



Научная статья

УДК 620.171.2

URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188833>

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

Анализ влияния технологии изготовления решетки реверсивного устройства авиационного двигателя из отечественных полимерных композиционных материалов на ее механические характеристики

Андрей Михайлович Орлов^{1✉}, Аркадий Витальевич Пашутов²

^{1, 2} Центральный научно-исследовательский институт специального машиностроения (ЦНИИСМ),
Московская область, Хотьково, Российская Федерация

¹ oa.tsniism@inbox.ru✉

Аннотация. В статье рассматривается влияние технологических параметров изготовления и технологической оснастки на прочностные характеристики силовых конструкций из полимерных композиционных материалов. Приводятся расчетные данные и сравнение с опубликованными экспериментальными данными, полученными на модельных образцах решеток реверсивных устройств авиационных двигателей. Представлены обобщающие данные о степени влияния технологических параметров и оснастки на эксплуатационные прочностные характеристики углепластиковых решеток реверсивных устройств.

Ключевые слова: решетки реверса, композитное реверсивное устройство, технология композитных конструкций

Для цитирования: Орлов А.М., Пашутов А.В. Анализ влияния технологии изготовления решетки реверсивного устройства авиационного двигателя из отечественных полимерных композиционных материалов на ее механические характеристики // Вестник Московского авиационного института. 2026. Т. 33. № 3. С. 170-177. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188833>

Original article

Analysis of the Aircraft Engine Reversing Device Lattice from Domestic Polymer Materials Manufacturing Technology Impact on Its Mechanical Characteristics

Andrey M. Orlov^{1✉}, Arkady V Pashutov²

^{1, 2} Central Research Institute for Special Machinery (CRISM), Moscow Region, Khotkovo, Russian Federation

¹ oa.tsniism@inbox.ru✉

Abstract

The article deals with the study of the manufacturing process parameters impact on the strength characteristics of carbon fiber lattices of the aircraft engine thrust reversers. The object of study is a lattice structure from a unidirectional polymer composite material (PCM), which ribs are of a cross-section similar to an aerodynamic profile.

© Орлов А.М., Пашутов А.В., 2026

Basic lattice manufacturing technology involves a layer-by-layer $\square$ wet $\square$ winding, or robotic layup of carbon $\square$ fiber impregnated with a polymer binder in a detachable metal mandrel, followed by thermal curing under compression by elastic matrices. The high coefficient of linear thermal expansion (CLTE) of the elastic matrix material ensures extra material compaction and improved surface quality. Alongside with that, thermal expansion of the matrices leads to a change in the rib cross-sectional geometry up to 20% of the nominal value, which can be considered formally a critical deviation from design documentation requirements.

Two key technological factors are considered. The $\square$ rst one is the effect of geometric deviations in rib cross-sections caused by the thermo-compressive impact of the elastic tooling. It has been demonstrated analytically that, since the amount of the reinforcing $\square$ fiber in the cross-section remains constant, a decrease in the cross-sectional area is being accompanied by a proportional increase in the material tensile strength. Computing of actual areas values confirm the local strength increase by 21.3%. The safety factors herewith at the tension-compression and bending remain unchanged. The extra compaction reduces porosity and ensures a more regular distribution of reinforcing $\square$ fibers, as confirmed by comparative tests of the samples manufactured with elastic and metal tooling.

The second considered factor is the binder content impact on the mechanical properties of the structure. It has been demonstrated that the traditional method for the binder mass fraction determining for a whole (untrimmed) workpiece introduces systematic error due to the differences in the structure and reinforcement ratio in the working and process zones. A refined approach that suggests determining the binder content for the workpiece with trimmed technological zones by computing was proposed. For the reversing lattice under study, the average binder content for twelve workpieces was 54.12% for the workpiece with the trimmed process zones, with a maximum deviation of 1.96%, while for the untrimmed process zones it was 52.12%, with a deviation of 5.78%.

