

## МЕТАЛЛУРГИЯ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Научная статья  
УДК 620.178.3  
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=187590>  
EDN: <https://www.elibrary.ru/WAHMKM>



### Применение полимерных композиционных материалов во внешнем обводе реактивного сопла

Сергей Николаевич Лезнов<sup>1</sup>, Мария Игоревна Резникова<sup>2</sup>, Владислав Евгеньевич Стрельченко<sup>3✉</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> ОКБ им. А. Люльки – филиал ПАО «ОДК–УМПО», Москва, Российская Федерация

<sup>1</sup> [serj.leznov@mail.ru](mailto:serj.leznov@mail.ru)

<sup>2</sup> [reznikova1399@mail.ru](mailto:reznikova1399@mail.ru)

<sup>3</sup> [vladislav.strelchencko@yandex.ru](mailto:vladislav.strelchencko@yandex.ru) ✉

**Аннотация.** Рассмотрено применение наиболее перспективных температуростойких полимерных композиционных материалов (ПКМ) во внешнем обводе реактивного сопла. Спроектированы электронно-геометрические модели деталей, входящих во внешний обвод реактивного сопла. Выполнены расчеты на прочность панелей из ПКМ и металлических деталей крепления внешнего обвода реактивного сопла. Представлены результаты стендовых испытаний внешнего обвода в составе изделия [1].

**Ключевые слова:** высокотемпературные полимерные композиционные материалы, авиационное двигателестроение, внешний обвод, реактивное сопло, фталонитрильное связующее

**Для цитирования:** Лезнов С.Н., Резникова М.И., Стрельченко В.Е. Применение полимерных композиционных материалов во внешнем обводе реактивного сопла // Вестник Московского авиационного института. 2026. Т. 33. № 1. С. 200-206. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=187590>

## METALLURGY AND COMPOSITE MATERIALS

Original article

### Polymer Composite Materials Application in the Jet Nozzle Outer Contour

Sergey N. Leznov<sup>1</sup>, Maria I. Reznikova<sup>2</sup>, Vladislav E. Strelchenko<sup>3✉</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Lyulka design bureau – subsidiary of PJSC “UEC-UMPO”, Moscow, Russian Federation

<sup>1</sup> [serj.leznov@mail.ru](mailto:serj.leznov@mail.ru)

<sup>2</sup> [reznikova1399@mail.ru](mailto:reznikova1399@mail.ru)

<sup>3</sup> [vladislav.strelchencko@yandex.ru](mailto:vladislav.strelchencko@yandex.ru) ✉

#### Abstract

The outside contour of jet nozzle consists of leaves that cover the engine rear end, which outruns the fuselage. The outside contour is required to arrange the nozzle parts cooling, and minimize losses on the jet nozzle while the external flow-around.

The purpose of the article consists in creating the samples-demonstrators of the jet nozzle external contour parts. These will demonstrate the possibility of high-temperature polymer composite materials application as a part of the aviation engine, as well as reveal such merits of the parts from the polymer composite materials as weight and

production preparation time reduction for their further implementation in the structure.

At the first stage of this work, the search for polymeric binding agent capable to operate at the temperatures above 300°C and selection of reinforcing fabrics based on the tests of elementary samples were performed. The highest figures were obtained for the PHT450 prepreg based on the FNI350 TU 20.14.43-002-73047899-2020 phthalonitrile binding agent and carbon fabrics of twill-weave (based on the UMATEX fibers). The tests were being conducted both at normal conditions and at high temperatures (400°C) to assess the PCM features degradation under the action of temperature.

Several options of the parts from the PCM embodiment with various fixing options were suggested at the design stage. As the results of strength computations, the PCM parts and metal fixture elements refinement was performed. Simulation of the metal fixture elements, as well as jet nozzle outside contour layout was performed in the NX software package. The strength calculations of the PCM parts together with metal fixture elements were performed with the ANSYS Workbench 2021 R1 software package. The PCM parts layer-by-layer simulation was accomplished with the ACP (Ansys Composite PrepPost) module. The material anisotropy and orientation of layer packing were accounted for while the computations performing.

On the test bench, the prepared PCM parts of the external contour were installed on the gas turbine engine and tested as a part of the product. The total operating time amounted to more than 5 hours.

The performed tests demonstrated the possibility of the PCM parts application in the gas turbine engine and allowed defining the structural alterations required for their further elaboration and full-fledged application.

