

Научная статья

УДК 620.174

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182656>

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОРИСТОСТИ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИИМИДНОГО ПЕНОПЛАСТА

Максим Юрьевич Калягин<sup>1</sup>, Лев Наумович Рабинский<sup>2</sup>✉,

София Андреевна Шумская<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

Москва, Россия

<sup>2</sup>[rabinskiy@mail.ru](mailto:rabinskiy@mail.ru) ✉

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию полиимидного пенопласта с разной пористостью. Подобные материалы широко применяются в различных сферах авиастроения, судостроения, приборостроения и транспортного машиностроения. В особенности они хорошо зарекомендовали себя в качестве вспененного заполнителя при изготовлении многослойных деталей и элементов техники, в которой используются композиционные материалы. В работе рассматривался акримид полученный по технологии вспенивания на основе поли(мет)акрилимиды с разной плотностью. Были получены образцы с различной пористостью. Проведено исследование микроструктуры акримиды. Определен размер пор и их распределение

по объему. Проведены испытания на 3-х точечный изгиб, по результатам которых были получены значения модуля упругости и предела прочности.

**Ключевые слова:** пористость, акримид, испытание на изгиб, модуль упругости

**Финансирование:** работа выполнена при финансовой поддержке проекта РФФ 22-19-00352

**Для цитирования:** Калягин М.Ю., Рабинский Л.Н., Шумская С.А. Исследование влияния пористости на физико-механические характеристики полиимидного пенопласта // Труды МАИ. 2024. № 138. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182656>

Original article

## **STUDY OF THE INFLUENCE OF POROSITY ON PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF POLYIMIDE FOAMS**

**Maxim Yu. Kalyagin<sup>1</sup>, Lev N. Rabinskiy<sup>2</sup>✉, Sofia A. Shumskaya<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University),

Moscow, Russia

<sup>2</sup>[rabinskiy@mail.ru](mailto:rabinskiy@mail.ru)✉

**Abstract.** The work is devoted to the study of polyimide foam with different porosity. Such materials are widely used in various spheres of aircraft, shipbuilding, instrumentation and transportation engineering. In particular, they have proven themselves as a foam filler in the manufacture of multilayer parts and elements of machinery in which composite materials are used. In this work, acrimid obtained by foaming technology on the basis of

poly(meth)acrylimide with different densities was considered. Samples with different porosity were obtained. Microscopic techniques, including optical and scanning electron microscopy, were used to determine the characteristic pore sizes and their distribution over the material volume. The pore size differs by 9% between samples with densities of 80 kg/m<sup>3</sup> and 100 kg/m<sup>3</sup>.

The study includes three-point bending tests, which resulted in elastic modulus and tensile strength values. The result showed a significant effect of porosity on the elastic modulus of the materials. Thus, the modulus of elasticity of 80 kg/m<sup>3</sup> density foam was 136 MPa and that of 100 kg/m<sup>3</sup> density was 159 MPa.

In addition to the experimental tests, numerical modeling in quasi-static formulation by the finite element method for the three-point bending process was carried out. The results are in good agreement with the experimental data, confirming the observed effect of porosity on the mechanical properties.

In conclusion, this study suggests that the density and porosity of the foam significantly affect the mechanical properties of polyimide foams. Denser foams with smaller pores have better mechanical properties, making them more suitable for highly loaded, especially composite structures used in aviation and other advanced engineering applications.

**Keywords:** porosity, acrimid, bending test, modulus of elasticity

**Funding:** the work was carried out with the financial support of the RNF project 22-19-00352

**For citation:** Kalyagin M.Yu., Rabinsky L.N., Shumskaya S.A. Study of the influence of porosity on physical and mechanical characteristics of polyimide foams. *Trudy MAI*, 2024, no. 138. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=182656>

## 1. Введение

В современном авиастроении широко применяются трехслойные (сэндвичевые) конструкции, состоящие из внешних силовых обшивок и облегченного заполнителя, в качестве которого используются сотовые элементы, пенопласты, подкрепляющие элементы различной геометрической формы.[1-4] Сочетание хорошей технологичности и прочности композитных материалов (КМ) с высокой изгибной жёсткостью, характерной для трёхслойной панели, определяет широкие перспективы применения трёхслойных элементов с композитными несущими слоями в авиационной промышленности. Одним из основных компонентов данных конструкционных материалов является наполнитель, обеспечивающий нужные механические характеристики материала. [7-8]