The impact of the process factors on the structural strength was assessed by the strength testing method on structurally similar lattice elements (SSLE), developed at the JSC TsNIISM. This method involves physical and mechanical properties determining of the material by the model samples, computing the stress-strain state of the full-scale structure, and verifying the results through the SSME testing.

By the results of the study, the authors drew inference that the determining factor of the lattice structures was the amount of reinforcing material at the ribs cross-section rather than the layup technological structure. Geometric deviations due to the manufacturing process do not affect have a significant negative impact on the structure strength. The proposed approach to the binder mass fraction determining improves the quality control accuracy and stability of the mass production process for reversing device lattices.

Keywords: reversing device lattice, composite reversing device, composite structures technology

For citation: Orlov A.M., Pashutov A.V. Analysis of the Aircraft Engine Reversing Device Lattice from Domestic Polymer Materials Manufacturing Technology Impact on Its Mechanical Characteristics. *Aerospace MAI Journal*. 2026;33(3):170-177. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188833>

List of Figures

Fig. 1. General view of the reverse device grid section

Fig. 2. Workpiece elements layout

Fig. 3. Photo of the winded grid workpiece after curing

Fig. 4. Photo of the workpiece with the technological zone cut off

1. Введение

Конструктивные элементы из армированных полимерных композиционных материалов (ПКМ) находят все более широкое применение в авиационной технике и новых летательных аппаратах [1–3], создающихся в России. Одной из реализаций применения углепластиков с непрерывным армированием однонаправленными жгутами является конструкция решетки реверсивного устройства, состоящая из большого количества пересекающихся однонаправленных ребер, часть которых имеет сложную форму сечения, близкую к аэродинамической форме сечения крыла летательного аппарата (рис. 1) [4–8].

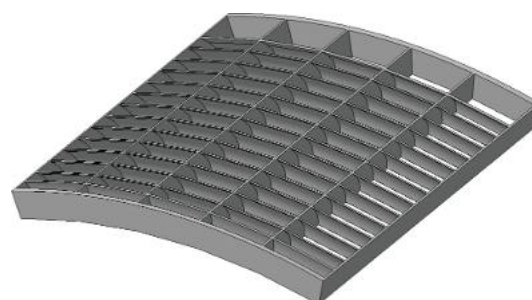


Рис. 1. Общий вид корпуса секции решетки

К конструкциям такого рода, имеющим сетчатую структуру [9–11], выполненным из однонаправленного ПКМ, предъявляются повышенные требования по прочности, качеству оформления сложнопрофильных поверхностей, в то время как на механические характеристики материала и поведение конструкции при эксплуатационном нагружении ощутимое влияние оказывают технологические особенности [12–14] изготовления решеток реверсивных устройств.

Среди рассматриваемых в работе технологических факторов влияния выделим следующие: термокомпрессионное воздействие эластичных формообразующих элементов оснастки и параметры пропитки углеродных наполнителей. Работа заключается в анализе степени их влияния на итоговую прочность и работоспособность рассматриваемой конструкции.

2. Постановка задачи

Базовая технология изготовления рассматриваемых решеток реверсивных устройств заключается в формовании изделия однонаправленным непрерывным углеродным волокном, пропитанным полимерным связующим, в сложной разборной металлической формообразующей оправке с пазами с последующей термообработкой и отверждением в условиях обжата эластичными матрицами. Послойное формование изделия происходит при помощи автоматизированной «мокрой» намотки или роботизированного комплекса «мокрой» выкладки. Обжатие происходит за счет высокого значения коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР) материала эластичных матриц, близкого к КЛТР реактопластичных связующих и превышающего КЛТР металлических сплавов и углепластика в несколько раз. Такое температурное объемное расширение при термообработке приводит к дополнительному уплотнению материала создаваемой конструкции и повышению качества поверхности [15]. Однако в связи с температурным расширением исходного контура эластичных матриц происходит изменение геометрических параметров создаваемых ребер сетчатой структуры решетки с изменением толщин ребер до 20% [16], что может являться критическим отклонением от проектных геометрических параметров изделия. При этом количество армирующего волокна остается постоянным: изменение геометрии сечений ребер связано только с перераспределением положения волокон в сечении, а образующийся излишек связующего выдавливается на поверхность заготовки. В связи с этим актуален вопрос подтверждения прочностных характеристик решетки реверсивного устройства при изменении геометрических параме-

тров и структурной схемы распределения волокон армирующих углеродных нитей по отношению к заданной схеме армирования.

