

УДК 536.2.081.7

Анизотропия теплопроводности аддитивных металлов, полученных методом селективного лазерного сплавления на примере нержавеющей стали CL 20ES

В.П. Киселев, А.Д. Ежов, С.Д. Селиверстов, Л.В. Быков, Е.В. Сотник

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, 125993, Россия
e-mail: vladimir-kiselev@yandex.ru; ezhhov@gmail.com; seliverstovsd@mai.ru;
bykovlv@mai.ru; sotnikev@mai.ru

DOI: 10.34759/tpt-2021-13-7-329-335

Поступила в редакцию 30.05.2021

После доработки 15.06.2021

Принята к публикации 16.06.2021

Экспериментально обнаружена анизотропия теплопроводности в материале, полученном с использованием аддитивной металлпорошковой технологии. По результатам эксперимента определено, что коэффициент теплопроводности вдоль плоскостей сплавления на 25–30% выше, чем поперек них. Исходя из этого сформировано два практических вывода. Во-первых, при проектировании теплонагруженных деталей, изготовленных по аддитивной технологии, необходимо учитывать направление плоскостей сплавления относительно предполагаемых направлений тепловых потоков. Во-вторых, при изготовлении деталей методом металлпорошковой технологии появляется возможность управления их теплопроводностью в заданных направлениях.

Ключевые слова: металлпорошковые аддитивные технологии, анизотропия, теплофизические свойства, теплопроводность.

Введение

Проектные решения, используемые при проектировании современных авиационных двигательных установок, обуславливают необходимость поиска новых технологических и материаловедческих решений. Усложнение конструкции деталей, повышение эксплуатационных требований к элементам двигателей и энергетических установок требует модернизации конструкторско-технологических подходов к проектированию и производству. Одним из возможных инструментов решения такой задачи является применение аддитивных технологий (АТ). Имеющийся в настоящее время опыт применения АТ позволяет говорить о перспективности этих технологий в двигателестроении, начиная от прототипирования и ремонтных ра-

бот и заканчивая мелкосерийным изготовлением функциональных деталей и узлов газотурбинных двигателей (ГТД) [1–4].

Наибольшее распространение в авиационной и ракетно-космической промышленности получила категория PBF (Powder Bed Fusion) [5], которая использует металлические порошки для создания геометрически сложных деталей. Она предназначена для сплавления металлических порошков с использованием лазера высокой мощности. Чаще всего в PBF используются металлические и легирующие материалы, например, нержавеющая сталь, алюминий, титан, сплавы кобальта и хрома. Использование PBF позволяет получать детали, изготовление которых очень трудоемко или просто невозможно по традиционным технологиям производства.

Категория PBF выглядит наиболее перспективной для изготовления лопаток газотурбинных двигателей ввиду обеспечения хорошей точности изготовления.

Перспективность использования аддитивных технологий не снимает необходимости всестороннего исследования свойств материалов получаемых изделий. Актуальность таких исследований подтверждается значительным количеством экспериментальных работ, связанных с изучением свойств полученных материалов, режимов их нормализации, исследованием их молекулярной и атомарной структуры [6–9]. Интересной особенностью АТ является выявленное в процессе исследований различие свойств полученного материала. Так, например, в [10, 11] показано, что механические свойства аддитивных материалов существенно зависят от технологических параметров производства, что необходимо учитывать при разработке конструкции изделия [12–14]. Зависимость механических свойств аддитивных материалов от режимов производства, проявления анизотропии этих свойств в полученных изделиях [9, 14, 15] вызывают необходимость исследовать также теплофизические свойства полученных по АТ материалов.

Одно из важнейших теплофизических свойств материала – его теплопроводность. Это свойство конструкционных материалов, используемых в авиационной и ракетно-космической технике, необходимо учитывать при проектировании и изготовлении теплонагруженных узлов и конструкций.