At the moment, based on the tests results the work on the structure optimization, namely thermal protection introduction, weight reduction (layers packing and thickness, as well as new honeycomb filler introduction); the honeycomb with dispersion-filled binder, ensuring special characteristics, introduction into the external contour structure has begun.

The advantages of the selected structure are the possibility of quick producing PCM part prototypes of the outside contour, the low cost tooling and fastness of its production.

The scientific-technical backlog allowed demonstrating the possibility of the PCM parts employing and the prospects of further PCM application in thermally loaded engine units where earlier the titanium alloys were employed.

**Keywords:** high-temperature polymer composite materials, aviation engine building, external outline, jet nozzle, phthalonitrile binder

**For citation:** Leznov S.N., Reznikova M.I., Strelchenko V.E. Polymer Composite Materials Application in the Jet Nozzle Outer Contour. *Aerospace MAI Journal*. 2026;33(1):200-206. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=187590>

#### List of Figures

Fig. 1. Simulation and strength computing of the PCM-parts and metal fixture

Fig. 2. Comparison of computed and experimental data

Fig. 3. Results of The PCM-panel thermomentering

Fig. 4. Defects revealed on PCM-panels after the bench tests

---

## Введение

К летательным аппаратам предъявляется комплекс требований, определяющий тактико-технические характеристики объекта. Одно из требований – снижение радиолокационной заметности. На данный момент радиопоглощающее покрытие (РПП) наносится непосредственно на металл, как у самолетов F-22, F-35 [2], что существенно сужает его применение из-за температурных ограничений. При длительном воздействии температур эксплуатации снижаются адгезионные и радиотехнические характеристики РПП.

Существующие эффективные РПП имеют значительную массу и не обладают несущей способностью. Требуется компенсация разницы в коэффициентах линейного температурного

расширения (КЛТР) материалов РПП и металла при циклических температурных нагрузках. Для восстановления РПП требуется периодическое проведение соответствующих работ при эксплуатации объекта, что увеличивает время подготовки объекта к вылету и повышает стоимость обслуживания.

Опираясь на опыт использования ПКМ в авиа- и двигателестроении, возможно рассмотреть его применение и в качестве радиопоглощающего материала во внешнем обводе авиационного двигателя. Преимуществом использования композиционных материалов является возможность подходить к решению поставленных задач в комплексе и закладывать специальные характеристики еще на этапе проектирования. Например, целью применения ПКМ

в гражданской авиации является снижения массы и шума авиационного двигателя за счет изготовления из ПКМ мотогондолы и входного направляющего аппарата (ВНА) (ПД-14, ПД-35 и др.) [3–5].

Целью данной работы является оценка возможности применения высокотемпературных полимерных композиционных материалов (ВПКМ) в конструкции внешнего обвода реактивного сопла авиационного двигателя, изделия ОКБ им. А. Люльки. Для достижения этой цели осуществлен поиск высокотемпературного полимерного связующего (на основе которого возможно изготовление и конструкционного, и специального материала). Выполнено проектирование опытных образцов (ОО) деталей из ПКМ, проведены работы по изготовлению и испытаниям конструктивно-подобных элементов (КПЭ), уточнению конструкции ОО деталей, изготовлению образцов-демонстраторов ПКМ-деталей для стендовых испытаний в составе изделия.

**Проектирование и расчет выполненного из ПКМ внешнего обвода реактивного сопла**

Внешний обвод необходим для организации охлаждения деталей сопла, а также минимизации потерь на реактивном сопле при внешнем обтекании [6]. Внешний обвод реактивного сопла состоит из панелей, которые закрывают заднюю часть двигателя, выходящую за фюзеляж.

На первом этапе работы был проведен поиск полимерного связующего, способного работать при температуре более 300°C [7–10], а также проведен выбор армирующих тканей на основе результатов испытаний элементарных образцов. Наиболее высокие показатели продемонстрировал препрег РНТ450 на основе фталонитрильного связующего ФНИ350 ТУ 20.14.43-002-73047899-2020 и углеродных тканей саржевого плетения (на основе нитей УМАТЕХ). Испытания проводились в нормальных условиях и в условиях высокой температуры (400°C) для оценки снижения физико-механических свойств ПКМ под воздействием температуры [11].