Второй важнейшей решаемой задачей [17, 18] при создании технологии изготовления сложнопрофильных конструкций типа решеток реверсивных устройств авиационных газотурбинных двигателей была проблема выбора исходных компонентов материалов – углеволокна и связующего, а также выбор оптимальных параметров пропитки, намотки и способов определения содержания связующего, являющегося параметром, обратно пропорциональным коэффициенту армирования композитного материала.

Проблемным вопросом для сетчатых решеток, получаемых методом послойной выкладки (намотки) пропитанной нити, является правильность определения массового процентного содержания связующего. Дело в том, что локально определяемые значения данного параметра заметно различаются по отдельным зонам заготовки. Поэтому для оценки качества заготовки в целом пользуются некоторой усредненной величиной массовой доли, правила определения которой в целом никак не регламентированы.

3. Методы

Для решения задачи по перераспределению армирующих нитей в схеме армирования использованы конструктивно подобные модели сложнопрофильного сетчатого изделия, описанные в работах [16–20]. Для определения запаса прочности продольного ребра решетки оценивается влияние отклонения геометрических параметров, возможное из-за технологических особенностей производства изделия.

При условии жесткого закрепления решетки каркаса из углепластика по фланцевым поверхностям и действия на нее только аэродинамических нагрузок, напряжениями, определяющими запас прочности ребер решетки, являются нормальные напряжения, действующие в направлении оси ребра, т. е. соосно направлению армирования однонаправленного композитного углепластика. Таким образом, ребра сетчатого каркаса решетки реверсивного устройства находятся в состоянии растяжения–сжатия и изгиба в плоскости стенок ребер.

В силу того, что количество армирующего материала, определяющего прочностные характеристики композита в указанном направлении, оказывается одинаковым как в ребре с номинальными размерами сечения, так и в ребре с отклонениями этих размеров, предел прочности материала ребра уменьшенного сечения $\bar{\sigma}_1$ можно оценить с до-

статочной для практических расчетов точностью следующим образом:

$$\bar{\sigma}_1 = \frac{F_0}{F} \bar{\sigma}_1^0, \quad (1)$$

где F_0 — номинальная площадь сечения продольного ребра; F — площадь сечения с отклонениями формы от требований конструкторской документации (КД); $\bar{\sigma}_1^0$ — предел прочности при растяжении (сжатии) материала ребра, изготовленного в соответствии с требованиями КД.

Подставляя в соотношение (1) фактические значения площадей $F_0 = 212 \text{ мм}^2$, $F = 174,8 \text{ мм}^2$, можно установить, что описанное отклонение размеров сечения от номинального значения приводит к локальному увеличению прочности материала в этом сечении на 21,3%. Такое увеличение прочности может быть расценено как «кажущееся», однако именно дополнительное уплотнение приводит к более регулярной структуре распределения арматуры по сечению композита, снижает пористость и выравнивает по оси углеродные нити, что и приводит к реальному увеличению запаса прочности [15].

Оценка влияния отклонения размеров сечения на величину запаса прочности при совместном растяжении-сжатии и изгибе ребра в плоскости стенки может быть произведена с помощью известных соотношений уравнений строительной механики в инженерной постановке. В результате получим следующие выражения для компонентов нормальных напряжений в рассматриваемом сечении:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_{\text{изг.}X} &= \bar{\sigma}_{\text{изг.}X}^0 \frac{\delta}{\delta^*}; \\ \bar{\sigma} &= \bar{\sigma}^0 \frac{\delta}{\delta^*}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\bar{\sigma}_{\text{изг.}X}$, $\bar{\sigma}_{\text{изг.}X}^0$ — действующие изгибные напряжения относительно оси X сечения ребра с отклонениями формы от требований КД и с номинальным размером соответственно; $\bar{\sigma}$, $\bar{\sigma}^0$ — действующие напряжения растяжения (сжатия) в сечении ребра с отклонениями формы от требований КД и с номинальным размером соответственно.

