

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАМЕНЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ КОМПОЗИЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Д.В. Кононова

kononovadv@bk.ru

Ф.А. Сабуров

fyodor.saburov.01@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Обоснована возможность замены металлических сплавов композиционными материалами при изготовлении деталей авиа- и ракетно-космической техники. Проанализированы свойства композиционных материалов, показано преимущество композиционных материалов по сравнению с металлами и их сплавами. С помощью системы автоматизированного проектирования SolidWorks созданы 3D-модели деталей, используемых для нахождения параметров, необходимых для дальнейшего исследования. Для оценки эффективности применения новых материалов предложен коэффициент, показывающий экономическую и технологическую целесообразность замены. Результаты исследования свидетельствуют о том, что использование композитов может снизить материальные затраты на производство деталей аэрокосмической техники, а также в разы повысить их прочностные характеристики.

Ключевые слова

Композиционные материалы, углепластик, стеклопластик, аэрокосмическая техника, ракетно-космическая техника, авиастроение, прочность изделий

Поступила в редакцию 01.06.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Введение. Изготовление деталей аэрокосмической техники связано с необходимостью обеспечения высокой прочности изделий при их сравнительно небольшом весе. Материалы, используемые при изготовлении изделий ракетно-космической техники (РКТ), должны обладать повышенной механической прочностью, малой массой, устойчивостью к различным видам воздействий, коррозионной стойкостью, а также способностью сохранять свои свойства при экстремальных температурах. Для внутренних конструкций летательных аппаратов чрезвычайно важны негорючесть, химическая инертность, высокая звуко- и теплоизолирующая способность [1, 2].

На данный момент металлы служат в качестве основных конструкционных материалов для изделий РКТ, их масса в массе сухих изделий составляет более 90 % [3]. Однако повышение прочности металлических сплавов традиционными методами (увеличением содержания легирующих элементов, улучшением

технологий термомеханического упрочнения) к настоящему времени исчерпало свои возможности. Современные сплавы содержат большое количество дорогостоящих и редких металлов: кобальта, вольфрама, ниобия, молибдена, никеля и др., что резко повышает их стоимость. Кроме того, значительное увеличение количества легирующих элементов в сплавах приводит к зональной и объемной ликвации в слитках и, как следствие, к анизотропии свойств заготовок и деталей из них [3].

Цель данной работы — обосновать эффективность замены традиционных материалов композиционными материалами (КМ), которые способны удовлетворять поставленным требованиям при большей удельной прочности и меньших затратах на производство. В ходе работы:

- созданы 3D-модели для получения данных о площади поверхности и объеме исследуемой детали;
- введен новый коэффициент, позволяющий наглядно оценить преимущества КМ перед металлическими сплавами.

Применение композиционных материалов в деталях ракетно-космической техники. В результате экспериментальных исследований и летных испытаний было установлено, что применение КМ в производстве деталей РКТ позволяет снизить массу конструкции летательного аппарата на 30...40 % по сравнению с массой планера из традиционных металлических материалов [4]. Все это обеспечивает получение резерва по массе, который можно использовать для увеличения дальности полета или полезной нагрузки. Применение КМ в авиационной промышленности позволяет уменьшить материалоемкость конструкций, в результате чего уменьшается количество применяемой оснастки, а коэффициент использования материала увеличивается до 90 %.

В настоящее время растет число исследований в области применения композитов в конструкциях изделий авиа- и ракетно-космической техники. Первоначально КМ применялись в конструкциях ракет во вторичной структуре — обтекатели, небольшие и малонагруженные участки фюзеляжа и другие неотвечественные элементы. По мере развития технологий объем использования КМ для первичных структур, таких как топливные баки, трубопроводы, сосуды давления, шпангоуты, увеличился. Рост объема применения композиционных материалов на примере изделий из углеволокна в различных сферах, в том числе и РКТ, продемонстрирован на рис. 1. По мнению большинства консалтинговых компаний, наблюдается непрерывный рост мирового рынка полимерных композиционных материалов (ПКМ) [5]. Его объем, по разным оценкам, составил в 2019 г. 90,6–93,6 млрд долл. США и 12,0 млн т в натуральном выражении. Совокупный среднегодовой темп роста прогнозируется в диапазоне от 4 до 7,7 %, что до 2024 г. должно обеспечить объем рынка на уровне 103–131,6 млрд долл. и 13–14 млн т.

