

Научная статья

УДК 539.3

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186879>

EDN: <https://www.elibrary.ru/WFNZAH>

ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОРТОТРОПНЫХ ПЛАСТИН СО СВОБОДНЫМИ И НАГРУЖЕННЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

В.А. Вестяк¹, М.И. Мартиросов¹, Е.И. Смагин²✉

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия ²ПАО

«Яковлев», г. Москва, Россия ✉

smagin_ei@mail.ru

Цитирование: Вестяк В.А., Мартиросов М.И., Смагин Е.И. Оценка несущей способности ортотропных пластин со свободными и нагруженными отверстиями // Труды МАИ. 2025. № 145. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186879>

Аннотация. Интенсивное внедрение ортотропных материалов в различных областях промышленности показывает большой потенциал полимерных композиционных материалов (ПКМ) по показателям прочности и весовой эффективности. В работе представлены результаты расчетноэкспериментальных исследований прочности ортотропных пластин со свободным и нагруженным отверстиями. Рассмотрены различные методы испытаний для образцов, моделирующих работу конструкции с проходящей и сминающей нагрузкой, а также образцы, 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 напряженнодеформированного состояния (НДС) и остаточной прочности ПКМ на основе эпоксидной матрицы и высокомодульного углеродного волокна. Показаны особенности исследования несущей способности пластин и соединений при комбинированном нагружении. Проведено сравнение экспериментальных данных для различных схем армирования с учетом совместного действия смятия и проходящей нагрузки и без неё. Показано, что расчетные и экспериментальные результаты удовлетворительно согласуются между собой.

Ключевые слова: полоса с отверстием, полимерные композиционные материалы, смятие, проходящая нагрузка, испытания, критерии разрушения ПКМ, напряженно-деформированное состояние, программный комплекс LS-DYNA

STRENGTH OF ORTHOTROPIC PLATES WITH FREE AND LOADED HOLES

V.A. Vestyak¹, M.I. Martirosov¹, E.I. Smagin²✉

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

²PJCS «Yakovlev», Moscow, Russia ✉

smagin_ei@mail.ru

Citation: Vestyak V.A., Martirosov M.I., Smagin E.I. Strength of orthotropic plates with free and loaded holes // Trudy MAI. 2025. No. 145. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=186879>

Abstract. The intensive introduction of orthotropic materials in various fields of industry shows the great potential of polymer composite materials (PCMs) in terms of strength and weight efficiency. The use of PCM is accompanied by studies of the properties of the material and structure at the joints. 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 passing and bearing loads, as well as samples simulating the combined action of the

above loads. For various test methods, types of samples and loading schemes are presented. Experimental studies of the stress-strain state and residual strength of PCM based on an epoxy matrix and high-modulus fiber were carried out on samples with free and loaded holes. Approaches are presented for assessing the area of the load-bearing capacity of a double-shear connection, taking into account the combined effect of crushing and passing loads. Finite element models were developed and calculations were carried out for the load-bearing capacity of an orthotropic plate with a hole. The boundary conditions for modeling a numerical experiment are presented, and the strength criteria used in finite element calculations are described. During the analysis, the reasons for the different behavior and nature of destruction of the samples were considered, and a layer-by-layer analysis of strength was presented. The advantages of studying the bearing capacity of plates and joints under combined loading are shown. A comparison was made of experimental data for various reinforcement schemes, taking into account the combined action of crushing and passing load and without it. It is shown that the calculated and experimental results are in satisfactory agreement with each other.

Keywords: strip with a hole, polymer composite materials (PCMs), crushing, transmitted load, tests, failure criteria for PCMs, stress-strain state, LS-DYNA software package.

Введение

В настоящее время происходит интенсивное внедрение ПКМ в силовые ответственные и не силовые элементы конструкции в различных областях промышленности, что способствует, в том числе, повышению весовой эффективности разрабатываемых конструкций [1]. Однако помимо положительного эффекта, при проектировании следует учитывать ещё и негативные факторы, сопровождающие широкое внедрение ПКМ [2]. Одним из таких факторов являются концентраторы напряжений в виде отверстий и места соединений элементов конструкций, например, в виде ортотропных пластин с другими элементами [3-6]. Места нагруженных соединений, как правило, находятся в защищённых 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. Ошибки при проектировании мест соединений конструктивных элементов из ПКМ между собой и элементами из других материалов могут привести к увеличению веса и к практическим проблемам в обслуживании таких мест соединений.

Экспериментальные исследования

Для оценки прочности ортотропных пластин с концентраторами напряжений в виде нагруженного и свободного отверстий в настоящее время применяют различные расчётно-экспериментальные методы.

Например, в работе [7] приводится решение задачи Кирша: рассматривается растяжение изотропной полосы в виде пластины прямоугольной формы со свободным (незаполненным) круговым отверстием. Согласно полученному теоретическому результату на кромке отверстия создаётся концентрация напряжений в 3 раза большая, чем в регулярной части пластины. Данная задача представлена на рисунке 1.