Принимая во внимание выражение (1), можно установить, что соответствующие напряжениям (2) коэффициенты запаса прочности составят:

$$\begin{aligned} n_{\text{изг.}X}^* &= n_{\text{изг.}X}^0; \\ n^* &= n^0. \end{aligned}$$

Таким образом, запасы прочности рассматриваемой конструкции решетки реверсивного устройства при полученных фактических отклонениях размеров сечения ребра остаются неизменны.

Для подтверждения таких теоретических выводов о локальном повышении прочности в зоне утоненных ребер в работах [16, 19] приведены экспериментальные результаты сравнительных испытаний по определению предела прочности при растяжении и модулей упругости материалов ребер. Испытания проводились на образцах двух типов, вырезанных из конструктивно подобных сложнопрофильному изделию моделей, изготовленных с одинаковой схемой армирования, но с разным формообразованием. Первая конструктивно подобная модель была изготовлена на оснастке с эластичными, а вторая — с металлическими формообразующими элементами.

Рассмотрим метод анализа отклонений количества наноса связующего на механические характеристики решетки реверсивного устройства. На рис. 2 схематично показано деление заготовки решетки реверса после намотки на рабочую и технологическую зоны, а на рис. 3 и 4 приведены фотографии отвержденной заготовки после намотки и заготовки с обрезанной технологической зоной. Необходимо отметить принципиальное отличие рабочей зоны от технологической. В рабочей зоне углеродные нити строго упорядочены в формообразующей оснастке, которая состоит из пересекающихся каналов, имеющих форму аэродинамических профилей. В технологических зонах отсутствуют формообразующие каналы, в них осуществляется разворот углеродной нити и обеспечивается непрерывность процесса намотки.