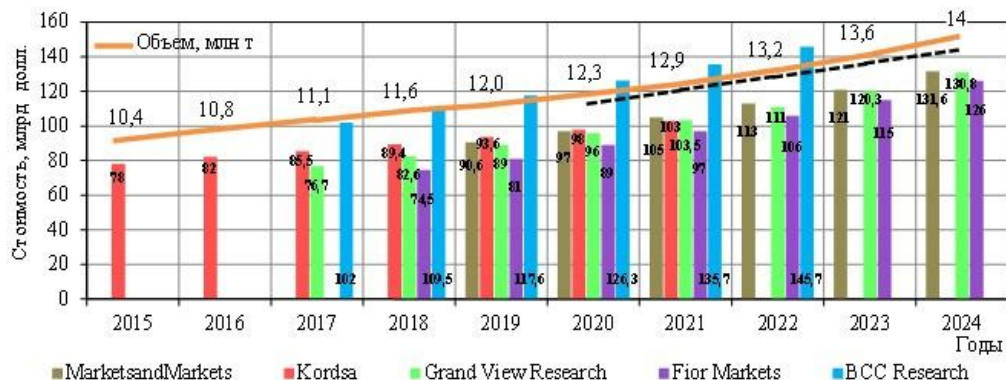


Рис. 1. Оценка мирового рынка полимерных композиционных материалов по данным различных консалтинговых компаний

Анализ материалов, используемых в ракетно-космической технике. В качестве образца, на примере которого проводилось данное исследование, была выбрана лопатка импеллера беспилотного летательного аппарата (рис. 2). Использование металлов в таких конструкциях давно является стандартной практикой, однако в последние годы все чаще встречаются работы, посвященные замене металлических лопаток композитными [6].

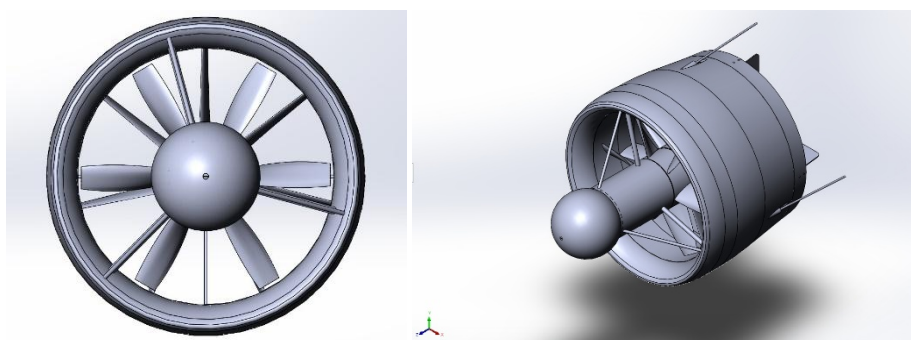


Рис. 2. 3D-модель импеллера беспилотного летательного аппарата

Выбор материала для изготовления таких ответственных элементов, которые преобразовывают механическую работу в кинетическую энергию, определяется рабочим диапазоном температур, а также требуемыми физическими и механическими свойствами, включая предел прочности, пластичность при растяжении, ползучесть, вязкость разрушения, сопротивление распространению трещины, сопротивление многоциклового усталости.

На сегодняшний день лопатки беспилотных летательных аппаратов изготавливают из жаропрочных сплавов на никель-хромовой и никель-хром-кобальтовой основе, легированных Ti, Mo, W, Nb, Zr, B, V, Y, Hf, La, Re, Ta

и другими элементами. Содержание тугоплавких металлов, таких как Nb, Mo, Ta, W, Re, для большинства рассматриваемых сплавов превышает 10 %, а суммарное содержание Al и Ti находится в диапазоне 6...8 %. Благодаря упрочнению по твердорастворному и дисперсионному механизму такой состав обеспечивает достижение высокого значения сопротивления ползучести. Содержание кобальта относительно высоко и находится в диапазоне 8...20 %. Кобальт способствует упрочнению сплава по твердорастворному механизму [7].