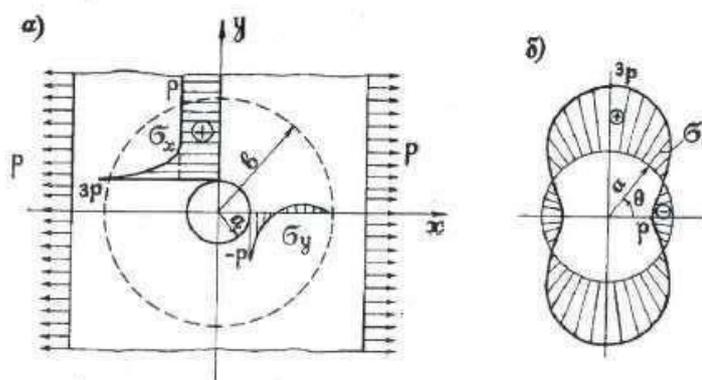
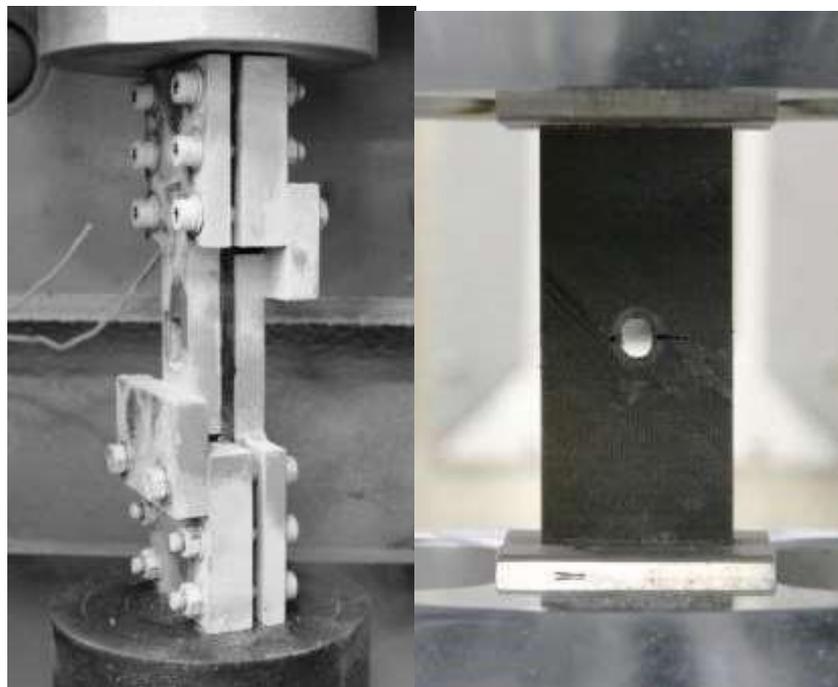


Рисунок 1 – а) теоретическое распределение напряжений в пластине с отверстием, б) теоретическое распределение напряжений на кромке отверстия

Для экспериментальной оценки несущей способности в ортотропных пластинах с концентраторами [8] в виде свободных отверстий проводят испытания на статическое нагружение в соответствии с существующими стандартами [9,10], представленными в ГОСТ Р 56788-2015 и ГОСТ 33375-2015 (рисунок 2).



а)

б)

Рисунок 2 - Образец на сжатие а) и растяжение б) со свободным отверстием, установленный в испытательную машину

Для экспериментальной оценки несущей способности в ортотропных пластинах (выполненных, в том числе, из ПКМ) с концентраторами в виде нагруженных отверстий проводят испытания на статическое нагружение по стандарту, описанному в ГОСТ 33498-2015 [11] (рисунок 3).



а)

б)

Рисунок 3 – Двухсрезная испытательная оснастка а) и образец на смятие б), установленный в испытательную машину

Указанные методы позволяют получить оценку механических характеристик материала и области их применений. Обработка результатов испытаний ПКМ на основе эпоксидной матрицы и высокомодульного углеродного волокна позволяет определить область несущей способности при совместном действии сминающей и проходящей нагрузки (рисунок 4), что в свою очередь может служить консервативной оценкой соединения с ортотропной пластиной при заданных условиях смятия.