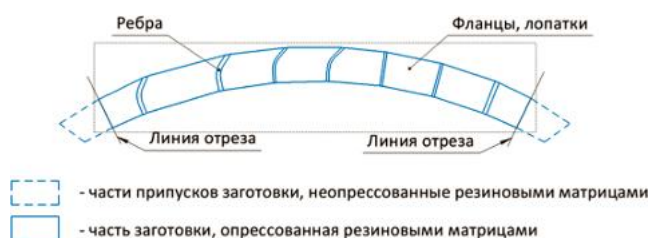


Рис. 2. Схема расположения элементов заготовки

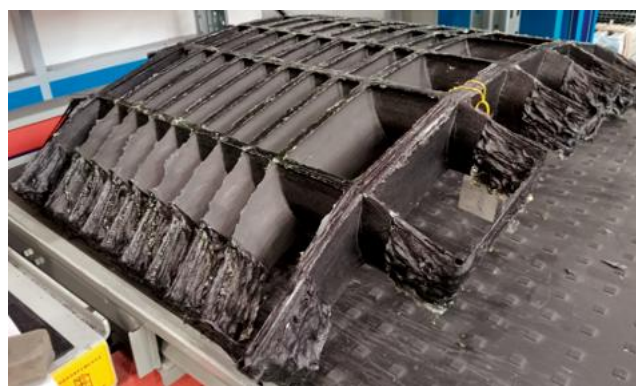


Рис. 3. Фотография отвержденной заготовки после намотки

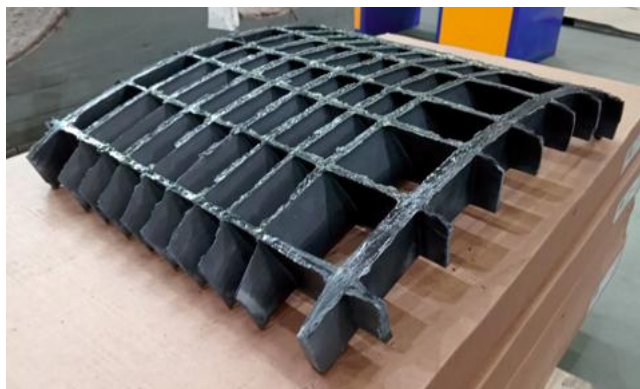


Рис. 4. Фотография заготовки с обрезанной технологической зоной

Ввиду указанных особенностей технологии изготовления зона технологического припуска, находящаяся за пределами матрицы формующего модуля, отличается как структурой, так и коэффициентом армирования материала.

Введем следующие обозначения:

m_0 — масса целой (необрезанной) заготовки, кг;

m_1 — масса заготовки с обрезанными неопресованными частями припусков, кг;

L_0 — расчетная длина нити, расходуемой на изготовление заготовки массой m_0 , м;

L_1 — расчетная длина нити, расходуемой на изготовление заготовки массой m_1 , м;

m_{H0} — масса нити длиной L_0 , кг;

m_{H1} — масса нити длиной L_1 , кг;

T — линейная плотность нити, г/км;

ω_0 — массовая доля связующего, рассчитанная для целой заготовки с массой m_0 ;

ω_1 — массовая доля связующего, рассчитанная для обрезанной заготовки с массой m_1 .

Масса нити прямо пропорциональна ее длине:

$$m_{H0} = T \cdot L_0;$$

$$m_{H1} = T \cdot L_1.$$

В условиях серийного производства сложно-профильных деталей, имеющих сравнительно небольшие «технологические зоны» при определении массовой доли связующего, используется соотношение:

$$\omega_0 = \frac{m_0 - m_{H0}}{m_0} \cdot 100\%. \quad (3)$$

При этом единственным преимуществом применения такого подхода является его малая трудоемкость и простота, поскольку величины m_0 и m_{H0} определяются прямым взвешиванием.

Понятно, что этот метод подразумевает погрешность, поскольку по существу определяется ω_0 усредненная с учетом и технологической зоны. Также величина этой погрешности может быть разной для

разных секций решеток реверсивных устройств, отличающихся размером и конструктивом.

Следует еще отметить, что содержание связующего в рабочей зоне решетки реверса также неравномерно. Имеются ярко выраженные зоны с отличающейся структурой наполнителя — это участки аэродинамических профилей и перегородок с четко однонаправленной структурой укладки нитей и участки пересечения профилей и перегородок, где структура определяется пересекающимися под прямым углом чередующимися нитями используемого наполнителя.

То есть представляется целесообразным оценку стабильности технологии и характеристик исходных материалов проводить с использованием данных по определенной величине содержания связующего в объеме заготовки с обрезанными технологическими зонами, исключив погрешности и влияние технологических зон.

В работе [17] приводятся экспериментальные данные на примере 12 изготовленных сложно-профильных заготовок решеток РУ. Средняя величина ω_0 по 12 заготовкам составила 52,12%, а относительная величина отклонения ω_0 от минимального до максимального значения составила 3,01, т. е. 5,78%.

Для обрезанной заготовки расчет величины массовой доли связующего проводится по формуле

$$\omega_1 = \frac{1 - m_{H1}}{m_1} \cdot 100\%. \quad (4)$$

Очевидно, что величина m_{H1} может быть определена только расчетным путем:

$$m_{H1} = L_1 \cdot T. \quad (5)$$

Общая длина нитяного наполнителя определяется на основании следующих исходных данных:

1. В обрезанной заготовке известна геометрия поперечного сечения всех пересекающихся каналов как аэродинамического, так и прямоугольного профиля.

2. Известны длины этих каналов, которые меняются по высоте заготовки.

3. Известно общее количество проходов нити по каналам.

Влияние перечисленных здесь технологических факторов на прочность решеток реверсивных устройств оценивается при помощи разработанного в АО «ЦНИИСМ» метода прочностной отработки сложнопрофильных интегральных конструкций из КМ, предназначенных для управления газовоздушными потоками, на модельных образцах [19].