Сравнительный анализ композиционных материалов и металлических сплавов. Одним из основных исследуемых параметров была выбрана удельная прочность, которая характеризует массовую выгодность материала (табл. 1). Чем больше удельная прочность, тем меньшую массу может иметь элемент конструкции, работающий на растяжение или сжатие.

Таблица 1. Физические свойства некоторых материалов, использующихся для изготовления деталей аэрокосмической техники

Материал	Предел прочности σ_n , МПа	Плотность ρ , кг/м ³	Удельная прочность σ_n/ρ , м ² /с ²
Алюминиевый сплав (АМг6)	400	2660	0,152
Титановый сплав (BT23)	1600	4443	0,360
Нержавеющая сталь (12Х18Н10Т)	650	7920	0,082
Органопластик	1500	1200	1,250
Стеклопластик	1700	1600	1,063
Углепластик	1700	1300	1,308
Бороалюминий	800	750	1,067

Для оценки массы и стоимости детали была создана 3D-модель в программе SolidWorks (рис. 3). С ее помощью были получены значения объема и площади поверхности лопатки, необходимые для определения расхода материала при изготовлении данной детали. Они получились равными

$$V = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3; S = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-3}.$$

На основе полученных данных для каждого материала была вычислена масса детали по формуле

$$m = \rho V,$$

где ρ — плотность материала; V — объем детали, вычисленный в программе SolidWorks. Для расчета массы детали из композиционных материалов был принят объем V оболочки толщиной 0,5 мм.

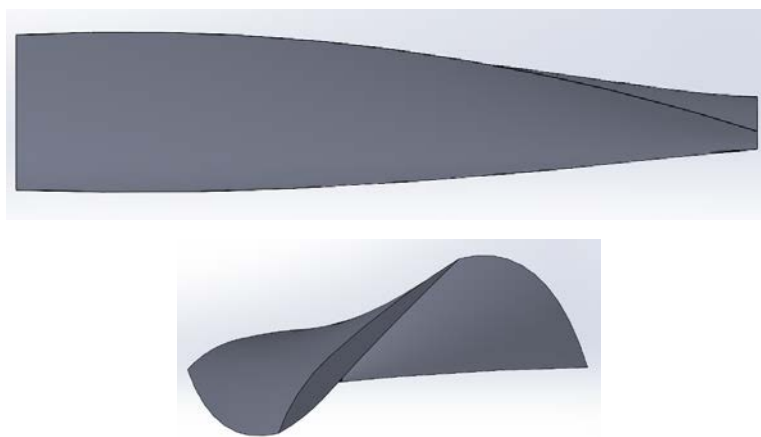


Рис. 3. Перо лопатки импеллера

Далее для каждого материала была рассчитана итоговая стоимость детали I , равная произведению стоимости одного килограмма материала на массу детали для металлических сплавов или произведению стоимости одного квадратного метра материала на площадь поверхности детали для композиционных материалов.

Для металлических сплавов

$$I = I_0 m,$$

где I_0 — стоимость 1 кг материала, m — масса детали.

Для композиционных материалов:

$$I = I_1 S,$$

где I_1 — стоимость 1 м² материала; S — площадь поверхности детали, вычисленная в программе SolidWorks.

Финальная оценка массовой и экономической выгоды рассматриваемых материалов проводилось при помощи введенного коэффициента α :

$$\alpha = mI,$$

где m — масса изготавливаемой детали; I — итоговая стоимость.

Таким образом, лопатка из материала с наименьшим коэффициентом α обладает меньшими массой и стоимостью одновременно, а следовательно, данный материал является наиболее выгодным при изготовлении рассматриваемой детали. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Из данных, представленных в табл. 2, видно, что при использовании композитов производство массы детали на ее итоговую стоимость на порядок меньше, чем при использовании металлических сплавов.