Но все же в настоящее время только композиционные материалы способны удовлетворить требованиям современной техники, коей характерно ужесточение эксплуатационных условий: повышение нагрузок, температур, скоростей, агрессивности сред, а также уменьшение плотности, веса и многих других. Классические материалы уже не смогут удовлетворять такие запросы. Так, например, в конструкции Боинг 787 композитные материалы занимают 50% по массе от всех применяемых материалов, алюминиевые сплавы – 20%, титановые – 15%, стали – 10%, другие материалы – 5%. Применение же композиционных материалов снизило

массу данного самолета на 30%. Таким образом требования современной техники привели к созданию композитов с металлической матрицей.

### **Материалы и методы**

В работе исследовались образцы акримида, полученные по технологии вспенивания на основе поли(мет)акрилимиды с разной плотностью. Исследовались образцы с плотностью  $80 \text{ кг/м}^3$  и  $100 \text{ кг/м}^3$ . Для этого были получены однотипные образцы. Для каждой партии испытывались 3 однотипных образца с габаритами  $4 \times 10 \times 60 \text{ мм}$ .

Было проведено исследование микроструктуры образцы. Для определения микроструктуры использовался растровый электронный микроскоп Karl Zeiss 40. Результаты микроскопии представлены на рисунке 1.

Также проводилось исследование структуры на оптическом микроскопе. Оптический микроскоп позволил на протяжении всей поверхности каждого образцы проконтролировать размеры пор. Так для образца средний размер(диаметр) поры с плотностью  $80 \text{ кг/м}^3$  составлял  $0,1 \text{ мм}$ , а для образца с пористостью  $100 \text{ кг/м}^3$  составлял  $0,11 \text{ мм}$ , рисунок 2.

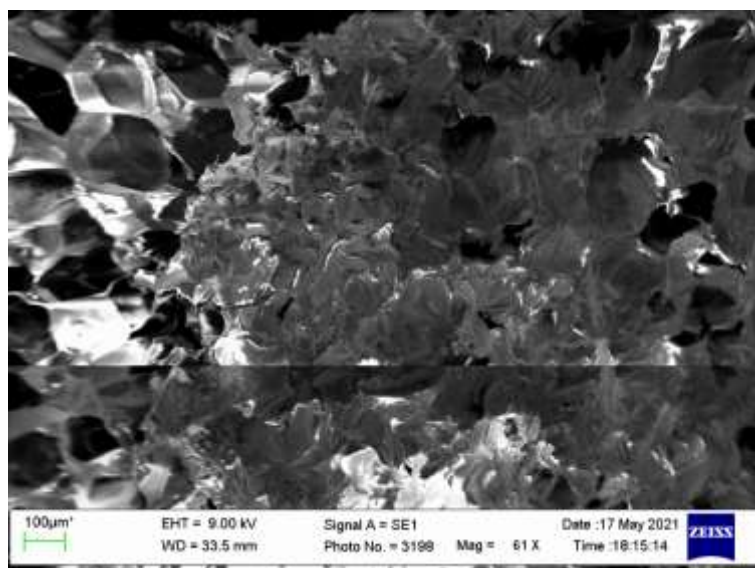


Рисунок 1. Результаты микроскопии с РЭМ.