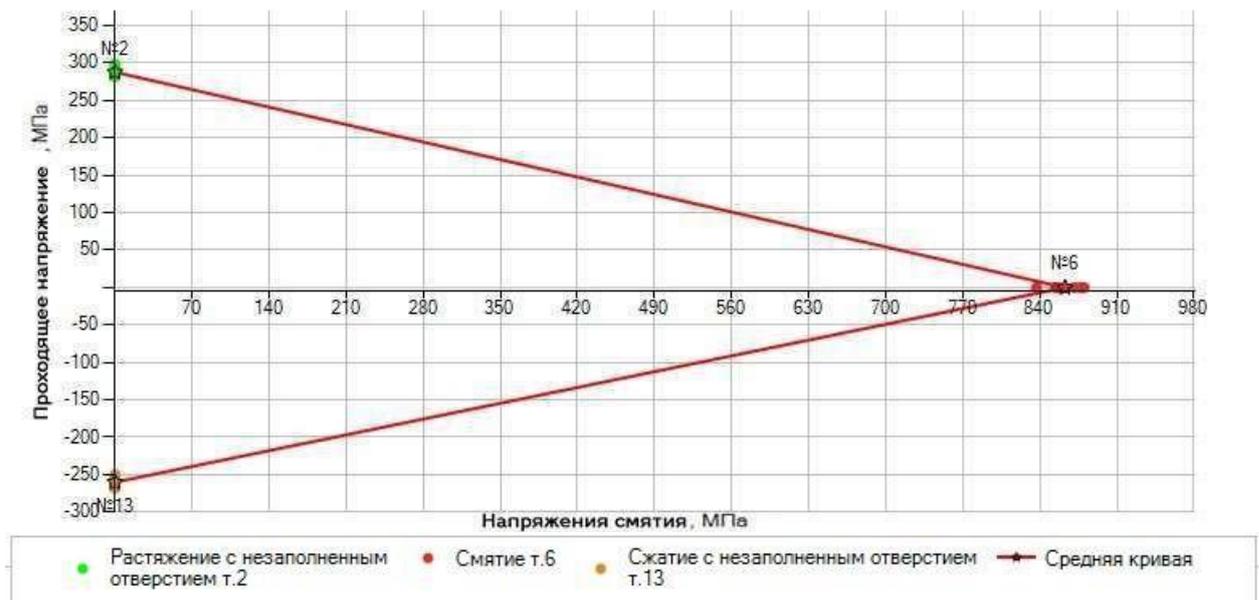


Рисунок 4 - Диаграмма при совместном действии сминающей и проходящей нагрузки

При оценке несущей способности конструктивных решений из ортотропного материала описанный выше подход может привести к избыточному усилению схемы армирования и весовых показателей. Для решения данной проблемы проводят исследования, позволяющие существенно расширить область несущей способности соединений из ортотропного материала.

Для экспериментальной оценки несущей способности ортотропных пластин с концентраторами в виде нагруженных отверстий проводят испытания на статическое нагружение по стандарту, описанному в ГОСТ Р 56790-2015 [12]. Метод позволяет учесть различные способы нагружения двухсрезного соединения, а именно включение в конструкцию образцов двух болтовых соединений, что позволяет получить несущую способность при проходящей и сминающей нагрузке.

В ходе экспериментальных исследований двухсрезного соединения используется схема, соответствующая методу А и методу В по ГОСТ Р 56790-2015. В пластине реализуется сложное напряженное состояние, состоящее из растягивающих/сжимающих напряжений в пластине и сминающего напряжения в отверстии. Схема нагружения и общий вид образцов в сборе представлен на рисунке 5.

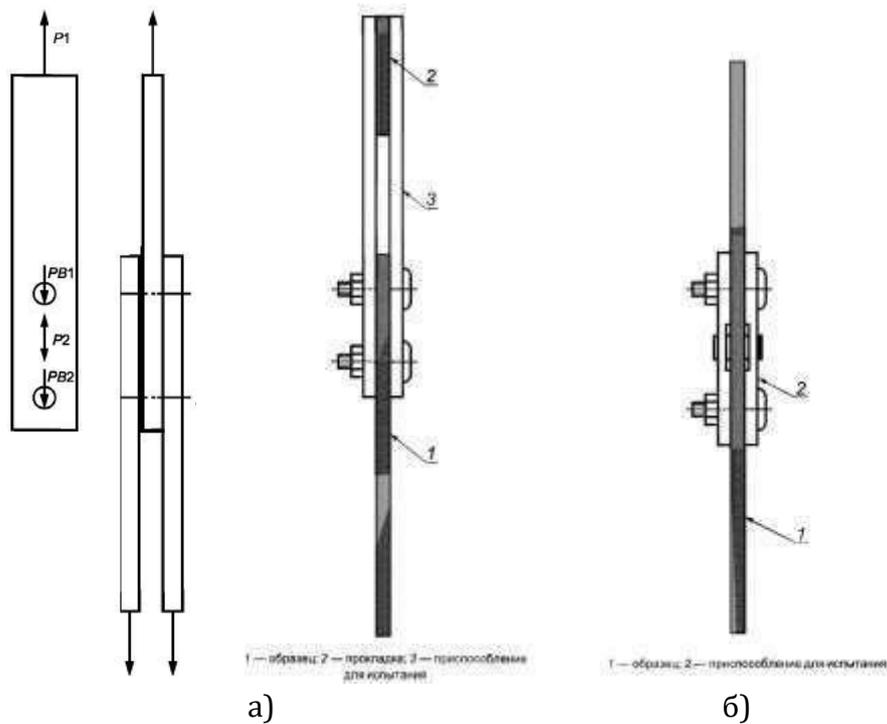
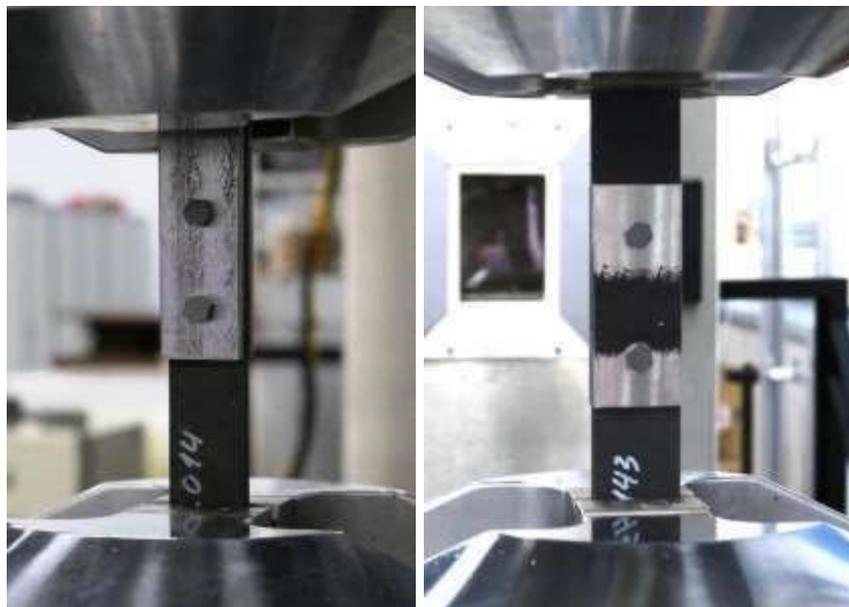


