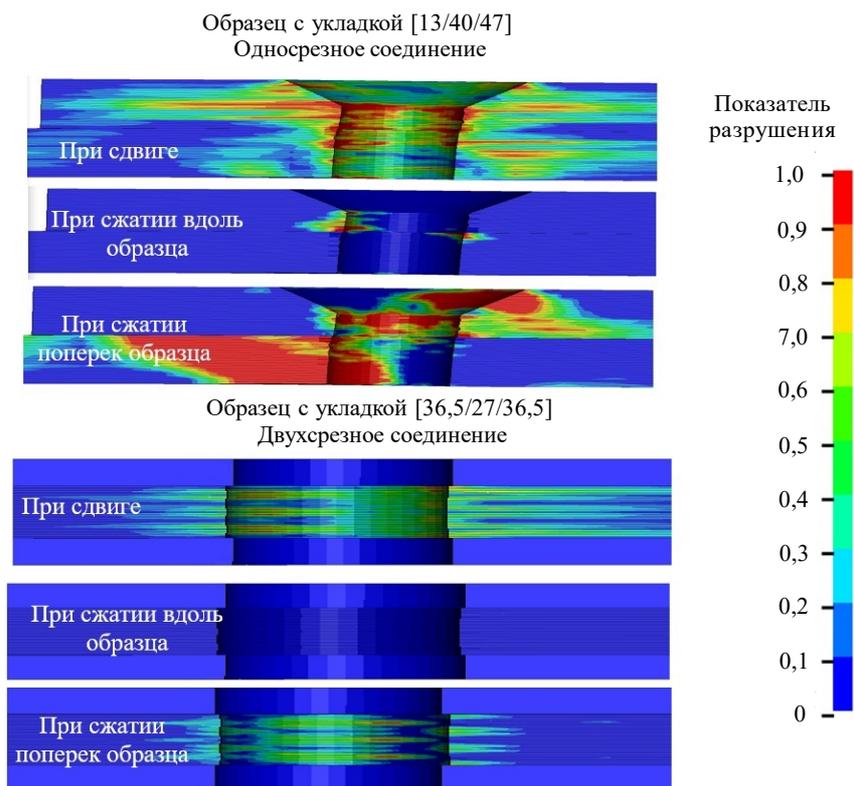


Рис. 7. Повреждение монослоев в образце в ослабленном сечении

Для различных схем армирования ортотропных пластин характерны различные формы разрушения. Так, для образца односрезного соединения с укладкой монослоев из 13,3% слоев по направлению 0° , 40% слоев по направлению 45° , 46,7% слоев по направлению 90° (13,3/40/46,7) явно наблюдается мало поврежденных вдоль 0° слоев и много поврежденных слоев от сдвигающих деформаций [27–29]. Такая мода проявляется в разной степени в зависимости от укладки образца [30]. При анализе показателей критерия разрушения в образце двухсрезного соединения наблюдается высокая чувствительность от схемы армирования: для модели с укладкой монослоев из 9% слоев по направлению 0° , 73% слоев по направлению 45° , 18% слоев по направлению 90° (9/73/18), то есть состоящей из большого количества слоев с ориентацией 45° , видны множественные повреждения слоев от сдвигающих и сжимающих деформаций (таблица 2).

Таблица 2

Показатели повреждения слоев в ортотропных пластинах

Разрушение слоев			
0°-45°-90°, %	При сдвиге	При сжатии вдоль образца	При сжатии поперек образца
Односрезное соединение			
50/37/13			
20/60/20			
13,3/40/46,7			
Двухсрезное соединение			
9/73/18			
36,5/27/36,5			
18/73/9			

Заключение

Анализ расчетно-экспериментальных результатов показывает, что ортотропные пластины подвержены сильному влиянию геометрических концентраторов и типа соединения. При проектировании элементов конструкций из ортотропного материала целесообразно использовать комплексный подход по определению несущей способности. Расчет показал, что введение потайного крепежа в односрезном соединении снижает несущую способность до 0,86 относительно прямого отверстия и не может быть учтено путем пропорционального пересчета на уменьшенную площадь сечения.

Рассмотренный подход на примере изучаемого ортотропного материала на основе эпоксидной матрицы и высокомодульного волокна позволяет значительно увеличить площадь области несущей способности. Учет особенностей типа соединения при проектировании стыков наглядно показывает сужение области несущей способности (рис. 8).