Теоретические положения

При экспериментальном определении теплофизических свойств материала (в данном случае его теплопроводности) необходимо определить ряд граничных условий, которые позволят получить ее достоверное значение [15]:

– исследуемый образец имеет цилиндрическую форму (осесимметричный и постоянного сечения);

Таблица 1. Геометрические параметры образцов

№	Расположение слоев	Диаметр, мм	Высота, мм
1	Вдоль оси цилиндра	28.65	37.25
2	Вдоль оси цилиндра	28.95	38.19
3	Поперек оси цилиндра	29.95	39.18
4	Поперек оси цилиндра	29.95	39.13

– материал однороден в выбранном направлении;

– одномерная постановка задачи, тепловой поток распространяется вдоль одной координатной оси;

– исследование проводится в стационарном режиме, температурное поле в исследуемом образце постоянно во времени.

Теплопроводность в твердом теле определяется законом Фурье. В общем виде выражение записывается следующим образом:

$$dQ = -\lambda \cdot \frac{dT}{dn} \cdot dF, \quad (1)$$

где dQ – элементарный тепловой поток; λ – теплопроводность; dT/dn – градиент температуры по нормали n к элементарной поверхности dF .

В рамках поставленной задачи стационарный режим вместо уравнения (1) позволяет использовать закон Фурье в следующей интегральной записи:

$$Q = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{\delta} \cdot F, \quad (2)$$

где Q – тепловой поток через рассматриваемый участок; ΔT – разность температур между рассматриваемыми сечениями; δ – расстояние между сечениями; F – площадь сечения.

Таким образом, теплопроводность образца может быть определена следующим выражением:

$$\lambda = \frac{Q \cdot \delta}{\Delta T \cdot F}. \quad (3)$$

Материалы

и экспериментальная установка

В эксперименте использовались четыре цилиндрические образца из нержавеющей стали марки CL 20ES, полученные по технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) [16]. Образцы №1 и №2 напечатаны с ориентацией слоев вдоль оси цилиндра, образцы №3 и №4 – поперек.

Все образцы после печати были подвергнуты термообработке: нагреву в вакуумной печи с последующими выдержкой и охлаждением. После термообработки проведена токарная обработка (проточка и торцевание) исследуемых образцов. В результате образцы приобрели геометрические размеры, приведенные в табл. 1.

Методикой проведения эксперимента предусмотрено размещение исследуемого образца между двух эталонных медных цилиндров. Верхний медный цилиндр соприкасается с нагревателем, а нижний – с холодильником. Экспериментальный участок представляет собой сборку исследуемого образца с медными цилиндрами, теплоизолированную по боковой поверхности. В эксперименте использовались показания шести хромель-копелевых термопар установленных на боковой поверхности сборки: 2 шт. на внешних торцах медных цилиндров, 2 шт. между медными цилиндрами и образцом и 2 шт. на образце. Принципиальная схема экспериментального участка приведена на рис. 1.

В ходе эксперимента измерялись два параметра: температура в заданных точках установки и время от начала эксперимента. Термопары опрашивались с частотой 1 с^{-1} . Разрешающая способность канала измерения температуры контроллера составляла 0.25°C .

Результаты эксперимента

В процессе проведения эксперимента получены значения температурного поля в экспериментальном участке. Для снижения случайной погрешности значения температуры усреднялись по пяти соседним точкам. На графике (рис. 2) представлен режим прогрева и выход на стационарный режим, начало которого принято в момент 3800 с от начала эксперимента.

По граничным условиям проведения экспериментального исследования измерение значений температуры в экспериментальном участке должно проводиться при установившихся значениях, т.е. выходе экспериментальной установки на стационарный режим. Значения температур в каждом сечении экспериментального участка были рассчитаны как среднее арифметическое значений на стационарном режиме в интервале с 3801 по 4500 секунду.