Рисунок 5 - Схема нагружения и общий вид образцов в сборе по методу А а) и методу В б)

На рисунке 6 представлена технологическая оснастка и образцы при действии комбинации сминающей и проходящей нагрузок, закреплённые в испытательной машине.



а)

б)

Рисунок 6 - Испытательная оснастка и образцы при действии комбинации сминающей и проходящей нагрузок, установленные в испытательную машину по методу А а) и методу В б)

Совместное использование комплекса методов определения несущей способности: полосы с отверстием, смятия и серии вариантов комбинации смятия и проходящей нагрузок, позволяет получить иную область применения материала с учетом типа соединения в конструкции (рисунок 7).



Рисунок 7 - Диаграмма при совместном действии сминающей и проходящей нагрузки с учётом типа соединения

Моделирование виртуального эксперимента

Для определения возможности аппроксимации полученных данных для иных укладок проводится серия численных расчётов с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Методика определения параметров материала основана на моделировании приведённых выше испытаний в программном комплексе LSDYNA и сравнении результатов расчёта с результатами испытаний. Для моделирования ПКМ [13,14] на основе эпоксидной матрицы и высокомодульного волокна используются восьмиузловые объёмные конечные элементы (КЭ) первого порядка [15,16].

Базовые механические характеристики монослоя ПКМ были приняты согласно таблице 1.

Таблица 1

Механические характеристики монослоя ПКМ

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

где 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.

Общий вид модели и граничные условия модели представлен на рисунке 8. Узлы в зоне закрепления ограничены по поступательным степеням свободы X, Y, Z. К узлам в зоне нагружения приложены вынужденные перемещения вдоль длинной стороны модели образца. В модели применен метод послойного моделирования.



Рисунок 8 - Общий вид модели и граничные условия модели

В расчётах используется модель материала ПКМ «MAT_221_ORTHOTROPIC_SIMPLIFIED_DAMAGE», основанная на критерии разрушения максимальных деформаций. Согласно используемому критерию [17] разрушение наступает, когда одна из компонент деформации, отнесённая к осям ортотропии, достигает предельного значения, определяемого из испытаний на одноосное нагружение и чистый сдвиг:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1^\alpha; \varepsilon_2 = \varepsilon_2^\alpha; \varepsilon_3 = \varepsilon_3^\alpha; \gamma_{12} = \varepsilon_4; \gamma_{23} = \varepsilon_5; \gamma_{31} = \varepsilon_6$$

$$\gamma_{12}, \gamma_{23}, \gamma_{31}$$

$$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$$

Здесь $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – деформация в $\varepsilon_1^\alpha, \varepsilon_2^\alpha, \varepsilon_3^\alpha, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6$ – предельная направлениях осей ортотропии, $\gamma_{12}, \gamma_{23}, \gamma_{31}$ – деформация сдвига в плоскостях ортотропии,

деформация монослоя, где $\alpha = \pm$ («+» соответствует растяжению, «-» – сжатию).

$i=1..3$ – соответствующие направления.

Модель материала MAT_221 основана на том, что зависимость напряжений от деформаций в ортотропном слоистом ПКМ имеет три участка (Рисунок 9): зона упругого поведения, зона повреждения, зона разрушения.

