

УДК 620.181.5

Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-106-114

Для цитирования: Журавлев В. Ю., Манохина Э. С., Шикарев М. А. Параметры камер ракетных двигателей, полученных методом выборочного лазерного сплавления // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 1. С. 106–114. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-106-114.

For citation: Zhuravlev V. Y., Manokhina E. S., Shikarev M. A. [Parameters of rocket engine chambers, obtained by selective laser fusion]. *Siberian Aerospace Journal*. 2024, Vol. 25, No. 1, P. 106–114. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-106-114.

Параметры камер ракетных двигателей, полученных методом выборочного лазерного сплавления

В. Ю. Журавлев*, Э. С. Манохина, М. А. Шикарев

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: vz@sibsau.ru

При проектировании и отработке ракетного двигателя малой тяги (РДМТ) одной из важнейших задач является обеспечение качества материалов, что, в свою очередь, влияет на надежность изделия. В настоящее время активно развиваются аддитивные технологии изготовления деталей из металлов. Это направление актуально для изделий ракетно-космической техники с целью уменьшения массы и повышения надежности изделий. В статье представлены результаты исследований химического состава и механических характеристик материала камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги, изготовленной методом выборочного лазерного сплавления из металлического порошка. Исследовались свойства изделий из порошка металла марки Инконель 718. Были изготовлены образцы, у которых исследовались химические, механические и структурные характеристики материала. По результатам испытаний напечатаны два образца РДМТ. Камеры РДМТ испытывались на вибронгрузку, прочность и герметичность. Была отмечена повышенная пористость и шероховатость исследуемого материала камеры двигателя. При анализе ряда параметров технологии выборочного лазерного сплавления, проведен экспериментальный подбор параметров печати и выявлены наиболее значимые факторы, влияющие на качество печати (шероховатость и пористость поверхности). По результатам проведенных работ выделены четыре группы управляемых параметров печати, влияющих на свойства получаемого материала. Также в работе приведены рекомендации по режимам и характеристикам печати для получения наиболее качественных деталей.

Ключевые слова: SLM-печать, Inconel 718, испытания, механические свойства материала, анализ параметров печати.

Parameters of rocket engine chambers, obtained by selective laser fusion

V. Y. Zhuravlev*, E. S. Manokhina, M. A. Shikarev

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: vz@sibsau.ru

When designing and testing a low-thrust rocket engine (SLME), one of the most important tasks is to ensure the quality of materials, which, in turn, affects the reliability of the product. Currently, additive technologies for manufacturing parts from metals are actively developing. This direction is relevant for

rocket and space technology products to reduce weight and increase the reliability of products. The article presents the results of studies of the chemical composition and mechanical characteristics of the material of the low-thrust rocket engine demonstrator chamber, manufactured by selective laser fusion from metal powder. The properties of products made from Inconel 718 metal powder were studied. Samples were made and the chemical, mechanical and structural characteristics of the material were studied. Based on the test results, two RDMT samples were printed. RDMT chambers were tested for vibration loads, strength and tightness. Increased porosity and roughness of the test material of the engine chamber were noted. When analyzing a number of parameters of the selective laser fusion technology, an experimental selection of printing parameters was carried out and the most significant factors affecting the print quality (surface roughness and porosity) were identified. Based on the results of the work carried out, four groups of controlled printing parameters were identified that affect the properties of the resulting material. The work also provides recommendations on printing modes and characteristics to obtain the highest quality parts.

Keywords: SLM-printing, Inconel 718, testing, analysis, mechanical properties of the material, analysis of printing parameters.

Введение

К изделиям ракетно-космической отрасли предъявляются повышенные требования по качеству. На всех этапах создания двигателей летательных аппаратов (ДЛА) оценка параметров проводится по эффективности проектных решений, качеству используемых материалов, конструкторской обработке опытных образцов, результатам испытаний изделий при производстве и эксплуатации [1].

Развитие аддитивных технологий (АТ) по сравнению с традиционным производством в перспективе позволит существенно снизить время и стоимость изготовления изделий в результате повышения технологичности, сокращения количества деталей узлов, получения конструкционных материалов с улучшенными свойствами [2]. Уже выявлены отличия свойств материалов деталей, полученных с помощью аддитивных технологий и изготовленных традиционным методом литья. В настоящее время использование 3D-печати при производстве ракетных двигателей сдерживается недостаточной обработкой параметров технологии.