На этапе проектирования было предложено несколько вариантов исполнения деталей из ПКМ с различными вариантами закрепления. По результатам прочностных расчетов была проведена доводка всех деталей. Моделирование металлических деталей крепления и облика внешнего обвода реактивного сопла осуществлялось в программном комплексе NX. Послойное моделирование ПКМ-деталей выполнено в программном комплексе ANSYS Workbench 2021 R1 в модуле ACP (Ansys Composite PrepPost). Прочностные расчеты ПКМ-деталей совместно с металлическими деталями крепления выполнены в модуле Static Structural [12]. При расчетах учитывались анизотропия материала

и ориентация укладки слоев. На рис. 1 представлены поэтапное моделирование расчетной модели ПКМ-детали и ее расчет на прочность совместно с металлическими деталями крепления.

Расчет на прочность показал, что детали внешнего обвода при расчетной температуре и расчетном давлении имеют достаточные запасы прочности для проведения стендовых испытаний.

Также были проведены испытания КПЭ винтового соединения ПКМ–металл, ПКМ–ПКМ, заклепочного соединения ПКМ–металл и многих других образцов, имитирующих опасные места в конструкции внешнего обвода. Такие испытания необходимы для нахождения разрушающей нагрузки и сопоставления ее с расчетной нагрузкой для подтверждения работоспособности соединений или опасных мест, по которым выполнены КПЭ. На рис. 2 представлен прочностной расчет одного из КПЭ – винтовое соединение ПКМ–металл, а также разрушенные КПЭ после испытаний по ГОСТ Р 57867-2017 [13]. Видно, что как при испытаниях, так и при расчете на прочность разрушение ламината (связующего и волокна) происходит в одних и тех же местах вблизи отверстия (зоны отмечены красным цветом). Значение расчетной разрушающей нагрузки на 8,5% меньше, чем в испытаниях ( $F_{cp} = 14200$  Н), так как минимальная расчетная разрушающая сила вычислялась до момента начала разрушения внешнего слоя, а испытания проводились до протягивания ламината (полного разрушения КПЭ) [14].

Полученное в испытаниях минимальное разрушающее усилие оказалось больше реактивных сил в вин-

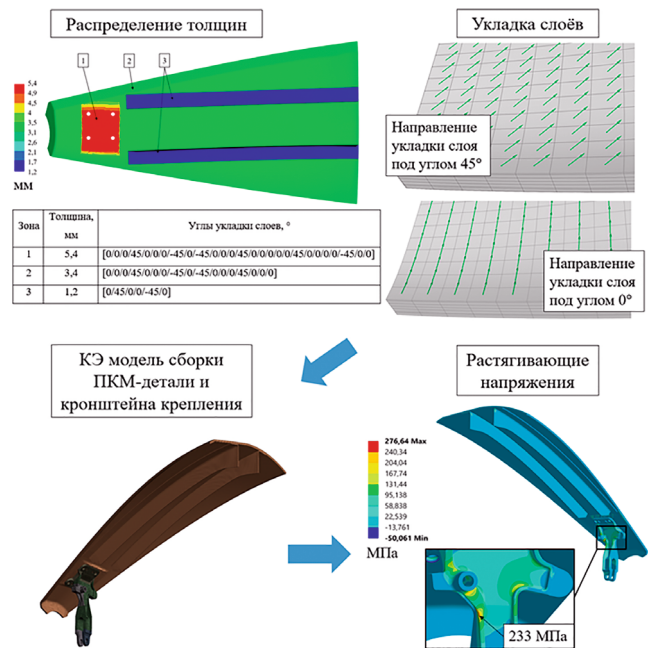


Рис. 1. Моделирование и расчет на прочность ПКМ-деталей и металлического крепления

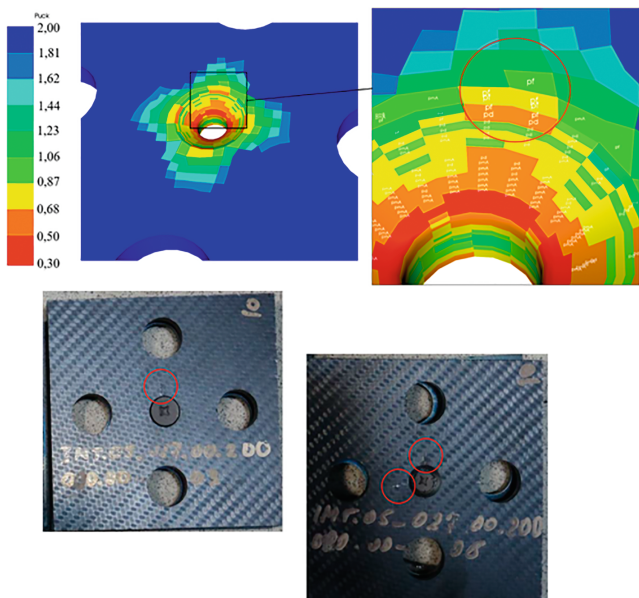


Рис. 2. Сравнение расчетных и экспериментальных данных

товых соединениях, определенных при расчете сборки ПКМ-панелей с металлическими деталями крепления. Это свидетельствует о правильном выборе крепежа.