В качестве иллюстрации на рис. 3 представлена линейная

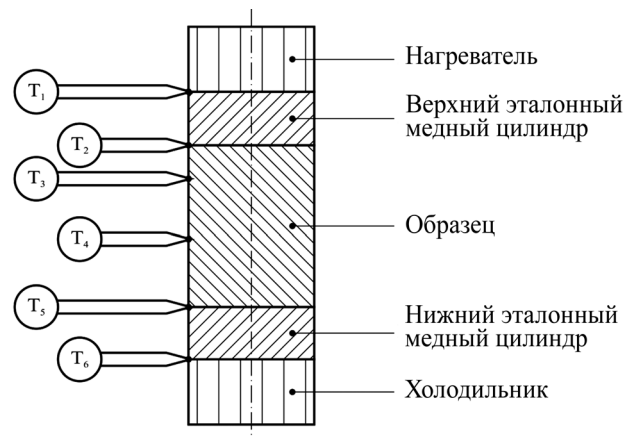


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального участка с исследуемым образцом. T_1 – T_6 – термопары

аппроксимация графика распределения температуры вдоль оси образца №1.

Далее приведен порядок обработки результатов эксперимента на примере образца №1.

В качестве градиента температуры был принят тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой. По формуле (2) рассчитаны значения плотностей теплового потока через эталонные медные цилиндры. Затем по

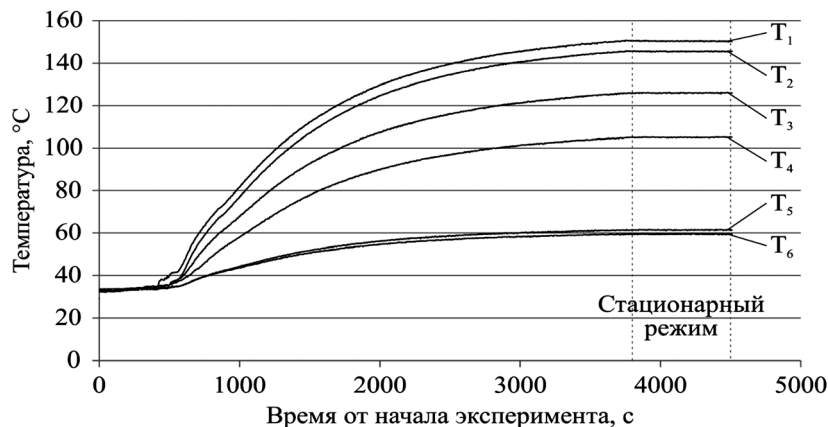


Рис. 2. График распределения температур в экспериментальном участке в процессе эксперимента. T_1 – T_6 – сглаженные показания термопар

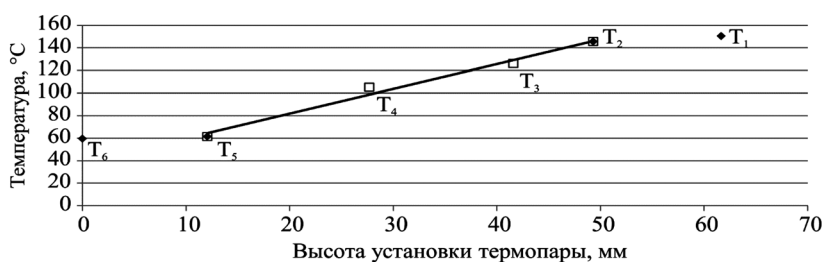
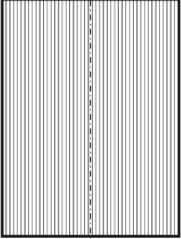
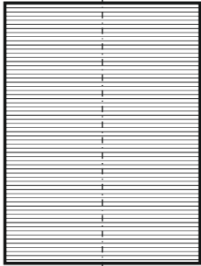


Рис. 3. Распределение температуры вдоль оси образца №1 с эталонными медными цилиндрами: T_1 – T_6 – температуры при стационарном режиме; \square – образец; \blacklozenge – эталонные медные цилиндры; — – линейная аппроксимация

Таблица 2. Сводная таблица результатов эксперимента

№	Направление слоев	Теплопроводность образца, Вт/(м·К)	Средняя теплопроводность для данной ориентации слоев, Вт/(м·К)
1		24.165	26.676
2		29.187	
3		20.204	19.777
4		19.349	

формуле (3) определен коэффициент теплопроводности образца. Аналогичным образом произведены расчеты для остальных образцов. Результаты испытаний четырех образцов нержавеющей стали марки SAE 316L приведены в табл. 2.