Целью исследований является изучение свойств материала, полученного методом SLM печати, экспериментальная обработка режимов печати и выявление управляемых параметров, влияющих на физико-механические характеристики изделий, работающих при высоких температурах.

Описание технологии выборочного лазерного сплавления металлов

В Сибирском государственном университете науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева совместно с индустриальным партнером ООО «Полихром» проводятся исследования по разработке технологии изготовления камеры ракетного двигателя малой тяги методом выборочного лазерного сплавления (Selective laser melting – SLM) из материала Инконель 718.

Инконель 718 – жаропрочный высококачественный сплав, был разработан для надежной эксплуатации изделий при температурных режимах, достигающих 980 °С. Практически сразу же после создания он стал пользоваться повышенным спросом и на его долю уже в 70-е гг. прошлого века в США приходилось более 50 % всего валового производства промышленных жаропрочных сплавов. В настоящее время Инконель 718 считается одним из самых востребованных материалов группы Инконель.

Этот сплав до температуры 900 °С имеет высокую ударную вязкость и прочность, а при низкой температуре (–78 °С) у Инконеля отсутствует чувствительность к надрезам. Сплавы Инконель обладают стойкостью к окислению и коррозии. При нагреве Инконель формирует тонкую стабильную пассивирующую оксидную пленку, предохраняющую поверхность от дальнейшего разрушения. Инконель сохраняет прочность в широком диапазоне температур, поэтому является универсальным материалом и применяется во многих отраслях промышленности.

Первоначально проводились эксперименты по выявлению управляемых параметров лазера и отработке режимов печати принтера из порошка Inconel 718 марки ПР08-ХН53БМТЮ. Затем для определения пористости, химического состава, механических свойств полученного материала печатались экспериментальные образцы (рис. 1).



Рис. 1. Образцы для механических испытаний

Fig. 1. Samples for mechanical testing

Часть образцов была изготовлена без термообработки. Часть образцов прошла термообработку по режиму: закалка при 980 ± 10 °С, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе (аргон), старение при 720 ± 10 °С, выдержка 8 ч, охлаждение в печи до 620 °С 2 ч, далее выдержка при 620 ± 10 °С, 8 ч, охлаждение на воздухе (аргон). Полученные образцы подверглись исследованиям по определению химического состава, структуры, механических свойств материала. Плотность сплава Inconel 718 равна $8,19$ г/см³.

По содержанию легирующих элементов, материал образцов соответствует марке Инконель 718. По структуре материал образцов обладает повышенной пористостью [3; 4]. Поверхность образцов имеет повышенную шероховатость.

Для исследования механических характеристик проводились испытания материала стандартных образцов камеры-демонстратора на растяжение и определение микротвердости по методу Виккерса. В результате исследований были получены значения предела текучести, прочности, деформаций при разрыве и твердости материала [5].

После обработки результатов испытаний получены значения остаточных деформаций материала и модулей упругости для термообработанных образцов и образцов без термообработки (табл. 1).

Таблица 1

Результаты испытаний сплава Inconel 718 при комнатной температуре

№ образца	Модуль упругости (E), МПа	Остаточная деформация при разрыве ($\delta_{ост}$), %
1. С термообработкой	$0,214 \cdot 10^5$	5,27
2. С термообработкой	$0,209 \cdot 10^5$	5,38
3. С термообработкой	$0,176 \cdot 10^5$	5,95
4. С термообработкой	$0,156 \cdot 10^5$	6,95
5. Без термообработки	$0,139 \cdot 10^5$	6,51
6. Без термообработки	$0,139 \cdot 10^5$	6,43
7. Без термообработки	$0,116 \cdot 10^5$	8,7
8. Без термообработки	$0,113 \cdot 10^5$	5,23

Термообработка образцов привела к увеличению их прочностных характеристик, твердости, снижению упругости и пластичности. Полученные характеристики по напряжениям близки к результатам работы [6], а по деформациям существенно меньше (табл. 2).

Механические свойства сплава Inconel 718 при комнатной температуре

Свойства	Inconel 718 (после т/о)	
	С термообработкой	Без термообработки
Предел прочности σ_b , МПа	1400	1380
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	1150	1240
Относительное удлинение δ , %	15	18

Затем были напечатаны две камеры и смесительные головки ракетного двигателя (рис. 2).