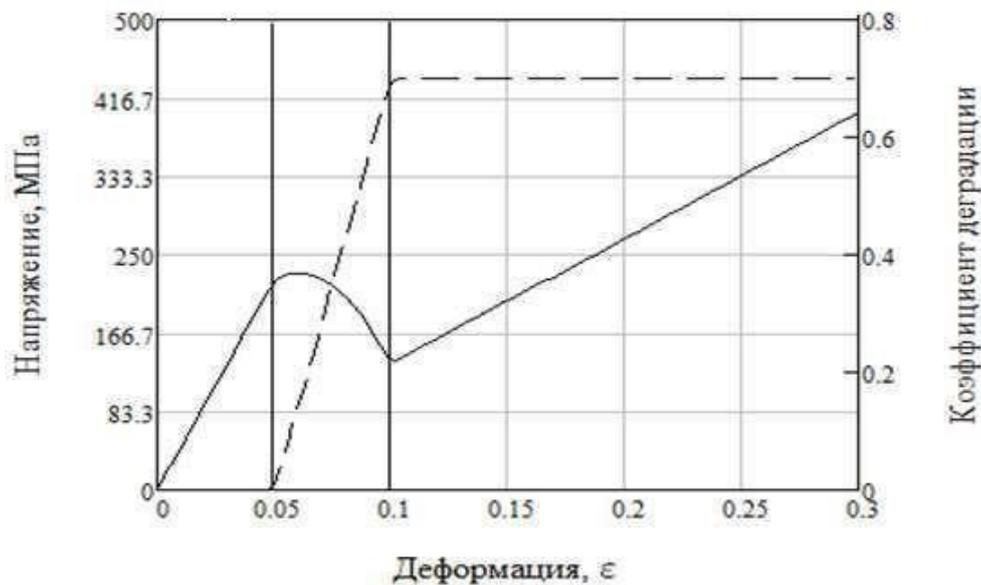


Рисунок 9 – Модель деградации свойств ПКМ

По результатам расчёта определены слои, получившие повреждения в результате достижения предельного значения согласно критерию разрушения [18,19], и значения нагрузки, при которой фиксируется потеря несущей способности образца.

Учитывая различные схемы армирования ортотропных пластин наблюдаются различные формы разрушения. Так для образца, с укладкой монослоев из 9% слоев по направлению 0° , 73% слоев по направлению 45° , 18% слоев по направлению 90° (9/73/18), т.е. состоящей из большого количества слоёв с ориентацией 45° , наблюдается отсутствие повреждений поперёк слоёв и множественные повреждения от сдвигающих деформаций. А для укладки монослоев, состоящей из 44% слоев по направлению 0° , 44% слоев по направлению 45° , 12% слоев по направлению 90° (44/44/12), т.е. с большим количеством слоёв с ориентацией 0° отмечается наличие повреждений поперёк образца и множественные повреждения от сжимающих деформаций. По результатам расчетов определена несущая способность образцов с описанными схемами армирования: 68 кН для укладки (9/73/18) и 73 кН для укладки (44/44/12). На рисунке 10 представлено распределение повреждений монослоев образца в ослабленном сечении по различным формам разрушения (сдвиг и сжатие монослоёв), где 1 соответствует разрушению элемента монослоя и деградации его жесткостных и прочностных характеристик.