Таблица 2. Определение коэффициента α рассматриваемых материалов

Материал	Плотность ρ , кг/м ³	Стоимость 1 кг материала I_0 , руб./кг	Стоимость 1 м ² материала I_1 , руб./м ²	Масса лопатки m_p , г	Итоговая стоимость лопатки S , руб.	α , г · руб.
Стеклопластик	2 120	н/д	400	11,34	4,11	46,63
Углепластик	1 600	н/д	2 900	8,68	29,81	258,88
АД31	2 710	150	н/д	59,67	8,95	534,15
Д12	2 720	150	н/д	59,89	8,98	538,10
АВ	2 700	220	н/д	59,45	13,08	777,65
АЛ4	2 650	242	н/д	58,35	14,12	824,03
АЛ9	2 660	242	н/д	58,57	14,17	830,26
Д16	2 780	228	н/д	61,22	13,96	854,40
АД1	2 800	229	н/д	61,66	14,12	870,53
АМГ4	2 660	279	н/д	58,57	16,34	957,20
АД33	2 710	277	н/д	59,67	16,53	986,40
АЛ2	2 650	298	н/д	58,35	17,39	1 014,71
В95	2 850	271	н/д	62,76	17,01	1 067,32
ВТ5	4 410	2 150	н/д	97,11	208,78	20 274,51
ВТ20	4 450	2 150	н/д	97,99	210,68	20 643,96
ВТ8	4 480	2 150	н/д	98,65	212,10	20 923,25
ВТ3-1	4 500	2 150	н/д	99,09	213,04	21 110,48
ВТ6	4 450	2 200	н/д	97,99	215,58	21 124,06

Сравнение методов изготовления лопаток импеллера беспилотного летательного аппарата. Рассмотрим процесс изготовления лопатки импеллера беспилотного летательного аппарата одним из традиционных методов — фрезерованием фасонными фрезами из алюминиевого сплава АВ. Среди сплавов системы Al–Mg–Si сплав АВ отличается повышенным уровнем пределов прочности и текучести (при близких значениях удлинения) (табл. 3).

С учетом размеров детали понадобится заготовка размером 55×25×115 мм (рис. 5). Плотность сплава АВ $\rho = 2700$ кг/м³, стоимость за 1 кг $I_1 = 220$ руб./кг. На основе этих данных определим стоимость необходимого материала.

$$\text{Объем заготовки } V_3 = 55 \cdot 25 \cdot 115 = 158125 \text{ мм}^3 = 0,158 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

$$\text{Масса заготовки } m_3 = \rho \cdot V_3 = 2700 \cdot 0,158 \cdot 10^{-3} = 0,426 \text{ кг.}$$

$$\text{Стоимость заготовки } I_3 = I_1 \cdot m_3 = 220 \cdot 0,426 = 93,72 \text{ руб.}$$

Конечный объем детали $V = 0,022 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$, следовательно, при изготовлении каждой лопатки таким методом будет потеряно $V_n = V_3 - V = 0,136 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ материала.

Таблица 3. Механические свойства сплава АВ при температуре 20 °С

Прокат	Толщина или диаметр, мм	E , ГПа	G , ГПа	σ_{-1} , ГПа	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	$\sigma_{сж}$, МПа	КСУ, кДж/м ²
Лист неплакированный закаленный и естественно состаренный	0,50–10,5				250	160	23		
Профиль закаленный и искусственно состаренный	20	71	27	100	350	290	13	290	0,35
Штамповка закаленная и искусственно состаренная	До 150				310	260	10	270	

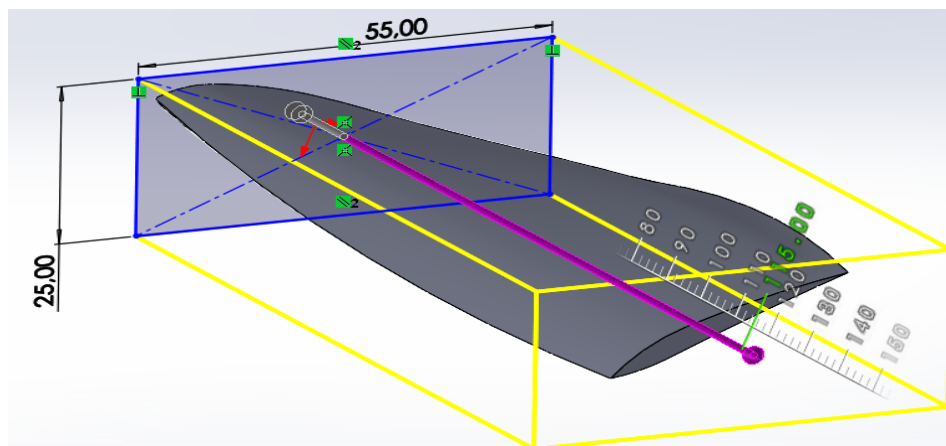


Рис. 5. Заготовка из сплава АВ

Рассмотрим процесс изготовления ламинированной лопатки импеллера. В качестве материала матрицы детали возьмем экструдированный пенополистирол, заламинируем его одним слоем углеткани со связующим — эпоксидной