Обнаруженное влияние направления плоскостей сплавления на коэффициент теплопроводности образцов нержавеющей стали марки SAE 316L позволяет сделать вывод, что коэффициент теплопроводности аддитивного материала SAE 316L, полученного с использованием металлопорошковых технологий зависит от направления теплового потока в нем: вдоль плоскостей сплавления коэффициент теплопроводности на 25–30% выше, чем поперек них.

Выводы

Исходя из результатов проведенного исследования можно сделать вывод, что анизотропию теплопроводящих свойств аддитивного материала необходимо учитывать как при проектировании, так и при производстве деталей с применением аддитивных технологий. Использование данного явления в практических целях возможно после формирования базы знаний используемых материалов, полученной в ходе исследований в следующих направлениях:

- исследование широкого спектра аддитивных металлических материалов, в том числе с неметаллическими присадками;
- исследование образцов со сложной пространственной конфигурацией слоев сплавления;
- исследование влияния механической и термической обработки аддитивных материалов на анизотропию теплопроводности;
- исследование влияния режимов сплавления слоев на анизотропные характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селянская Е.Л., Касьянов С.В., Мелузова О.А. Возможность применения аддитивных технологий в центробежных компрессорах // Материалы конференции «Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации». 2015. Т. 1. С. 359–363.
2. Рогалев А.Н., Шевченко М.И. Применение аддитивных лазерных технологий при проектировании охлаждаемых лопаток газовых турбин // Вестник ИГУЭ. 2016. Вып. 3. С. 34–39. DOI:10.17588/2072-2672.2016.3.034-039
3. Магеррамова Л.А., Ножницкий Ю.А., Волков С.А., Волков М.Е., Чепурнов В.Ж., Белов С.В., Вербанов И.С., Заикин С.В. Перспективы применения аддитивных технологий для создания деталей и узлов авиационных газотурбинных двигателей и прямоточных воздушно-реактивных двигателей // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18. № 3. С. 81–98.
4. Славутин Л.В., Башкарев А.Я. Технология восстановления деталей машин с применением аддитивных технологий // Сборник трудов конференции «Неделя науки СПбПУ». 2018. С. 118–122.