Принятый подход при расчете несущей способности образцов показал, что моделирование эксперимента дает приемлемый уровень погрешности (около 15%), может быть использован при проведении дальнейшей работы по оценке совместного

влияния смятия и проходящей нагрузки на несущую способность соединения (рис. 9) и для прогнозирования несущей способности соединения ортотропных пластин различными способами.

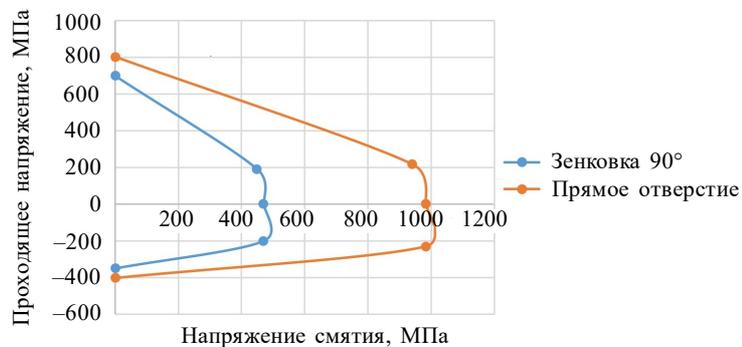


Рис. 8. Область расширения несущей способности соединения на основе экспериментальных результатов

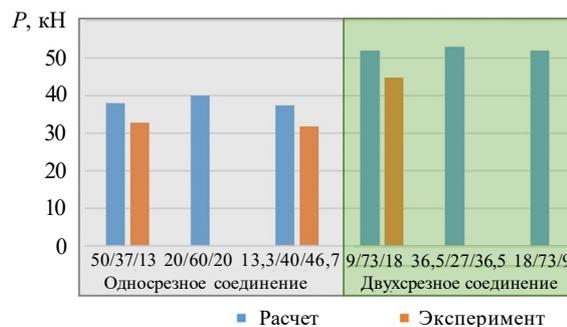


Рис. 9. Сравнение результатов испытаний и численного эксперимента

Список литературы

1. Чернышев С.Л. и др. *Форсайт развития авиационной науки и технологий до 2030 года и на дальнейшую перспективу*. М.: ЦАГИ, 2014. 280 с.
2. Васильев В.В. *Механика конструкций из композиционных материалов*. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
3. *Composite Material Handbook. Vol. 3. Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, and Analysis*. SAE International. 2002. 900 p.
4. Глебова М.А., Гришин В.И., Гусева Н.В. Исследования видов разрушения болтовых соединений слоистых композитов. *Ученые записки ЦАГИ*. 2022. Т. 53. №1. С. 66–74.
5. Глебова М.А., Гришин В.И., Гусева Н.В., Яшутин А.Г. Оценка прочности многорядных металлокомпозитных соединений авиационных конструкций. *Ученые записки ЦАГИ*. 2020. Т. 51. №2. С. 57–67.
6. Ампилогов А.Ю., Дряницын Д.В., Петунина И.Н., Смагин Е.И., Наумов С.М. Исследование деформированного состояния зоны ремонта панели из полимерного композиционного материала. *Труды ЦАГИ*. 2018 Т. 2782. С. 143–144.
7. Лехницкий С.Г. *Теория упругости анизотропного тела*. М.: Наука, 1977. 417 с.
8. Вардамян Г.С., Андреев В.И., Атаров Н.М., Горшков А.А. *Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности*. М.: АСВ, 1995. 568 с.
9. Tan S.C., Kim R.Y. Strain and stress concentrations in composite laminates containing a hole. *Experimental Mechanics*. 1990. Vol. 30. Iss. 4. P. 345–351. <https://doi.org/10.1007/BF02321502>.