Стоит отметить, что моделирование КПЭ проведено аналогично ПКМ-панелям в сборке. Так как расчеты КПЭ верифицированы, то можно сделать вывод о том, что полноразмерные ПКМ-панели смоделированы правильно.

### Испытания выполненного из ПКМ внешнего обвода реактивного сопла

По результатам прочностных расчетов и отработки технологии изготовления полноразмерных ПКМ-деталей были изготовлены образцы-демон-

страторы для стендовых испытаний [15–16]. На испытательном стенде препарированные детали внешнего обвода из ПКМ были установлены на газотурбинный двигатель и испытаны в составе изделия. Общая наработка составила более 5 часов.

Для установки термопар на ПКМ-детали внешнего обвода проведен поиск клеев. Наиболее удачным признан клей ВС-350, но для установки пластин на детали из ПКМ необходимо создать давление, и склеивание происходит в термопечи при повышенной температуре. В связи с высокой трудоемкостью процесса при использовании данного клея, было принято решение использовать клей холодного отверждения ЦМК-Вт ТУ 2252-622-56897835-2014, который не требует сложной оснастки для фиксации термопар.

Выбранный материал на основе фталонитрильного связующего длительно может работать до температуры 350°C и кратковременно – до 400°C. Максимальная температура длительной работы деталей на испытательном стенде составила 452°C. На рис. 3 представлен график зависимости температуры деталей от времени испытаний и частоты вращения двигателя. Черной линией обозначена максимальная температура эксплуатации материала РНТ450. В ходе испытаний термопара Т834н2 (фиолетовая линия) отклеилась от детали и находилась в потоке горячего воздуха.

По результатам анализа показаний термопары Т834л1 (красная линия, рис. 3) обнаружено задувание горячего воздуха из проточной части, которое привело к превышению температуры и появлению дефектов: при кратковременном локальном перегреве одной из ПКМ-деталей произошло «разломачивание» ткани за счет деструкции связующего