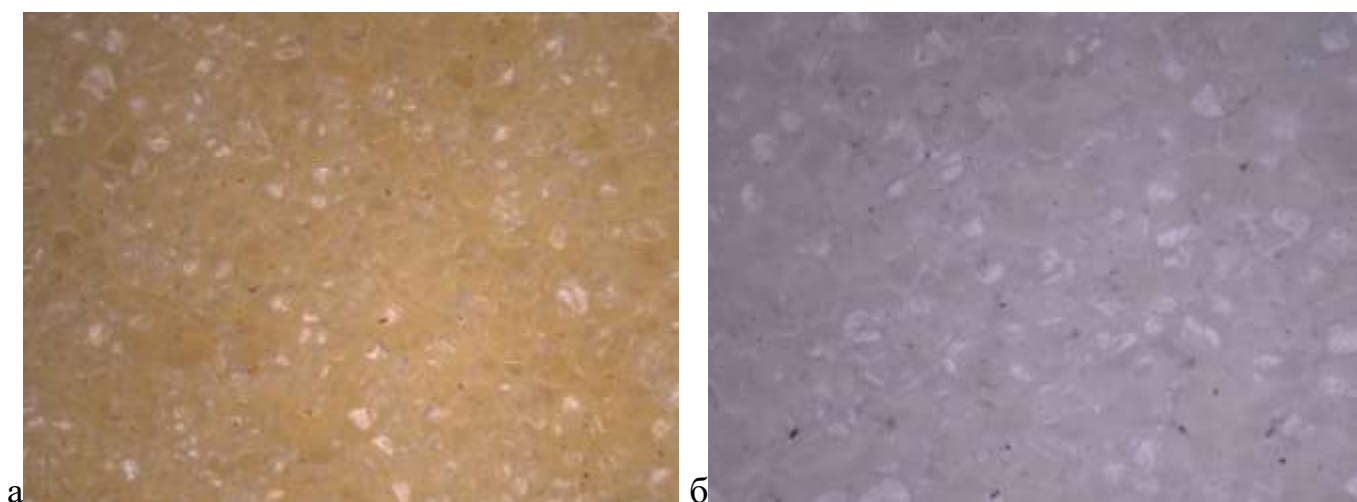


Рисунок 2. Результаты микроскопии с оптического микроскопа

(а - для материалов с плотностью  $80 \text{ кг/м}^3$ , б - для материалов с плотностью  $100 \text{ кг/м}^3$ )

Для оценки влияния пористости на механические свойства проводились испытания на трехточечный изгиб. Испытания проводились в соответствии со стандартными методиками испытаний на универсальной испытательной машине

Instron 5969 с программным обеспечением Bluehill. Образцы в процессе испытания представлены на рисунке 3. Испытание проводилось с постоянной скоростью нагружения 1 мм/мин. Расстояние между опорами составляло 32 мм. Радиус опор составлял 2,5 мм, а радиус давящей поверхности 5 мм. В процессе испытания контролировался прогиб образца с помощью дефлектометра с контактным тензодатчиком. База тензодатчика составляла 50 мм. Для каждой испытанной партии была построена кривая напряжение-деформация, рисунок 4.



Рисунок 3. Образец во время проведения испытаний

(а - для материалов с плотностью  $80 \text{ кг/м}^3$ , б - для материалов с плотностью  $100 \text{ кг/м}^3$ )

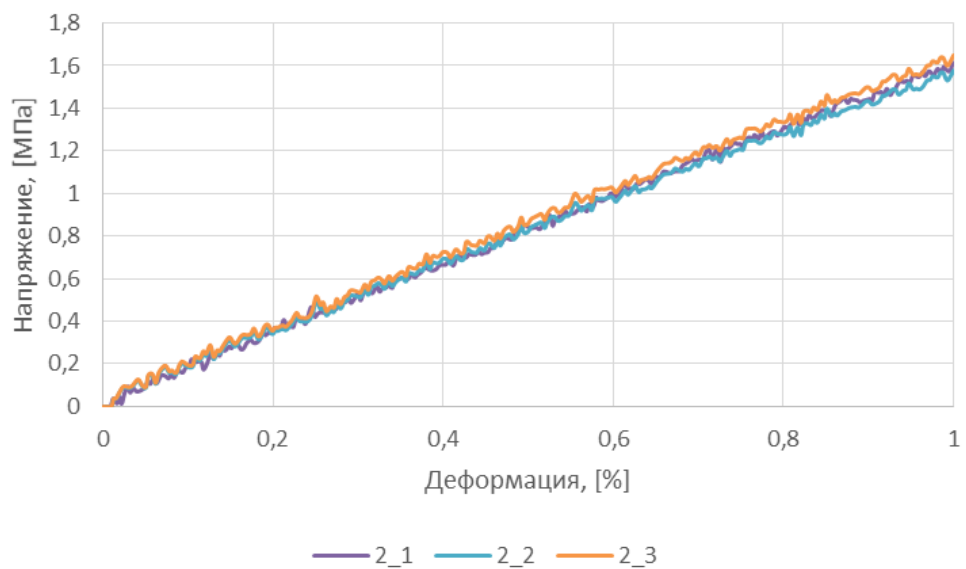
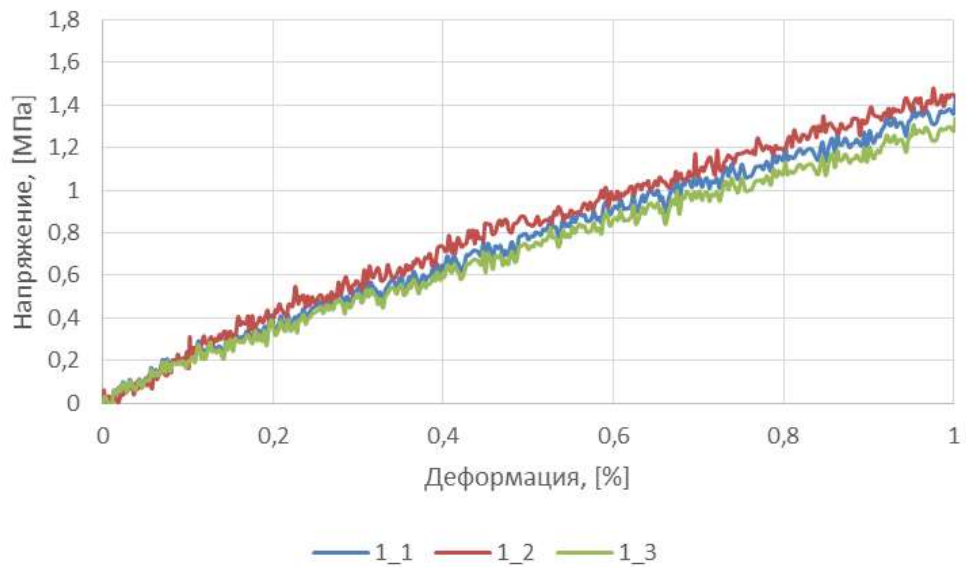