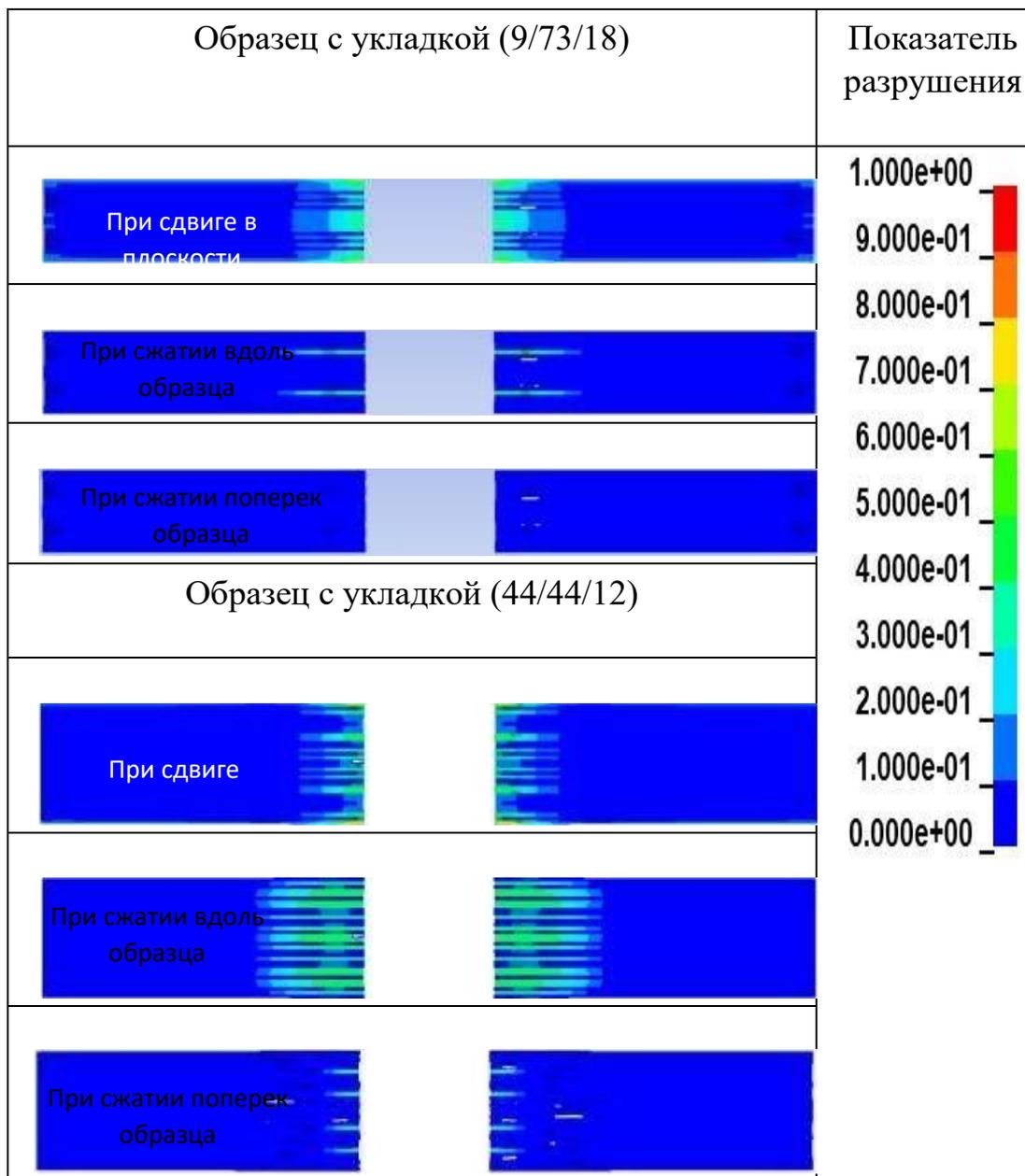


Рисунок 10 – Повреждение монослоев в образце в ослабленном сечении

Выводы

Анализ результатов проведенной расчётно-экспериментальной работы показывает, что при проектировании элементов конструкций из ортотропного материала целесообразно использовать комплексный подход к определению несущей способности [20]. Данный подход на примере изучаемого ортотропного материала на основе эпоксидной матрицы и высокомодульного углеродного волокна (ПКМ) позволяет двукратно увеличить площадь области несущей способности (рисунок 11).

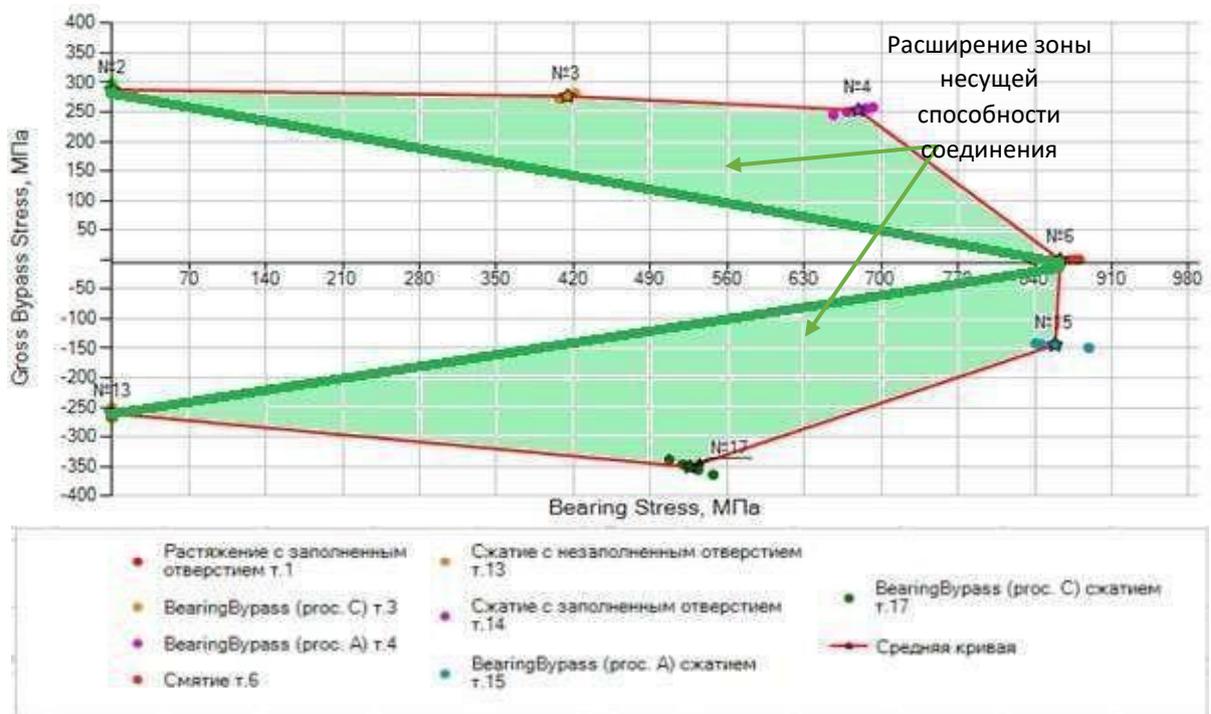


Рисунок 11 – Область расширения несущей способности соединения на основе экспериментальных данных