5. ASTM F2792-12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (Withdrawn 2015), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org
6. **Смелов В.Г., Сотов А.В., Агаповичев А.В.** Исследование структуры и механических свойств изделий, полученных методом селективного лазерного сплавления из порошка стали 316L // Черные металлы. 2016. № 9 (1017). С. 61–65.
7. **Сухов Д.И., Базылева О.А., Неруш С.В., Аргинбаева Э.Г., Зайцев Д.В.** Особенности структуры и свойств материала жаропрочного интерметаллидного никелевого сплава, полученного методом селективного лазерного сплавления // Сборник трудов конференции «Аддитивные технологии: настоящее и будущее». 2018. С. 321–325.
8. **Евгенов А.Г., Роголев А.М., Карачевцев Ф.Н., Мазалов И.С.** Влияние горячего изостатического прессования и термической обработки на свойства сплава эп648, синтезированного методом селективного лазерного сплавления // Технология машиностроения. 2015. № 9. С. 11–16.
9. **Николаев И.А., Лесневский Л.Н., Кожевников Г.Д., Селиверстов С.Д.** Исследование влияния направления выращивания образцов из стали 12X18H10T, полученных методом селективного лазерного сплавления (SLM), на фреттинг-износ в условиях полного и частичного проскальзывания // Тезисы XIX Международной конференции «Авиация и космонавтика». 2020. С. 177–178.
10. **Сухов Д.И., Мазалов П.Б., Неруш С.В., Ходырев Н.А.** Влияние параметров селективного лазерного сплавления на образование пористости в синтезированном материале коррозионностойкой стали // Труды ВИАМ. 2017. № 8 (56). С. 34–44. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-4-4
11. **Khoroshko E., Filippov A., Shamarin N., Moskvichev E., Utyaganova V., Tarasov S., Savchenko N., Kolubaev E., Rubtsov V., Lychagin D.** Structure and Mechanical Properties of Cu–Al–Si–Mn System-Based Copper Alloy Obtained by Additive Manufacturing // Russian Physics Journal. 64. 10.1007/s11182-021-02333-2
12. **Евгенов А.Г., Горбовец М.А., Прагер С.М.** Структура и механические свойства жаропрочных сплавов ВЖ159 и ЭП648, полученных методом селективного лазерного сплавления // Авиационные материалы и технологии. 2016. № S1. С. 8–15. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-8-15
13. **Martynyuk L.A., Bykov L.V., Ezhov A.D., Talalaeva P.I., Afanasiev D.V.** Experience in using anisotropic properties of composites in engineering the compressor impeller of a small-size gas turbine engine // MATEC Web of Conferences. 2020. 329, 02019.
14. **Сотов А.В., Проничев Н.Д., Смелов В.Г., Богданович В.И., Гиорбелидзе М.Г., Агаповичев А.В.** Разработка методики проектирования технологических процессов изготовления деталей ГТД методом селективного лазерного сплавления порошка жаропрочного сплава ВВ751П // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2017. Т. 19. № 4. С. 96–104.
15. **Хорошко Е.С., Филиппов А.В., Шамарин Н.Н.** Анизотропия механических свойств алюминиевой бронзы, полученной методом электронно-лучевого аддитивного производства // Международная конференция «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии», 5–9 октября 2020 г.: тезисы докладов. Томск, 2020. 523 с. DOI: 10.17223/9785946219242/324
16. **Григорьев В.А., Зорин В.М.** Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. М.: Энергоатомиздат, 1988. 560 с.
17. **ГОСТ Р 57558-2017.** Аддитивные технологические процессы. Базовые принципы. Часть 1. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2018. 16 с.

Thermal conductivity anisotropy of additive metals obtained by selective laser alloying on the example of the CL 20ES stainless steel

V.P. Kiselev, A.D. Ezhov, S.D. Seliverstov, L.V. Bykov, E.V. Sotnik

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russia

*e-mail: vladimir-kiselev@yandex.ru; ezhhov@gmail.com; seliverstovsd@mai.ru;
bykovlv@mai.ru; sotnik@mai.ru*

Thus, for example, adaptive technologies application acquired wide proliferation due to technological manufacturing cycle curtailment and a possibility of obtaining a singular part of complex configuration. This trend rapid pace development allowed creating a substantial amount of techniques for the final product obtaining, which gives the possibility to produce promptly with high quality the parts of complex configuration in limited quantities.

Due to the fact that additive technologies are primarily the object layer-to-layer building-up and synthesis, the existing technological techniques diversity led to the mechanical properties anisotropy of additive materials, as well as dependence of these properties on production modes. In as much as the presence of the mechanical properties anisotropy is associated with material structure changing as the result of its manufacturing, the authors put forward the supposition, which was later substantiated experimentally, on the thermo-physical properties anisotropy presence of additive material obtained by the selective laser alloying technology.

The study of the difference presence in the thermo-physical properties of the additive material from the manufacturing technology was performed on an experimental setup allowing determine heat fluxes and temperatures in the given sections. The article presents the study of the four samples fabricated from the CL 20EC stainless steel powder by the selective laser technology on the thermal conductivity anisotropy presence. Two samples were with longitudinal orientation of alloying layers, and the rest with transverse orientation relative to the heat flow direction. The temperature values obtained while the experiment with the sampling increment of 0.25 s^{-1} were being smoothed for the random error reduction. Further, on achieving the stationary mode, average temperature value was being computed for each section with installed thermocouples. Thermal conductivity coefficient was being determined by the known heat flow value and samples geometry size.