В основу метода заложен следующий алгоритм подтверждения прочностных и жесткостных характеристик натурной конструкции:

1. Определение физико-механических характеристик (ФМХ) материала на образцах, вырезанных из специально изготовленных плоских плит и модельных (конструктивно подобных) сетчатых элементов (КПСЭ), изготовленных по технологии, близкой к технологии изготовления натуральных сетчатых конструкций (НСК).

2. Проведение теоретического расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) натурной сетчатой конструкции, основываясь на ФМХ, определенных по п. 1.

3. Проведение испытаний конструктивно подобных сетчатых элементов на определение конструкционной прочности для оценки корректности теоретических расчетов натурной конструкции.

4. Анализ результатов

Полученные в работе [16] результаты расчета запасов прочности свидетельствуют, что отношение действующего напряжения при растяжении в сечении ребра с отклонениями формы от требований конструкторской документации к значению напряжений растяжения ребер с номинальными размерами составляет 1,173, а отношение отклонений геометрических параметров не превышает 17%, что подтверждает возможность пренебрежения отклонениями формы ребра при проведении оценочных или проектировочных расчетов.

Перейдем к анализу наполнения ребер армирующего наполнителя связующим. Используя условие равномерного заполнения поперечного сечения каналов, определяется L_1 . При этом используется допущение, что при отверждении заготовки прямолинейность линий укладки нити, обеспеченная нормированным натяжением в отдельном механизме при выкладке, не нарушается. Данное допущение подтверждено при изготовлении модельных образцов на прямоугольной оправке.

Также при расчете учтено удлинение углениги от указанных усилий при применении отпускового механизма.

В результате расчета для рассматриваемой решетки получено $L_1 = 3008$ м при $T = 760$ г/км.

Среднее значение массовой доли связующего для обрезанной заготовки составило 54,12%, максимальное отклонение для 12 заготовок в значениях составило 1,96.

Применяемый метод прочностной отработки конструкций [19] на основе результатов прочностных испытаний модельных (конструктивно подобных) сетчатых элементов и использование полученных данных в расчете натурной конструкции, способствует снижению стоимости при отработке и испытаниях конструкций аэродинамического профиля.

Выводы

По результатам проведенных оценочных исследований можно сделать вывод о том, что предлагаемый подход может позволить исключить или значительно уменьшить влияние технологической зоны на значения массовой доли связующего в решетках РУ. При этом обоснованный выбор параметра L_1 с возможным введением поправочных коэффициентов должен производиться на этапе опытно-конструкторских работ с проведением дополнительных исследований и уточнений влияния рассмотренных факторов и соответствующей проверкой результатов определения массовой доли связующего традиционными химическими (выжигание, вытравливание и пр.) методами на образцах из деталей для каждого типоразмера решетки реверса или другого сложнопрофильного изделия, получаемого методом непрерывной «мокрой» намотки.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что определяющим фактором прочностных характеристик решетчатых конструкций реверсивных устройств является количество армирующего материала в сечении ребер, а не его структура. Незначительные изменения геометрического профиля, обусловленные особенностями технологии изготовления, не оказывают существенного влияния на прочность элементов конструкций решеток реверсивных устройств.

Конфликт интересов / Conflict of Interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no relevant conflict of interests

Список источников / References

1. Gebrehiwet L. A Review on Aerospace Thrust Reversers Designs and Classifications. *International Journal of Trendy Research in Engineering and Technology*. 2024;9(2):72-79. DOI: 10.54473/IJTRET.2025.9207