Рисунок 4. Графики напряжения-деформация для каждой партии.

(а - для материалов с плотностью  $80 \text{ кг/м}^3$ , б - для материалов с плотностью  $100 \text{ кг/м}^3$ )

Коэффициент вариации для каждой партии образцов не превышал 5%. Графики напряжения-деформация для средних значений каждой партии дан на рисунке 5.



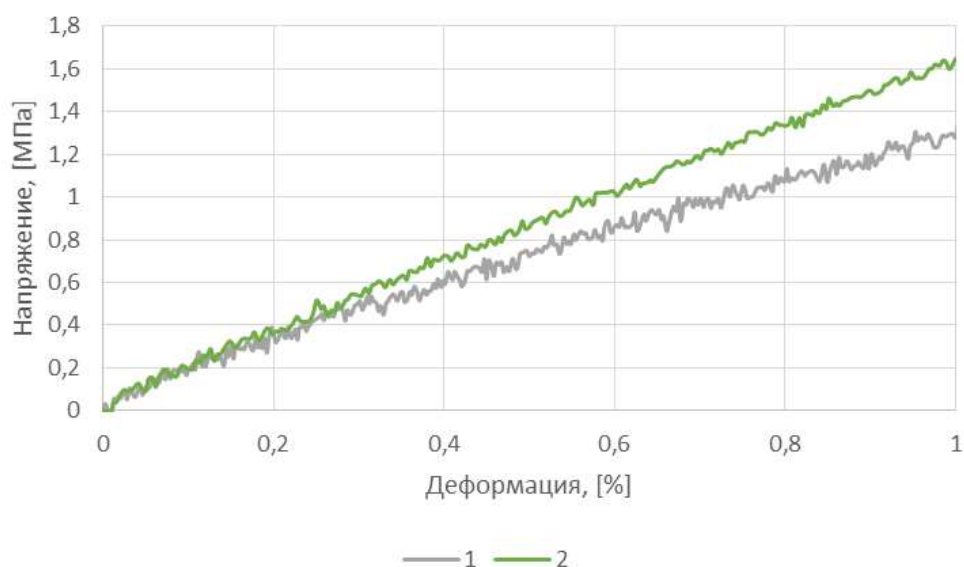


Рисунок 5. Графики напряжения-деформация для каждой партии.

(1 - для материалов с плотностью  $80 \text{ кг/м}^3$ , 2 - для материалов с плотностью  $100 \text{ кг/м}^3$ )

### Численное моделирование

При моделировании трехточечного изгиба и растяжения использовалась та же геометрия, что и при эксперименте. Расчет производился в квазистатической постановке методом конечных элементов в среде Ansys Workbench. При моделировании трехточечного изгиба задавалось условие заделки у элементов опоры, а к давящей поверхности прикладывалась усилие, рисунок 6. Трение между опорными и давящей поверхностями принималось равным 0,1.