10. Collings T.A. On the bearing strengths of CFRP laminates. *Composites*. 1982. Vol. 13. Iss. 3. P. 241–252. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(82\)90006-4](https://doi.org/10.1016/0010-4361(82)90006-4).
11. *ГОСТ 33498-2015. Метод испытания на смятие*. М.: Стандартинформ, 2016. 20 с.
12. *ASTM D5961 /D5961M-23 Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates*. ASTM International, 2010. 26 p.
13. Xiao Y., Ishikawa T. Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (Part I: Experimental investigation). *Composites Science and Technology*. 2005. Vol. 65. Iss. 7-8. P. 1022–1031. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.02.011>.
14. *ГОСТ Р 56788-2015. Метод определения прочности при сжатии образцов ламинатов с открытым отверстием*. М.: Стандартинформ, 2019. 23 с.
15. *ASTM D 6484 Standard Test Method for Open-Hole Compressive Strength of Polymer Matrix Composite Laminates*. ASTM International, 2004. 11 p.
16. *ГОСТ 33375-2015. Метод испытания на растяжение образцов с открытым отверстием*. М.: Стандартинформ, 2017. 11 с.
17. *ASTM D 5766 Standard Test Method for Open Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates*. ASTM International, 2007. 4 p.
18. *ASTM D6742/D6742M-12 Standard Practice for Filled-Hole Tension and Compression Testing of Polymer Matrix Composite Laminates*. ASTM International, 2012. 4 p.
19. *ГОСТ Р 56790-2015. Метод определения прочности на смятие и трансферной прочности ламинатов, соединенных двумя болтами*. М.: Стандартинформ, 2016. 35 с.
20. *ASTM D7248/D7248M-12. Standard Test Method for Bearing/Bypass Interaction Response of Polymer Matrix Composite Laminates Using 2-Fastener Specimens*. ASTM International, 2012. 11 p.
21. Абашев О.В., Смагин Е.И., Яштугин А.Г. Определение сдвиговых характеристик полимерных композиционных материалов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2023. Т. 89. №12. С. 74–80. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-12-74-80>.
22. *LS-DYNA Keywords User's Manual. Vol. I*. Livermore Software Technology Corp., 2016. 2682 p.
23. *LS-DYNA Keywords User's Manual. Vol. II*. Livermore Software Technology Corp., 2016. 1479 p.
24. Deliou A., Bouchouicha B. Mechanical behavior of unidirectional composites according different failure criteria. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2022. Vol. 16. Iss. 60. P. 30–42. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.60.03>.
25. Nguyen-Hoang M., Becker W. Tension failure assessment of composite bolted joints under bearing bypass load interaction using analytical means. *Journal of Composite Materials*. 2023. Vol. 8. P. 1459–1475. DOI: 10.1177/00219983221146847.
26. Camanho P.P., Lambert M. A design methodology for mechanically fastened joints in laminated composite materials. *Composites Science and Technology*. 2006. Vol. 66. Iss. 15. P. 3004–3020. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.02.017>.
27. Nguyen-Hoang M., Becker W. *Closed-form stress solution for finite dimensions orthotropic composite laminate open holes FL 33 100-36. Technical Handbook*. LTH Composite Design Criteria (FL), 2021.
28. Nguyen-Hoang M., Becker W. Open holes in composite laminates with finite dimensions: structural assessment by analytical methods. *Archive of Applied Mechanics*. 2022. Vol. 92. Iss. 3. P. 1101–1125. <https://doi.org/10.1007/s00419-021-02095-w>.
29. Zhang D., Zhou J., Wang J. A comparative study on failure mechanisms of open-hole and filled-hole composite laminates: Experiment and numerical simulation. *Thin-Walled Structures*. 2024. Vol. 198. Article No 111730. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111730>.
30. Кирюшина В.В., Ковалева Ю.Ю., Степанов П.А., Коваленко П.В. Исследование влияния масштабного фактора на прочностные свойства полимерных композиционных материалов. *Изв. вузов. Ядерная энергетика*. 2019. №1. С. 97–106. <https://doi.org/10.26583/pre.2019.1.09>.