2. 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>
Leznov SN, Reznikova MI, Strelchenko VE. Polymer Composite Materials Application in the Jet Nozzle Outer Contour. *Aerospace MAI Journal*. 2026;33(1):200–206. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=187590>
3. Гринев М.А., Копысов Д.В., Пашкова М.Ю. и др. Способ изготовления секций несущей решетки реверсера тяги. Патент RU 2663249 C1. Бюл. № 22, 03.08.2018.
Grinev MA, Kopysov DV, Pashkova MYu, et al. *Method for manufacturing sections of a thrust reverser bearing grid*. Patent RU 2663249 C1. Bull. 22, 03.08.2018. (In Russ.).
4. Tian F, He J, Xiong Y, et al. Analysis and simulation on two types of thrust reversers in an aircraft engine. *MATEC Web of Conferences*. 2017;119:01012. DOI: 10.1051/mateconf/201711901012
5. Strash DJ, Frank JH, Standish R, et al. Aerodynamic Analysis of an Installed Thrust Reverser. *Journal of Propulsion and Power*. 2000;16(1):10–15. DOI: 10.2514/2.5557
6. Liu C, Deng J, Su S. Design of Loading System for Thrust Reverser Ground Simulation Test. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2018;170(4):042093. DOI: 10.1088/1755-1315/170/4/042093
7. Xu HC, Pan Y, Xiong YX, et al. Comparative study on two civil engine thrust reversers for their maintainability analysis. *MATEC Web of Conferences*. 2018;169(11):01026. DOI: 10.1051/mateconf/201816901026
8. Akshita SK, Sanskar N, Shubham P, et al. Aerodynamic Analysis of Thrust Reversal Mechanisms. *International Scientific Journal of Engineering and Management*. 2025;04(03):1–7.
9. Склезнев А.А. Сетчатые композитные конструкции □ текущее состояние исследований и разработок в России и мире // Космические аппараты и технологии. 2024. Т. 8. № 4(50). С. 222–232.
Skleznev AA. Lattice Composite Structures □ Current State of Research and Development in Russia and the World. *Spacecrafts & Technologies*. 2024;8(4):222–232. (In Russ.).
10. Hegen GH, Kooi JW. Investigation of Aircraft Performance with Deployed Thrust Reversers in DNW. *41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit* DOI: 10.2514/6.2005-3702
11. Segall RN, Gardner MK. Design and Certification of the Quiet Technology Aerospace Thrust Reverser Upgrade for Honeywell HTF7000 Engines on Business Jet Aircraft. *AIAA AVIATION Forum (June 18-12, 2026; Manchester Grand Hyatt, San Diego, California)*. DOI: 10.2514/6.2026-4315
12. Склезнев А.А. Технологическая механика изготовления полимерного композитного топливного бака летательного аппарата с несущей стенкой // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред: Сборник трудов 15-й Всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского (02–04 декабря 2025; Москва). М.: Сам Полиграфист, 2025. С.153–157. DOI: 10.33113/conf.mkmk.ras.2025.19
Skleznev AA. Technological mechanics of manufacturing a polymer composite fuel tank for an aircraft with a load-bearing wall. *Materialy 15 Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem im. IF. Obratsova i YuG. Yanovskogo □ Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktii, slozhnykh i heterogennykh sred □ (December 02–04, 2025; Moscow)*. Moscow: Sam Poligrafist; 2025. p. 153–157. (In Russ.). DOI: 10.33113/conf.mkmk.ras.2025.19
13. Gonzalez-Ruiz E, Mahmood T, Sethi V, et al. Design Feasibility of Annular Target Thrust Reversers. *ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition (June 11–15, 2012; Copenhagen, Denmark)*. DOI:10.1115/GT2012-68810
14. Витренко О.С., Шарков О.В. Исследование влияния технологии изготовления на точность зубчатых передач летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 4. С. 222–229.
Vitrenko OS, Sharkov OV. Studying Manufacturing Technology Impact on the Aircraft Gear Transmission Accuracy. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(4):222–229. (In Russ.).
15. Склезнев А.А., Бабичев А.А., Разин А.Ф. Исследование взаимного влияния заготовки изделия из полимерного композиционного материала и технологической оправки друг на друга в процессе изготовления при температурной обработке // Южно-Сибирский научный вестник. 2023. № 1(47). С. 56–60. DOI: 10.25699/SSSB.2023.47.1.007
Skleznev AA, Babichev AA, Razin AF. The Mutual Influence Investigation of a Composite Polymer Material Workpiece and a Technological Mandrel During the Manufacturing Process Temperature Treatment. *South-Siberian Scientific Bulletin*. 2023;47(1):56–60. (In Russ.). DOI: 10.25699/SSSB.2023.47.1.007
16. Кульков А.А., Папутов А.В., Каледин В.О. и др. Влияние термокомпрессии эластичных формообразующих элементов оснастки на геометрические параметры и прочностные характеристики однонаправленного материала на основе углеродного волокна в составе сложнопрофильной конструкции // Вопросы оборонной техники: Научно-технический сборник. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. М.: НТЦ «Информтехника», 2018. № 3(190). С. 62–65.
Kulkov AA, Pashutov AV, Kaledin VO, et al. The Influence of Thermocompression of Elastic Molding Elements of Equipment on the Geometric Parameters and Strength Characteristics of a Unidirectional Carbon Fiber-Based Material in a Complex-Profile Structure. *Nauchno-tehnicheskii sbornik □ Voprosi oboronnoi tekhniki □. Seriya 15. Kompozitsionnye nemetallicheskie materialy v mashinostroenii*. Moscow: Informtehnika; 2018(3):62–65. (In Russ.).