The conducted study revealed that the value of the thermal conductivity coefficient of the CL 20ES additive steel in the direction parallel to the sintering planes was 25–30% higher than in the perpendicular one. The noted difference in the properties of the material entails the need to account for the fact of the anisotropy of heat-conducting properties when designing structural elements manufactured employing the additive technology of selective laser melting.

Keywords: metal-powder additive technologies, anisotropy, thermophysical properties, thermal conductivity.

REFERENCES

1. **Selyanskaya E.L., Kas'yanov S.V., Meluzova O.A.** Vozmozhnost' primeneniya additivnykh tekhnologiy v tse-trobeznykh kompressorakh [The possibility of using additive technologies in centrifugal compressors] // *Materialy konferentsii «Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii»* [Proceedings of the conference «Aero-space engineering, high technologies and innovations»], 2015, vol. 1, pp. 359–363. In Russ.
2. **Rogalev A.N., Shevchenko M.I.** Primenenie additivnykh lazernykh tekhnologiy pri proektirovanii okhlazhdaemykh lopatok gazovykh turbin [Additive laser technologies in cooled gas turbine blade design] // *Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University*, 2016, vol. 3, pp. 34–39. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.3.034-039. In Russ.
3. **Magerramova L.A., Nozhnitsky Yu.A., Volkov S.A., Volkov M.E., Chepurinov V.Zh., Belov S.V., Verbanov I.S., Zaikin S.V.** Perspektivy primeneniya additivnykh tekhnologiy dlya sozdaniya detaley i uzlov aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley i pryamotochnnykh vozdušno-reaktivnykh dvigateley [Prospects Of Application Of Additive Technologies To Develop Parts And Components Of Gas Turbine Engines And Ramjets] // *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*, 2019, vol. 18, iss. 3, pp. 81–98. In Russ.
4. **Slavutin L.V., Bashkarev A.Ya.** Tekhnologiya vostanovleniya detaley mashin s primeneniem additivnykh tekhnologiy [Technology for restoring machine parts using additive technologies] // *Sbornik trudov konferentsii «Nedelya nauki SPbPU»* [Proceedings of the conference «SPbPU Science Week»], 2018, pp. 118–122. In Russ.
5. **ASTM F2792-12a** Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (Withdrawn 2015), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org
6. **Smelov V.G., Sotov A.V., Agapovichev A.V.** Issledovanie struktury i mekhanicheskikh svoystv izdeliy, poluchennykh metodom selektivnogo lazernogo splavljeniya iz poroshka stali 316L [Investigation of the structure and mechanical properties of products obtained by selective laser fusion from 316L steel powder] // *Chernye metally – Ferrous metallurgy*, 2016, vol. 9, pp. 61–65. In Russ.
7. **Sukhov D.I., Bazyleva O.A., Nerush S.V., Arginbaeva E.G., Zaytsev D.V.** Osobennosti struktury i svoystv materiala zharoprochnogo intermetallidnogo nikelovogo splava, poluchennogo metodom selektivnogo lazernogo splavljeniya [Features of the structure and properties of the material of a heat-resistant intermetallic nickel alloy obtained by selective laser fusion] // *Sbornik trudov konferentsii «Additivnye tekhnologii: nastoyashchee i budushchee»* [Proceedings of the conference «Additive Technologies: present and future»], 2018, pp. 321–325. In Russ.
8. **Evgenov A.G., Rogalev A.M., Karachevtsev F.N., Mazalov I.S.** Vliyaniye goryachego izostaticheskogo pressovaniya i termicheskoy obrabotki na svoystva splava ep648, sintezirovannogo metodom selektivnogo lazernogo splavljeniya [The effect of hot isostatic pressing and heat treatment on the properties of the EP648 alloy synthesized by selective laser fusion] // *Tekhnologiya mashinostroeniya – Mechanical engineering technology*, 2015, no. 9, pp. 11–16. In Russ.
9. **Nikolaev I.A., Lesnevskiy L.N., Kozhevnikov G.D., Seliverstov S.D.** Issledovanie vliyaniya napravleniya vyrashchivaniya obraztsov iz stali 12Kh18N10T, poluchennykh metodom selektivnogo lazernogo splavljeniya (SLM), na fretting-iznos v usloviyakh polnogo i chastichnogo proskal'zyvaniya [Investigation of the influence of the growing direction of 12X18H10T steel samples obtained by selective laser fusion (SLM) on fretting wear under conditions of complete and partial slippage] // *Tezisy XIX Mezhdunarodnoy konferentsii «Aviatsiya i kosmonavtika»* [Proceedings of the XIX International Conference «Aviation and Cosmonautics»], 2020, pp. 177–178. In Russ.
10. **Sukhov D.I., Mazalov P.B., Nerush S.V., Khodyrev N.A.** Vliyaniye parametrov selektivnogo lazernogo splavljeniya na obrazovanie poristosti v sintezirovannom materiale korrozionnostoykoy stali [Influence of the parameters of selective laser fusion on the formation of porosity in the synthesized material of corrosion-resistant steel] // *Proceedings of All-Russian Research Institute of Aviation Materials*, 2017, no. 8 (56), pp. 34–44. DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-8-4-4. In Russ.