Принятый подход при расчете несущей способности образцов показал, что моделирование эксперимента дает приемлемый уровень погрешности (около 15%) и может быть использован при проведении дальнейшей работы по оценке совместного влияния смятия и проходящей нагрузки на несущую способность соединений (рисунок 12).



Рисунок 12 – Сравнение результатов испытаний и численного эксперимента

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Форсайт развития авиационной науки и технологий до 2030 года и на дальнейшую перспективу / под общей ред. Д.В. Мантурова, Б.С. Алёшина, В.И. Бабкина и др. М. : ЦАГИ, 2014. 280 с.
2. Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. М. : Машиностроение, 1988. 272 с.
3. Глебова М.А., Гришин В.И., Гусева Н.В. Исследования видов разрушения болтовых соединений слоистых композитов // Ученые записки ЦАГИ. 2022. Т. LIII, № 1. С. 66–74.
4. Оценка прочности многорядных металлокомпозитных соединений авиационных конструкций / М.А. Глебова, В.И. Гришин, Н.В. Гусева, А.Г. Яшутин // Ученые записки ЦАГИ. 2020. Т. LI, № 2. С. 57–66.
5. Исследование деформированного состояния зоны ремонта панели из полимерного композиционного материала / А.Ю. Ампилогов, Д.В. Дряницын, И.Н. Петунина, Е.И. Смагин // Труды ЦАГИ. 2018. № 2782. С.143–144.
6. Расчетные исследования влияния некоторых видов эксплуатационнотехнологических повреждений на несущую способность стрингерных панелей из ПКМ / Ю.И. Дударьков, Е.А. Левченко, М.В. Лимонин, А.В. Шевченко. Труды МАИ : электрон. журн. 2019. № 106. 24 с. URL: https://trudymai.ru/upload/iblock/93a/Dudarkov_Levchenko_Limonin_Shevchenko_rus.pdf?lang=ru&issue=106 (дата обращения 10.11.2025).
7. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности / Г.С. Варданян, В.И. Андреев, Н.М. Атаров, А.А. Горшков. М. : изд-во АСВ, 1995. 572 с.
8. 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. DOI 10.1007/BF02321502.
9. ГОСТ 33375-2015. Метод испытания на растяжение образцов с открытым отверстием. М. : Стандартинформ. 2016. 11 с.

10. ГОСТ Р 56788-2015. Метод определения прочности при сжатии образцов ламинатов с открытым отверстием. М. : Стандартинформ, 2019. 23 с.
11. ГОСТ 33498-2015. Метод испытания на смятие. М. : Стандартинформ, 2016. 20 с.
12. ГОСТ Р 56790-2015. Метод определения прочности на смятие и трансферной прочности ламинатов, соединенных двумя болтами. М.: Стандартинформ, 2016. 35 с.
13. Лехницкий С.Г. Теория упругости анизотропного тела. М. : Наука, 1977. 417 с.
14. Несущая способность панелей из композиционных материалов при наличии эксплуатационных повреждений / В.И. Голован, Ю.И. Дударьков, Е.А. Левченко, М.В. Лимонин. Труды МАИ : электрон. журн. 2020. № 110. 26 с. DOI 10.34759/trd-2020-110-5.
15. Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Расчетно-экспериментальное исследование поведения плоской подкрепленной панели из углепластика при ударе // Труды МАИ : электрон. журн. 2022. № 126. 20 с. DOI 10.34759/trd-2022126-04.
16. 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. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.02.017.
17. Медведский А.Л., Мартиросов М.И., Хомченко А.В. Механика деформирования и разрушения полимерных композитов при наличии множественных расслоений произвольной формы под действием динамических нагрузок // Труды МАИ : электрон. журн. 2022. № 124. 40 с. DOI 10.34759/trd2022124-06.
18. LS-Dyna : Keywords user's manual. Volume I. Livermore Software Technology corp, 2016. 2682 p.
19. 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.

20. Смагин Е.И., Вестяк В.А., Мартиросов М.И. Несущая способность ортотропных пластин с прямыми и зенкованными отверстиями // Проблемы прочности и пластичности. 2025. Т. 87, № 2. С. 168–180. DOI: 10.32326/181491462025-87-2-168-180.