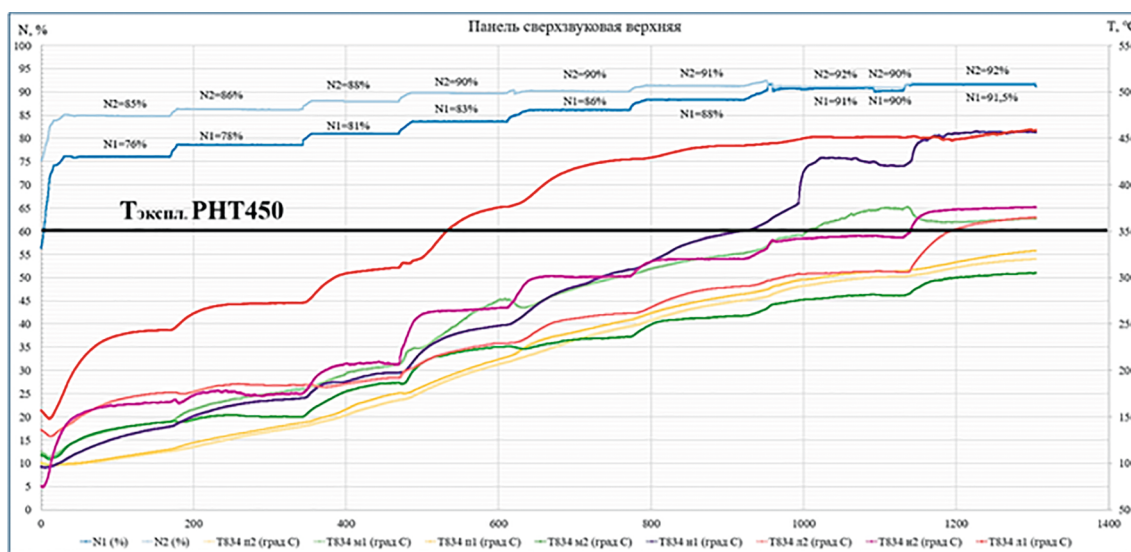


Рис. 3. Результаты термометрирования ПКМ-панели

(рис. 4), также в нескольких местах обнаружено «расслоение», ремонт осуществлялся с помощью герметика, термоскотча ЗМ-363 и клея ЦМК-Вт. После проведения ремонта испытания были продолжены, однако устранить задувание горячего воздуха в ходе ремонта не удалось, что определило дальнейшее направление работ. Стоит отметить, что ПКМ-панели не потеряли несущую способность, так как перегревы были локальными, и это позволило довести испытания до конца.



Рис. 4. Дефекты, обнаруженные на ПКМ-панелях после проведения стендовых испытаний

На основании анализа методов снижения температуры [3–5] можно утверждать, что наличие теплозащитного экрана позволит избежать появления вышеуказанных дефектов. Таким образом, проведенные испытания показали возможность применения ПКМ-деталей в газотурбинном двигателе и позволили определить, какие конструктивные доработки необходимы для их полноценного использования.

### Выводы

Ранее в России имелся опыт применения ПКМ только в планерах или в узлах двигателя с невысокой температурой (до 150°C) [3–5]. Данная работа показала возможность применения ПКМ в теплонагруженных узлах двигателя, где раньше применялись титановые сплавы.

На основе анализа существующих материалов спроектированы детали из ПКМ для внешнего обвода реактивного сопла. Для верификации прочностного расчета деталей были изготовлены и испытаны КПЭ мест закрепления. Анализ результатов испытаний и сравнение их с прочностным расчетом подтвердили возможность установки деталей из ПКМ на стендовые испытания.

По результатам анализа дефектов выявлены локальные участки деталей с превышением температуры эксплуатации. Для исключения дефектов принято решение о введении в конструкцию тепло-

изоляционного материала и защитного экрана, снижающего температуру деталей до приемлемых значений.

Преимуществами выбранной конструкции являются возможность быстрого производства опытных образцов деталей внешнего обвода из ПКМ, низкая стоимость оснастки и быстрота ее изготовления при изменении геометрии детали.

На основе результатов испытаний начались работы по оптимизации конструкции:

- снижение массы (оптимизация укладки и толщины слоев, введение сотового наполнителя [17–20]);

- внедрение в конструкцию внешнего обвода сот с дисперсно-наполненным связующим, обеспечивающим специальные характеристики.

### Список источников

1. Стрельченко В.Е., Резникова М.И., Лезнов С.Н. Применение полимерных композиционных материалов во внешнем обводе реактивного сопла // Молодежь и будущее авиации и космонавтики: Сборник аннотаций конкурсных работ XVI Всероссийского межотраслевого молодежного конкурса научно-технических работ и проектов (18–22 ноября 2024; Москва). М.: Изд-во Перо, 2024. С. 65–66.
2. Miller J. Lockheed Martin F/A-22 Raptor: Stealth Fighter. Aerofax, 2005. 128 p.
3. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. В 5 т. М.: Машиностроение, 2007. 1204 с.
4. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Колесников С.А. и др. Неметаллические композиционные материалы в элементах конструкций и производстве авиационных газотурбинных двигателей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 363 с.
5. Корнейчук А.Н., Волков В.С., Шуль Г.С. и др. Стеклопластиковые сотовые наполнители: достижения и пути развития // Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: Материалы V Всероссийской научно-технической конференции (19 ноября 2021; Москва). М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. С. 21–29.
6. Сиротин Н.Н., Марчуков Е.Ю., Сиротин А.Н. и др. Основы конструирования, производства и эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок в системе CALS технологий. В 3 кн. М.: Наука, 2012. 1069 с.
7. Черноволов Р.А., Гарифуллин М.Ф., Козлов С.И. Валидация процедур проектирования и изготовления динамически подобных моделей летательных аппаратов с применением полимерных композиционных материалов // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 3. С. 102–112.