Моделирование проводилось с учетом симметрии в двух плоскостях глобальной системы координат. В плоскости XY и YZ.

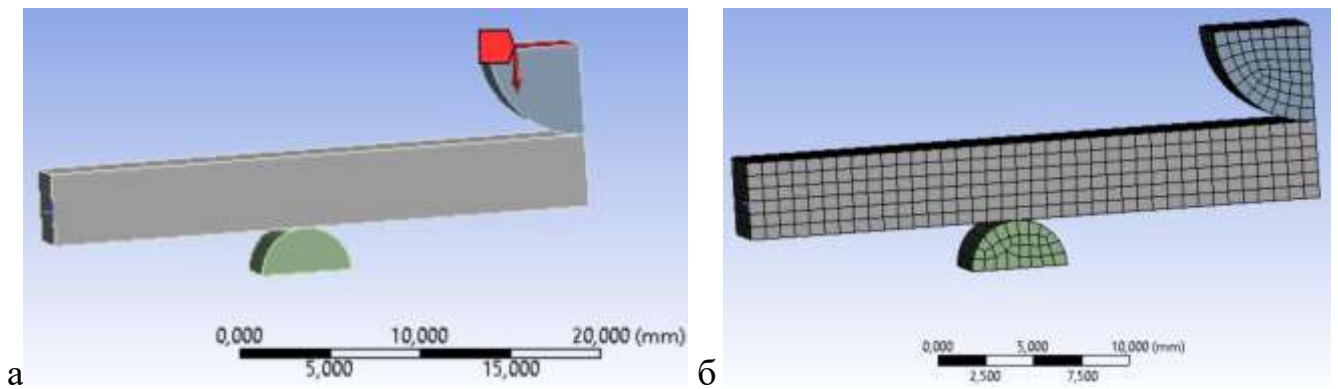


Рисунок 6. Модель изгиба (а-геометрия с граничными условиями, б- конечно-элементная сетка)

По результатам численного моделирования для исследуемых образцов были получены диаграммы зависимостей деформация – напряжение при изгибе. Численный результат достаточно точно накладывается на результат полученный в эксперименте, рисунок 7.

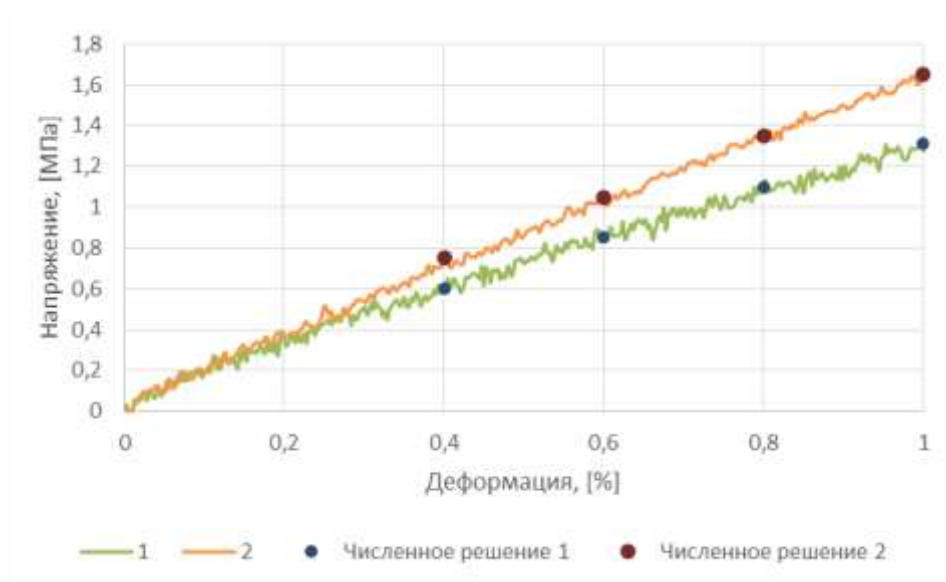


Рисунок 7. Сравнение эксперимента и численного моделирования

## Выводы

В ходе исследования были проведены исследования структуры акримида и механические испытания образцов на изгиб. По результатам исследования микроскопии определен характерный размер пор и их распределение. Размер пор отличается на 9% между образцами с плотностями  $80 \text{ кг/м}^3$  и  $100 \text{ кг/м}^3$ . Образцы испытывались на трехточечный изгиб, где результат показал значительное влияние пористости на модуль упругости материалов. Для материалов с плотностью  $80 \text{ кг/м}^3$  модуль упругости составляет порядка 136 МПа, а с плотностью  $100 \text{ кг/м}^3$  модуль упругости составляет порядка 159 МПа. При этом предел прочности для материалов с плотностью  $80 \text{ кг/м}^3$  составляет 2,5 МПа, а с плотностью  $100 \text{ кг/м}^3$  3 МПа. Проведено численное моделирование в квазистатической постановке. Результат, полученный при численном моделировании, хорошо согласуется с результатом, полученным в ходе экспериментального исследования.