11. **Khoroshko E., Filippov A., Shamarin N., Moskvichev E., Utyaganova V., Tarasov S., Savchenko N., Kolubaev E., Rubtsov V., Lychagin D.** Structure and Mechanical Properties of Cu–Al–Si–Mn System-Based Copper Alloy Obtained by Additive Manufacturing // *Russian Physics Journal*, 2021, vol. 64. DOI: 10.1007/s11182-021-02333-2
12. **Evgenov A.G., Gorbovets M.A., Prager S.M.** Struktura i mekhanicheskie svoystva zharoprochnykh splavov VZh159 i EP648, poluchennykh metodom selektivnogo lazernogo splavljeniya [Structure and mechanical properties of heat-resistant alloys VJ159 and EP648 obtained by selective laser fusion] // *Aviatsionnye materialy i tekhnologii – Aviation materials and technologies*, 2016, no. S1, pp. 8–15. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-8-15. In Russ.
13. **Martynyuk L.A., Bykov L.V., Ezhov A.D., Talalaeva P.I., Afanasiev D.V.** Experience in using anisotropic properties of composites in engineering the compressor impeller of a small-size gas turbine engine // *ICMTMTE 2020 Proceedings*. DOI: 10.1051/mateconf/202032903029
14. **Sotov A.V., Pronichev N.D., Smelov V.G., Bogdanovich V.I., Giorbelidze M.G., Agapovichev A.V.** Razrabotka metodiki proektirovaniya tekhnologicheskikh protsessov izgotovleniya detaley GTD metodom selektivnogo lazernogo splavljeniya poroshka zharoprochnogo splava VV751P [Development Algorithm Of The Technological Process of Manufacturing Gas Turbine Parts By Selective Laser Melting] // *Academic Journal «Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences»*, 2017, vol. 19, no. 4, pp. 96–104. In Russ.
15. **Khoroshko E.S., Filippov A.V., Shamarin N.N.** Anizotropiya mekhanicheskikh svoystv alyuminievoy bronzy, poluchennoy metodom elektronno-luchevogo additivnogo proizvodstva [Anisotropy of mechanical properties of aluminum bronze obtained by electron beam additive manufacturing] // *Proceedings of International Conference «Physical Mesomechanics. Materials with a multilevel hierarchically organized structure and intelligent production technologies»*, 2020, p. 523. DOI: 10.17223/9785946219242/324. In Russ.
16. **Grigor'yev V.A., Zorin V.M.** *Teoreticheskie osnovy teplotekhniki. Teplotekhnicheskiy eksperiment* [Theoretical foundations of heat engineering. Thermal engineering experiment.]. Moscow: Energoatomizdat, 1988. 560 p. In Russ.
17. **GOST R 57558-2017.** Additivnye tekhnologicheskie protsessy. Bazovye printsipy. Chast' 1. Terminy i opredeleniya [Additive technological processes. Basic principles. Part 1. Terms and definitions]. Moscow: Standartinform, 2018. 16 p. In Russ.