8. Тимошков П.Н., Колобков А.С., Курносов А.О. и др. Препреги на основе расплавных связующих и ПКМ нового поколения на их основе для изделий авиационной техники // Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: Материалы V Всероссийской научно-технической конференции (19 ноября 2021; Москва). М.: НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, 2021. С. 7-20.
9. Кулагина Г.С., Насонов Ф.А., Железина Г.Ф. и др. Антифрикционные и конструкционные органопластики для элементов конструкции самолетов разработки ОКБ Сухого // Труды ВИАМ. 2025. № 3(145). С. 47-59. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-47-59
10. Laskoski M., Shepherd A., Mahzabeen W., et al. Sustainable, fire-resistant phthalonitrile-based glass fiber composites // Journal of Polymer Science Part A Polymer Chemistry. 2018. Vol. 56. No. 11, pp. 1128-1132. DOI: 10.1002/pola.28989
11. Бондалетова Л.И., Бондалетов В.Г. Полимерные композиционные материалы (часть 1). Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. 111 с.
12. Морозов Е.М. ANSYS в руках инженера. Механика разрушения. М.: Ленанд, 2018. 456 с.
13. ГОСТ Р 57867-2017. Композиты полимерные. Методы определения стойкости на вырыв. М.: Стандартинформ, 2017. 23 с.
14. Белоусов И.С., Железнов Л.П., Бурнышева Т.В. Моделирование испытаний на сжатие слоистых композитов с дефектами в виде расслоения // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 1. С. 93-104.
15. Коношок В.В. Исследование и учет конструктивно-технологических аспектов применения инфузионных технологий при изготовлении композитных деталей авиационного назначения // Гагаринские чтения – 2022: Сборник тезисов работ XLVIII Международной молодежной научной конференции (12–15 апреля 2022; Москва). М.: Изд-во Перо, 2022. С. 533-534.
16. Мелконян Р.В., Насонов Ф.А. Исследование технологических параметров автоматизированных методов выкладки препрегов при производстве деталей и агрегатов из ПКМ // Авиация и космонавтика: Сборник тезисов 21-й Международной конференции (21–25 ноября 2022; Москва). М.: Изд-во Перо, 2022. С. 53-55.
17. Синицын А.Ю., Половый А.О., Мазур В.В. и др. Анализ структуры стеклопластиковой обшивки панели ЗПК с учетом технологии ее изготовления // Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: Материалы V Всероссийской научно-технической конференции (19 ноября 2021; Москва). М.: НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, 2021. С. 158-167.
18. Беззаметнов О.Н., Митрайкин В.И., Халиулин В.И. и др. Исследование стойкости к ударным воздействиям многослойных композиционных конструкций с сотовым наполнителем // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 3. С. 111-125. DOI: 10.34759/vst-2020-3-111-125
19. Рабинский Л.Н., Мартыросов М.И., Дедова Д.В. Поведение плоских панелей с сотовым наполнителем при наличии внутренних дефектов различной формы // Труды МАИ. 2025. № 141. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184493>
20. 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>

## References

1. Strelchenko VE, Reznikova MI, Leznov SN. The use of polymer composite materials in the outer contour of a jet nozzle. *Materialy XVI Vserossiiskogo mezhotraslevogo molodezhnogo konkursa nauchno-tekhnicheskikh rabot i projektov "Molodezh' i budushchee aviatsii i kosmonavtiki" (November 18-22, 2024; Moscow)*. Moscow: Pero; 2024. p. 65-66. (In Russ.).
2. Miller J. *Lockheed Martin F/A-22 Raptor: Stealth Fighter*. Aerofax; 2005. 128 p.
3. Inozemtsev AA, Nihamkin MA, Sandratsky VL. *Gas turbine engines. Fundamentals of the design of aircraft engines and power plants*. Moscow: Mashinostroenie; 2007. 1204 p. (In Russ.).
4. Eliseev YuS, Krymov VV, Kolesnikov SA, et al. *Non-metallic composite materials in structural elements and production of aviation gas turbine engines*. Moscow: BMSTU; 2007. 363 p. (In Russ.).
5. Korneychuk AN, Volkov VS, Shul GS, et al. Fiberglass honeycomb fillers: achievements and development paths. *Materialy V Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Polimernye kompozitsionnye materialy i proizvodstvennye tekhnologii novogo pokoleniya" (November 19, 2021; Moscow)*. Moscow: NITs "Kurchatovskii institut" - VIAM; 2021. p. 21-29. (In Russ.).
6. Sirotin NN, Marchukov EYu, Sirotin AN, et al. *Principles of the aviation gas turbine engines and electric power plants design, production and operation in the system of CALS technologies*. Moscow: Nauka; 2012. 1069 p. (In Russ.).
7. Chernovolov RA, Garifullin MF, Kozlov SI. Validation of designing and manufacturing procedures of aircraft dynamically similar models with polymer composite materials application. *Aerospace MAI Journal*. 2019;26(3):102-112. (In Russ.).
8. Timoshkov PN, Kolobkov AS, Kurnosov AO, et al. Prepregs on the basis of molten binding agents and new generation PCM on their basis for the aviation equipment products. *Materialy V Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Polimernye kompozitsionnye materialy i proizvodstvennye tekhnologii novogo pokoleniya" (November 19, 2021; Moscow)*.