References

1. Chernyshev S.L. and others. *Forsait razvitiya aviatsionnoi nauki i tekhnologii do 2030 goda i na dal'neishuyu perspektivu* [Foresight of the development of aviation science and technology until 2030 and beyond], Moscow, TsAGI, 2014, 280 p.
2. Vasiliev V.V. *Mekhanika konstruksii iz kompozitsionnykh materialov* [Mechanics of structures made of composite materials], Moscow, Mashinostroenie, 1988, 272 p.
3. Glebova M.A., Grishin V.I., Guseva N.V. *Uchenye zapiski TsAGI* [TsAGI Scientific Notes]. 2022, Vol. LIII, no. 1, pp. 66–74
4. Glebova M.A., Grishin V.I., Guseva N.V., Yashutin A.G. *Uchenye zapiski TsAGI* [TsAGI Scientific Notes]. 2020, vol. LI, no. 2, pp. 57–66.
5. Ampilogov A.Yu., Dryanitsyn D.V., Petunina I.N., Smagin E.I. *Trudy TsAGI*. [Proceedings of TsAGI], 2018, vol. 2782, pp. 143–144
6. Yu.I. Dudar'kov, E.A. Levchenko, M.V. Limonin, A.V. Shevchenko *Trudy MAI: elektron. zhurn.*, 2019. no. 106. 24 p. URL: Avialable at: https://trudymai.ru/upload/iblock/93a/Dudarkov_Levchenko_Limonin_Shevchenko_rus.pdf?lang=ru&issue=106.
7. G.S. Vardanyan, V.I. Andreev, N.M. Atarov, A.A. Gorshkov. *Soprotivlenie materialov s osnovami teorii uprugosti i plastichnosti* [Resistance of materials with the basics of the theory of elasticity and plasticity], Moscow, Publishing house of the DIA, 1995, 572 p.
8. Tan S.C., Kim R.Y. Strain and stress concentrations in composite laminates containing a hole. *Experimental Mechanics*, 1990, vol. 30, iss. 4. pp. 345–351. DOI 10.1007/BF02321502.

9. GOST 33375-2015. *Metod ispytaniya na rastyazhenie obraztsov s otkrytym otverstiem* [Tensile testing method for samples with an open hole], Moscow, Standartinform, 2016. 11 p.
10. GOST R 56788-2015. *Metod opredeleniya prochnosti pri szhatii obraztsov laminatov s otkrytym otverstiem* [Method for determining the compressive strength of laminates with an open hole], Moscow, Standartinform, 2019. 23 p.
11. GOST 33498-2015. *Metod ispytaniya na smyatie* [Crumple test method], Moscow, Standartinform, 2016. 20 p.
12. GOST R 56790-2015. *Metod opredeleniya prochnosti na smyatie i transfernoi prochnosti laminatov, soedinennykh dvumya boltami* [Method for determining the crumpling strength and transfer strength of laminates connected by two bolts]. Moscow: Standartinform, 2016. 35 p.
13. Lehnitsky S.G. *Teoriya uprugosti anizotropnogo tela* [Theory of elasticity of an anisotropic body], Moscow, Nauka Publishing House, 1977. 417 p.
14. Golovan V.I., Dudar'kov Yu.I., Levchenko E.A., Limonin M.V. *Trudy MAI: elektron. zhurn.*, 2020, no. 110, 26 p. DOI 10.34759/trd-2020-110-5.
15. Martirosov M.I., Khomchenko A.V. *Trudy MAI: elektron. zhurn.*, 2022, no. 126, 20 p. DOI 10.34759/trd-2022-126-04.
16. 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, pp. 3004–3020. DOI: 10.1016/j.compscitech.2006.02.017.
17. Medvedskii A.L., Martirosov M.I., Khomchenko A.V. *Trudy MAI: elektron. zhurn.*, 2022, no. 124, 40 p. DOI 10.34759/trd-2022-124-06.
18. *LS-Dyna: Keywords user's manual. Volume I*. Livermore Software Technology corp, 2016. 2682 p.
19. 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.

20. Smagin E.I., Vestyak V.A., Martirosov M.I. *Problemy prochnosti i plastichnosti*, 2025, vol. 87, no. 2, pp. 168–180. DOI: 10.32326/1814-9146-2025-87-2-168-180.

Информация об авторах

Владимир Анатольевич Вестяк, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедры 311, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; email: v.a.vestyak@mail.ru.

Михаил Иванович Мартиротов, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: michaelmartirosov@yandex.ru

Евгений Игоревич Смагин, начальник отдела ПАО «Яковлев», г. Москва, Россия; e-mail: smagin_ei@mail.ru

Information about the authors

Vladimir A. Vestyak, D. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of Department 311 Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; e-mail: v.a.vestyak@mail.ru

Mikhail I. Martirosov, Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia; e-mail: michaelmartirosov@yandex.ru

Evgeniy I. Smagin, Head of Department, PJSC «Yakovlev», Moscow, Russia; e-mail: smagin_ei@mail.ru

Получено 4 августа 2025 ● Принято к публикации 12 октября 2025 ● Опубликовано 30 декабря 2025
Received 4 August 2025 ● Accepted 12 October 2025 ● Published 30 December 2025