смолой ВК9. Для ламинирования понадобится отрез углеткани площадью $S_3 = 115 \cdot 100 = 11500 \text{ мм}^2 = 0,0115 \text{ м}^2$. Стоимость такого количества материала $I_3 = I_1 \cdot S_3 = 2900 \cdot 0,0115 = 33,35 \text{ руб.}$ Конечная площадь поверхности детали $S = 0,01 \text{ м}^2$, поэтому при изготовлении каждой лопатки таким методом будет потеряно $S_n = S_3 - S = 0,15 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ материала.

Рассчитаем потери в денежном эквиваленте. В случае с алюминиевым сплавом АВ потери составят $I_n = I_1 V_n \rho = 220 \cdot 0,136 \cdot 10^{-3} \cdot 2700 = 80,78 \text{ руб.}$ В случае с углеволокном $I_n = I_1 S_n = 2900 \cdot 0,15 \cdot 10^{-2} = 4,35 \text{ руб.}$

Из полученных результатов видно, что, несмотря на более высокую стоимость композита, изготовление детали из него более выгодно экономически из-за меньшей массы заготовки и получаемой детали. В этом заключается практический смысл использования коэффициента α — он позволяет комплексно оценить массовую и экономическую выгоду использования материала. Так, в рассмотренном примере стоимость за единицу композита больше, но изготовление из него лопатки оказывается дешевле, чем из алюминиевого сплава, что соответствует данным, представленным в табл. 2.

Заключение. Результаты проведенного исследования подтвердили предположение о том, что при использовании КМ детали авиа- и ракетно-космической техники будут обладать меньшей массой, что, несмотря на бóльшую по сравнению с металлическими сплавами стоимость композитов, обеспечивает меньшую конечную стоимость, повышает эффективность и отвечает требованиям, предъявляемым к деталям РКТ.

Литература

- [1] *Жаропрочные сплавы для промышленных газовых турбин.* URL: <https://viam.ru/review/3800> (дата обращения 12.05.2023).
- [2] *Использование композиционных пластмасс в народном хозяйстве.* URL: <https://studentopedia.ru/lib/ispolzovanie-kompozicionnyh-plastmass-v-narodnom-hozyaystve-f28.html> (дата обращения 13.05.2023).
- [3] Дуюнова В.А., Леонов А.А., Молодцов С.В. Вклад ВИАМ в разработку легких сплавов и борьбу с коррозией изделий ракетно-космической техники. *Труды ВИАМ*, 2020, № 2. <http://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-2-22-30>
- [4] Савин С.П. Применение современных полимерных композиционных материалов в конструкции планера самолетов семейства МС-21. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2012, № 4 (2), с. 689–693.
- [5] Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов. *Труды ВИАМ*, 2020, № 6–7, с. 29–37. <http://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37>
- [6] Сенюшкин Н.С., Ямалиев Р.Р., Ялчибаева Л.Р. Применение композиционных материалов в конструкции БПЛА. *Молодой ученый*, 2011, т. 1, № 4 (27), с. 59–61.

- [7] Оспенникова О.Г., Подъячев В.Н., Столянков Ю.В. Тугоплавкие сплавы для новой техники. *Труды ВИАМ*, 2016, № 10. <http://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-10-5-5>
- [8] Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года». *Авиационные материалы и технологии*, 2015, № 1 (34), с. 3–33.
- [9] Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № S, с. 264–271. <http://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271>
- [10] Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № S, с. 344–348. <http://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348>
- [11] Гуняев Г.М., Кривонос В.В., Румянцев А.Ф., Железина Г.Ф. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов. *Конверсия в машиностроении*, 2004, № 4, с. 65–69.