References

1. Chemshev S.L. et al. *Forsayt razvitiya aviatsionnoy nauki i tekhnologiy do 2030 goda i na dalneyshuyu perspektivu [Foresight for the Development of Aviation Science and Technology until 2030 and Beyond]*. Moscow. TsAGI Publ. 2014. 280 p. (In Russian).
2. Vasiliev V.V. *Mekhanika konstruksiy iz kompozitsionnykh materialov [Mechanics of Structures Made of Composite Materials]*. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1988. 272 p. (In Russian).
3. *Composite Material Handbook. Vol. 3. Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, and Analysis*. SAE International. 2002. 900 p.
4. Glebova M.A., Grishin V.I., Guseva N.V. Issledovaniya vidov razrusheniya boltovykh soedineniy sloistykh kompozitov [Investigation of fracture types of laminate bolted joints]. *Uchenye zapiski TsAGI [TsAGI Science Journal]*. 2022. Vol. 53. No 1. P. 66–74 (In Russian).
5. Glebova M.A., Grishin V.I., Guseva N.V., Jashutin A.G. Otsenka prochnosti mnogoradnykh metallokompozitnykh soedineniy aviatsionnykh konstruksiy [Strength estimation of metalcomposite multiple-row joints of aviation structures]. *Uchenye zapiski TsAGI [TsAGI Science Journal]*. 2020. Vol. 51. No 2. P. 57–67 (In Russian).
6. Ampilogov A.Yu., Dryanitsyn D.V., Petunina I.N., Smagin E.I., Naumov S.M. Issledovanie deformirovannogo sostoyaniya zony remonta paneli iz polimernogo kompozitsionnogo materiala [Study of the deformed state of the repair zone of a panel made of polymer composite material]. *Trudy TsAGI [Proceedings of TsAGI]*. 2018. Vol. 2782. P. 143–144 (In Russian).
7. Lekhnitskiy S.G. *Teoriya uprugosti anizotropnogo tela [Theory of Elasticity of an Anisotropic Body]*. Moscow. Nauka Publ. 1977. 417 p. (In Russian).
8. Vardanyan G.S., Andreev V.I., Atarov N.M., Gorshkov A.A. *Soprotivlenie materialov s osnovami teorii uprugosti i plastichnosti [Strength of Materials with the Fundamentals of the Theory of Elasticity and Plasticity]*. Moscow. ASV Publ. 1995. 568 p. (In Russian).
9. Tan S.C., Kim R.Y. Strain and stress concentrations in composite laminates containing a hole. *Exp. Mech.* 1990. Vol. 30. Iss. 4. P. 345–351. <https://doi.org/10.1007/BF02321502>.
10. Collings T.A. On the bearing strengths of CFRP laminates. *Composites*. 1982. Vol. 13. Iss. 3. P. 241–252. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(82\)90006-4](https://doi.org/10.1016/0010-4361(82)90006-4).
11. *GOST 33498-2015. Metod ispytaniya na smyatie [GOST 33498-2015. Test Method for Collapse]*. Moscow. Standartinform. 2016. 20 p. (In Russian).
12. *ASTM D5961 /D5961M-23 Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates*. ASTM International. 2010. 26 p.
13. Xiao Y., Ishikawa T. Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints (part I: Experimental investigation). *Compos. Sci. Technol.* 2005. Vol. 65. Iss. 7-8. P. 1022–1031. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.02.011>.
14. *GOST R 56788-2015. Metod opredeleniya prochnosti pri szhatii obraztsov laminatov s otkrytym otverstiem [GOST R 56788-2015. Test Method Open-Hole Compressive Strength of Polymer Matrix Composite Laminates]*. Moscow. Standartinform. 2019. 23 p. (In Russian).
15. *ASTM D 6484 Standard Test Method for Open-Hole Compressive Strength of Polymer Matrix Composite Laminates*. ASTM International. 2004. 11 p.
16. *GOST 33375-2015. Metod ispytaniya na rastyazhenie obraztsov s otkrytym otverstiem [GOST 33375-2015. Test Method for Open-Hole Tension Testing of Specimens]*. Moscow. Standartinform. 2017. 11 p. (In Russian).
17. *ASTM D 5766 Standard Test Method for Open Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates*. ASTM International. 2007. 4 p.
18. *ASTM D6742/D6742M-12 Standard Practice for Filled-Hole Tension and Compression Testing of Polymer Matrix Composite Laminates*. ASTM International. 2012. 4 p.
19. *GOST R 56790-2015. Metod opredeleniya prochnosti na smyatie i transfernoy prochnosti laminatov, soedinennykh dvumya boltami [Method for Determination of Bearing Strength and Bypass Strength of Laminates Connected to One Another by Two Bolts]*. Moscow. Standartinform. 2016. 35 p. (In Russian).
20. *ASTM D7248/D7248M-12. Standard Test Method for Bearing/Bypass Interaction Response of Polymer Matrix Composite Laminates Using 2-Fastener Specimens*. ASTM International. 2012. 11 p.