- Moscow: NITs “Kurchatovskii institut” - VIAM; 2021. p. 7-20. (In Russ.).
9. Kulagina GS, Nasonov FA, Zhelezina GF, et al. Antifrictional and structural organoplastics for the structural components of aircraft developed by Sukhoi design bureau. *Trudy VIAM*. 2025(3):47-59. (In Russ.). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-3-47-59
  10. Laskoski M, Shepherd A, Mahzabeen W, et al. Sustainable, fire-resistant phthalonitrile-based glass fiber composites. *Journal of Polymer Science Part A Polymer Chemistry*. 2018;56(11):1128-1132. DOI: 10.1002/pola.28989
  11. Bondaletova LI, Bondaletov VG. *Polymer composite materials (part 1)*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2013. 111 p. (In Russ.).
  12. Morozov EM. *ANSYS in the hands of an engineer. Mechanics of destruction*. Moscow: Lenand; 2018. 456 p. (In Russ.).
  13. *Polymer composites. Test methods for determination of pull-through resistance. State Standard P 57867-2017*. Moscow: Standartinform; 2017. 23 p. (In Russ.).
  14. Belousov IS, Zheleznov LP, Burnysheva TV. Compression Test Simulation of Layered Composites with Delamination. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(1):93-104. (In Russ.).
  15. Konyushok VV. Research and consideration of the structural and technological aspects of the use of infusion technologies in the manufacture of composite parts for aviation purposes. *XLVIII Gagarin Science Conference (April 12-15, 2022; Moscow)*. Moscow: Pero; 2022. p. 533-534. (In Russ.).
  16. Melkonyan RV, Nasonov FA. Investigation of technological parameters of automated methods of laying out prepregs in the manufacturing of parts and assemblies from PCM. *Materialy XXI Mezhdunarodnoi konferentsii “Aviatsiya i kosmonavtika” (November 21-25, 2022; Moscow)*. Moscow: Pero; 2022. p. 53-55. (In Russ.).
  17. Sinitsyn AYu, Polovyi AO, Mazur VV, et al. Analysis of the structure of the fiberglass cladding of the WPC panel, taking into account its manufacturing technology. *Materialy V Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Polimernye kompozitsionnye materialy i proizvodstvennye tekhnologii novogo pokoleniya” (November 19, 2021; Moscow)*. Moscow: NITs “Kurchatovskii institut” - VIAM; 2021. p. 158-167. (In Russ.).
  18. Bezzametnov ON, Mitryaikin VI, Khaliulin VI, et al. Developing technique for impact action resistance determining of the aircraft parts from composites with honeycomb filler. *Aerospace MAI Journal*. 2020;27(3):111-125. (In Russ.). DOI: 10.34759/vst-2020-3-111-125
  19. Rabinskii LN, Martirosov MI, Dedova DV. Behavior of flat panels with honeycomb filler in the presence of internal defects of various shapes. *Trudy MAI*. 2025(141). (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184493>
  20. Kalyagin MY, Rabinskii LN, Shumskaya SA. Study of the influence of porosity on physical and mechanical characteristics of polyimide foams. *Trudy MAI*. 2024(138). (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=182656>

Статья поступила в редакцию / Received 13.10.2025  
Одобрена после рецензирования / Revised 27.11.2025  
Принята к публикации / Accepted 27.11.2025

Редакторы *Е.Л. Мочина, Л.А. Митина*  
Компьютерная верстка *В.В. Крючкова*

Сдано в набор 12.01.2026. Подписано в печать 20.03.2026.  
Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 23,95. Уч.-изд. л. 25,75. Тираж 105 экз. Зак. 724/1464.  
Цена договорная

Издательство МАИ  
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва А-80, ГСП-3 125993  
Типография Издательства МАИ  
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва А-80, ГСП-3 125993