Кононова Дарья Витальевна — студентка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Сабуров Федор Алексеевич — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Васильева Татьяна Владимировна, старший преподаватель кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кононова Д.В., Сабуров Ф.А. Оценка эффективности замены металлических сплавов композиционными материалами при изготовлении деталей аэрокосмической техники. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 07 (84). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-7-916>

EVALUATING EFFICIENCY OF REPLACING METALLIC ALLOYS WITH THE COMPOSITE MATERIALS IN MANUFACTURE OF THE AEROSPACE ENGINEERING PARTS

D.V. Kononova

kononovadv@bk.ru

F.A. Saburov

fyodor.saburov.01@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper substantiates possibility of replacing metal alloys with the composite materials in manufacturing parts for aviation, rocket and space systems. The composite materials properties were analyzed, and advantages of the composite materials in comparison with metals and their alloys are presented. Using the Solid-Works computer-aided design system, 3D models of parts used to find the parameters necessary for further research were created. To assess efficiency of using the new materials, a coefficient is proposed that provides economic and technological feasibility of the replacement. Study results indicate that introduction of the composites could reduce material costs in production of the aerospace engineering parts, as well as significantly increase their strength characteristics.

Keywords

Composite materials, carbon fiber, fiberglass, aerospace systems, rocket and space systems, aircraft industry, product strength

Received 01.06.2023

© Bauman Moscow State Technical University, 2023

References

- [1] Zharoprochnye splavy dlya promyshlennykh gazovykh turbin [Heat resistant alloys for industrial gas turbines]. URL: <https://viam.ru/review/3800> (accessed May 12, 2023).
- [2] *Ispol'zovanie kompozitsionnykh plastmass v narodnom khozyaystve* [The use of composite plastics in the national economy]. URL: <https://studentopedia.ru/lib/ispolzovanie-kompozitsionnykh-plastmass-v-narodnom-hozyaystve-f28.html> (accessed May 13, 2023).
- [3] Duyunova V.A., Leonov A.A., Molodtsov S.V. VIAM'S contribution to the development of light alloys and the corrosion control of rocket and space technology products. *Proceedings of VIAM*, 2020, no. 2. (In Russ.). <http://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-2-22-30>
- [4] Savin S.P. Application of modern polymeric composite materials in the design of MS-21 airplane family. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, no. 4 (2), ppp. 689–693. (In Russ.).
- [5] Doriomedov M.S. Russian and world market of polymer composites (review). *Proceedings of VIAM*, 2020, no. 6–7, pp. 29–37. (In Russ.). <http://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37>
- [6] Senyushkin N.S., Yamaliev R.R., Yalchibaeva L.R. The use of composite materials in the design of UAVs. *Molodoy uchenyy*, 2011, vol. 1, no. 4 (27), pp. 59–61. (In Russ.).

- [7] Ospennikova O.G., Pod'yachev V.N., Stolyankov Yu.V. Refractory alloys for innovative equipment. *Proceedings of VIAM*, 2016, no. 10. (In Russ.).
<http://doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-10-5-5>
- [8] Kablov E.N. Innovative developments of fsue "VIAM" SSC of RF on realization of "Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030". *Aviacionnye materialy and tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. (In Russ.).
- [9] Grashchenkov D.V. Strategy of development of non-metallic materials, metal composite materials and heat-shielding. *Aviacionnye materialy and tehnologii*, 2017, no. S, pp. 264–271. (In Russ.). <http://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271>
- [10] Raskutin A.E. Development strategy of polymer composite materials. *Aviacionnye materialy and tehnologii*, 2017, no. S, pp. 344–348. (In Russ.).
<http://doi.org/10.18577/2071-9140-2017-0-S-344-348>
- [11] Gunyaev G.M., Krivonos V.V., Rumyantsev A.F., Zhelezina G.F. Polymer composite materials in aircraft structures. *Konversiya v mashinostroenii*, 2004, no. 4, pp. 65–69. (In Russ.).

Kononova D.V. — Student, Department of Technologies of Space and Rocket Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Saburov F.A. — Student, Department of Technologies of Space and Rocket Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Vasilieva T.V., Senior Lecturer, Department of Technologies of Space and Rocket Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Kononova D.V., Saburov F.A. Evaluating efficiency of replacing metallic alloys with the composite materials in manufacture of the aerospace engineering parts. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 07 (84). (In Russ.).
<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-7-916>