## Список источников

1. Сорокин В.А., Копылов А.В., Тихомиров М.А., Стирин Е.А., Логинов А.Н., Федоров Д.Ю., Валуй П.В. Построение системы теплозащиты из углеродных композиционных материалов с покрытиями для теплонапряженных конструкций двигателей летательных аппаратов // Труды МАИ. 2015. № 84. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=63029>

2. Калягин М.Ю. Моделирование приборных отсеков летательных аппаратов пористо-смесевыми ударниками // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=90156>
3. Тялина Л.Н., Минаев А.М., Пручкин В.А. Новые композиционные материалы. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2011. - 79 с.
4. Русланцев А.Н., Думанский А.М., Алимов М.А. Модель напряженно-деформированного состояния криволинейной слоистой композитной балки // Труды МАИ. 2017. № 96. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=85659>
5. Ковалевская Ж.Г., Безбородов В.П. Основы материаловедения. Конструкционные материалы. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 104 с.
6. Дудченко А.А., Башаров Е.А. Исследование упругой линии трехслойной балки с существенно различающейся слоевой жесткостью // Труды МАИ. 2011. № 42. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=24261>
7. Берлин А.А. Современные полимерные композиционные материалы // Соросовский образовательный журнал. 1995. № 1. С. 57-65.
8. Матренин С.В., Овечкин Б.Б. Композиционные материалы и покрытия на полимерной основе. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 197 с.
9. Современные технологии производства. Композиционные материалы. URL: <https://extxe.com/28897/kompozicionnye-materialy-vidy-i-tehnologii-proizvodstva-kompozicionnyh-materialov/?ysclid=m2h7z8s493353877388>
10. Дж. Пиатти. Достижения в области композиционных материалов: пер. с англ.. - М.: Металлургия, 1982. - 304 с.

11. Ташкинов М.А., Шалимов А.С. Моделирование влияния микромасштабных морфологических параметров на деформационное поведение пористых материалов с металлической матрицей // Физическая мезомеханика. 2021. № 5. С. 130-137.
12. Шалимов А.С., Ташкинов М.А. Моделирование деформирования и разрушения пористых сред с учетом особенностей их морфологического строения // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 4. С. 175-187. DOI: [10.15593/perm.mech/2020.4.15](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.4.15)
13. Нгуен Н.Х., Тарлаковский Д.В. Нестационарные поверхностные функции влияния для упруго-пористой полуплоскости // Труды МАИ. 2012. № 53. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29269>
14. Adams D.F., Lewis E.Q. Experimental study of three-and four-point shear test specimens // Journal of Composites Technology & Research, 1995, vol. 17 (4), pp. 341–349. DOI: [10.1520/CTR10454J](https://doi.org/10.1520/CTR10454J)
15. Carlsson L.A., Adams D.F., Pipes R.B. Experimental characterization of advanced composite materials, 1987. DOI: [10.1201/NOE1587161001](https://doi.org/10.1201/NOE1587161001)
16. Xie M., Adams D.F. Study of three- and four-point shear testing of unidirectional composite materials // Composites, 1995, vol. 26 (9), pp. 653–659. DOI: [10.1016/0010-4361\(95\)98914-7](https://doi.org/10.1016/0010-4361(95)98914-7)
17. Прокудин О.А., Соляев Ю.О., Бабайцев А.В., Артемьев А.В., Коробков М.А. Динамические характеристики трехслойных балок с несущими слоями из алюмокомпозита // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 4. С. 260-270. DOI: [10.15593/perm.mech/2020.4.22](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.4.22)