17. Базарко А.Н., Бородин Е.О., Воронов Б.В. и др. О выборе параметров пропитки углеродных наполнителей и особенностях определения массовой доли содержания связующего в сложнопрофильных конструкциях, получаемых методом «мокрой» намотки // Вопросы оборонной техники: Научно-технический сборник. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. М.: Изд-во «Красная Звезда», 2024. № 3(212). С. 53-60.
Bazarko AN, Borodina EO, Voronov BV, et al. On The Selection of Impregnation Parameters for Carbon Fillers and the Specifics Of Determining the Mass Fraction of the Binder Content in Complex-Shaped Structures Obtained by the Wet Winding Method. *Nauchno-tehnicheskii sbornik Voprosi oboronnoi tekhniki. Seriya 15. Kompozitsionnye nemetallicheskie materialy v mashinostroyenii*. Moscow: Krasnaya Zvezda. 2024(3):53-60. (In Russ.).
18. Пузырецкий Е.А., Хамидуллин О.Л., Шабалин Л.П. и др. Методика испытания ненасыщенной проницаемости преформ композиционного материала на основе анализа объемного расхода жидкости // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 4. С. 95-102.
Puziretskiy EA, Khamidullin OL, Shabalin LP, et al. A Technique for the Composite Materials Preforms Unsaturated Permeability Testing Based on the Voluminous Liquid Flow Rate Analysis. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(4):95-102. (In Russ.).
19. Кульков А.А., Пашутов А.В., Баранов С.В. и др. Опыт прочностной отработки сложнопрофильных конструкций из композиционных материалов, предназначенных для управления газоздушными потоками, на модельных образцах // Вопросы оборонной техники: Научно-технический сборник. Сер. 15. Композиционные неметаллические материалы в машиностроении. М.: НТЦ «Информтехника», 2018. № 2(189). С. 13-16.
Kulkov AA, Pashutov AV, Baranov SV, et al. Experience in Strength Testing of Complex-Profile Structures Made of Composite Materials Intended for Controlling Gas-Air Flows, Using Model Samples. *Nauchno-tehnicheskii sbornik Voprosi oboronnoi tekhniki. Seriya 15. Kompozitsionnye nemetallicheskie materialy v mashinostroyenii*. Moscow: Informtehnika; 2018;2(189):13-16. (In Russ.).
20. Kale A, Zaware P, Madavi P, et al. Working Model of Thrust Reverser: Mechanical Blockage. *International Scientific Journal of Engineering and Management*. 2025;04(04). DOI: 10.55041/ISJEM02623

Статья поступила в редакцию / Received 01.06.2026
Одобрена после рецензирования / Revised 11.06.2026
Принята к публикации / Accepted 18.06.2026