21. Abashev O.V., Smagin E.I., Yashutin A.G. Opredelenie sdvigovykh kharakteristik polimernykh kompozitsionnykh materialov [Determination of the shear characteristics of polymer composite materials]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials]*. 2023. Vol. 89. No 12. P. 74–80 (In Russian).
22. *LS-DYNA Keywords User's Manual. Vol. I*. Livermore Software Technology corp. 2016. 2682 p.
23. *LS-DYNA Keywords User's Manual. Vol. II*. Livermore Software Technology corp. 2016. 1479 p.
24. Deliou A., Bouchouicha B. Mechanical behavior of unidirectional composites according different failure criteria. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2022. Vol. 16. Iss. 60. P. 30–42. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.60.03>.
25. Nguyen-Hoang M., Becker W. Tension failure assessment of composite bolted joints under bearing bypass load interaction using analytical means. *Journal of Composite Materials*. 2023. Vol. 8. P. 1459–1475. DOI: 10.1177/00219983221146847.
26. Camanho P.P., Lambert M. A design methodology for mechanically fastened joints in laminated composite materials. *Compos. Sci. Technol.* 2006. Vol. 66. Iss. 15. P. 3004–3020. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.02.017>.
27. Nguyen-Hoang M., Becker W. *Closed-form stress solution for finite dimensions orthotropic composite laminate open holes FL 33 100-36. Technical Handbook*. LTH Composite Design Criteria (FL). 2021.
28. Nguyen-Hoang M., Becker W. Open holes in composite laminates with finite dimensions: structural assessment by analytical methods. *Archive of Applied Mechanics*. 2022. Vol. 92. Iss. 3. P. 1101–1125. <https://doi.org/10.1007/s00419-021-02095-w>.
29. Zhang D., Zhou J., Wang J. A comparative study on failure mechanisms of open-hole and filled-hole composite laminates: Experiment and numerical simulation. *Thin-Walled Structures*. 2024. Vol. 198. Article No 111730. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.111730>.
30. Kiryushina V.V., Kovaleva Yu.Yu., Stepanov P.A., Kovalenko P.V. Issledovanie vliyaniya masshtabnogo faktora na prochnostnye svoystva polimernykh kompozitsionnykh materialov [A study into the scaling factor effects on the strength properties of polymer composite materials]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2019. No 1. P. 97–106 (In Russian).

STRENGTH OF ORTHOTROPIC PLATES WITH STRAIGHT AND COUNTERSUNK HOLES

Smagin E.I.¹, Vestyak V.A.², Martirosov M.I.²

¹Public Joint Stock Company Yakovlev, Moscow, Russian Federation

²Moscow Aviation Institute, MAI, Moscow, Russian Federation

Smagin_ei@mail.ru

Received by the Editor 2024/10/28

The paper presents the results of computational and experimental studies of the strength of orthotropic plates with free and loaded holes. Various test methods are considered for samples simulating the operation of a structure with a passing and crushing load, as well as samples simulating the combined action of the above loads. Types of samples and loading schemes are presented for various test methods. Experimental studies of the stress-strain state and residual strength of polymer composite materials based on an epoxy matrix and high-modulus fiber have been carried out on samples with free and loaded holes. Approaches are presented to assess the bearing capacity of a single-cut and double-cut joint, taking into account the combined effects of crumpling and passing loads. Finite element models have been developed and calculations for the bearing capacity from single-cut and double-cut joints of orthotropic plates have been carried out. The boundary conditions for modeling a numerical experiment are

presented, and the strength criteria used in the course of finite element calculations are described. During the analysis, the reasons for the different behavior and nature of the destruction of samples were considered, and a layered strength analysis was presented. The advantages of studying the bearing capacity of plates and joints under combined loading are shown. Experimental data for various reinforcement schemes are compared, taking into account the combined effect of crumpling and passing load and without it. It is shown that the calculated and experimental results are in satisfactory agreement with each other.

Keywords: orthotropic plate, static load, strip with a hole, polymer composite materials, crushing, passing load, testing of polymer composite materials, LS-DYNA, FEM, failure criteria, stress-strain state.