18. Tita V., Caliri Júnior M.F. Numerical simulation of anisotropic polymeric foams // Latin American Journal of Solids and Structures, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 1-21. DOI: [10.1590/S1679-78252012000200005](https://doi.org/10.1590/S1679-78252012000200005)
19. Vasiliev V.V., Morozov E.V. Advanced mechanics of composite materials and structures, Elsevier, 2018.
20. Бабайцев А.В., Бурцев А.Ю., Рабинский Л.Н., Соляев Ю.О. Методика приближенной оценки напряжений в толстостенной осесимметричной композитной конструкции // Труды МАИ. 2019. № 107. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=107879>

## References

1. Sorokin V.A., Kopylov A.V., Tikhomirov M.A., Stirin E.A., Loginov A.N., Fedorov D.Yu., Valui P.V. *Trudy MAI*, 2015, no. 84. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=63029>
2. Kalyagin M.Yu. *Trudy MAI*, 2018, no. 98. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=90156>
3. Tyalina L.N., Minaev A.M., Pruchkin V.A. *Novye kompozitsionnye materialy* (New composite materials), Tambov, Izd-vo TGTU, 2011, 79 p.
4. Ruslantsev A.N., Dumanskii A.M., Alimov M.A. *Trudy MAI*, 2017, no. 96. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=85659>
5. Kovalevskaya Zh.G., Bezborodov V.P. *Osnovy materialovedeniya. Konstruktsionnye materialy* (Fundamentals of materials science. Structural materials), Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009, 104 p.

6. Dudchenko A.A., Basharov E.A. *Trudy MAI*, 2011, no. 42. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=24261>
7. Berlin A.A. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal*, 1995, no. 1, pp. 57-65.
8. Matrenin S.V., Ovechkin B.B. *Kompozitsionnye materialy i pokrytiya na polimernoi osnove* (Composite materials and coatings on polymer basis), Tomsk, Izd-vo TPU, 2008, 197 p.
9. *Sovremennye tekhnologii proizvodstva. Kompozitsionnye materialy*. URL: <https://extxe.com/28897/kompozicionnye-materialy-vidy-i-tehnologii-proizvodstva-kompozicionnyh-materialov/?ysclid=m2h7z8s493353877388>
10. Dzh. Piatti. *Dostizheniya v oblasti kompozitsionnykh materialov* (Advances in composite materials), Moscow, Metallurgiya, 1982, 304 p.
11. Tashkinov M.A., Shalimov A.S. *Fizicheskaya mezomekhanika*, 2021, no. 5, pp. 130-137.
12. Shalimov A.S., Tashkinov M.A. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. 2020, no. 4, pp. 175-187. DOI: [10.15593/perm.mech/2020.4.15](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.4.15)
13. Nguen N.Kh., Tarlakovskii D.V. *Trudy MAI*, 2012, no. 53. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29269>
14. Adams D.F., Lewis E.Q. Experimental study of three-and four-point shear test specimens, *Journal of Composites Technology & Research*, 1995, vol. 17 (4), pp. 341–349. DOI: [10.1520/CTR10454J](https://doi.org/10.1520/CTR10454J)
15. Carlsson L.A., Adams D.F., Pipes R.B. *Experimental characterization of advanced composite materials*, 1987. DOI: [10.1201/NOE1587161001](https://doi.org/10.1201/NOE1587161001)

16. Xie M., Adams D.F. Study of three- and four-point shear testing of unidirectional composite materials, *Composites*, 1995, vol. 26 (9), pp. 653–659. DOI: [10.1016/0010-4361\(95\)98914-7](https://doi.org/10.1016/0010-4361(95)98914-7)
17. Prokudin O.A., Solyaev Yu.O., Babaitsev A.V., Artem'ev A.V., Korobkov M.A. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. 2020, no. 4, pp. 260-270. DOI: [10.15593/perm.mech/2020.4.22](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.4.22)
18. Tita V., CaliriJúnior M.F. Numerical simulation of anisotropic polymeric foams, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2012, vol. 9, no. 2, pp. 1-21. DOI: [10.1590/S1679-78252012000200005](https://doi.org/10.1590/S1679-78252012000200005)
19. Vasiliev V.V., Morozov E.V. *Advanced mechanics of composite materials and structures*, Elsevier, 2018.
20. Babaitsev A.V., Burtsev A.Yu., Rabinskii L.N., Solyaev Yu.O. *Trudy MAI*, 2019, no. 107. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=107879>

Статья поступила в редакцию 10.09.2024

Одобрена после рецензирования 16.10.2024

Принята к публикации 25.10.2024

The article was submitted on 10.09.2024; approved after reviewing on 16.10.2024; accepted for publication on 25.10.2024