Рис. 2. Напечатанные камера (а) и смесительная головка ракетного двигателя (б)

Fig. 2. Printed rocket engine chamber (a) and mixing head (b)

Для подтверждения их работоспособности проведен целый комплекс испытаний. Сначала успешно были проведены виброиспытания камер. Затем испытания на прочность и герметичность с использованием специального приспособления.

Согласно технологическим требованиям к приспособлениям для испытаний, испытательная оснастка должна обеспечить герметичность, моделировать и выдерживать нагрузки, которые испытывает изделие в режиме реальной работы. Для проведения испытаний на прочность и герметичность камеры двигателя, было спроектировано специальное приспособление (рис. 3). Его изготовило предприятие ООО «Вариант-999».

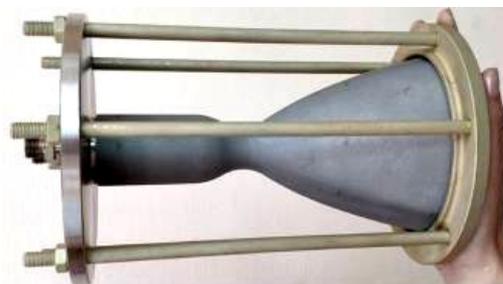


Рис. 3. Приспособления для испытаний

Fig. 3. Test devices

Согласно ОСТ 92-4291–75 были выбраны следующие виды испытаний: на прочность методом опрессовки (с использованием дистиллированной воды), на герметичность методом «аквариума» (с использованием воздуха). Испытание на герметичность производится сразу после

испытания на прочность с использованием того же специального приспособления. Были разработаны режимы испытаний (табл. 3).

Таблица 3

Параметры режимов испытаний на герметичность

Параметр	Прочность	Герметичность
Давление опрессовки, кг/см ²	11,2	12,65
Время опрессовки, мин	5	5
Давление испытания, кг/см ²	12,75	11,5
Время испытания, мин	5	3

К приспособлениям для испытаний предъявляют главное требование – они должны обеспечивать герметичность и выдерживать нагрузки, которые испытывает изделие в режиме реальной работы. Поэтому все элементы приспособления, работающие под нагрузками, были спроектированы на основе проведенных расчетов из условия прочности. Схема приспособления для испытаний представлена на рис. 4.

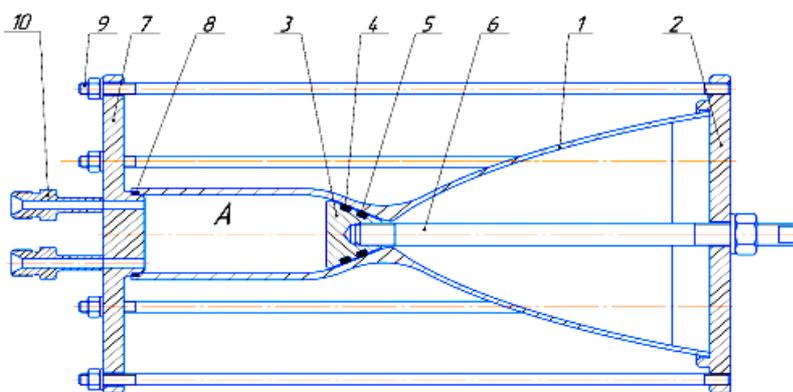


Рис. 4. Схема приспособления для испытаний:

1 – камера; 2 – кольцо упорное; 3 – прижим; 4, 5, 8 – уплотнительные кольца;
6 – шток; 7 – фланец; 9 – шпилька; 10 – штуцер

Fig. 5. The scheme of the device for testing:

1 – chamber; 2 – thrust ring; 3 – clamp; 4, 5, 8 – sealing rings;
6 – rod; 7 – flange; 9 – hairpin; 10 – fitting

Рабочее тело для испытаний подается в полость «А» через входной штуцер 10 и удаляется через выходной. Герметичность полости обеспечивается уплотнительными кольцами 4, 5, 8. Поэтому к сопрягаемым поверхностям камеры-демонстратора 1, а также фланца 7 и прижима 3 с кольцами предъявляются особые требования по шероховатости и точности размеров. Для равномерного прижатия уплотнительного кольца 8 к поверхностям фланца 7 и камеры-демонстратора 1 используются шесть шпилек 9, расположенных равномерно по окружности. Прижим уплотнительных колец 4 и 5 со стороны критического сечения обеспечивается при помощи штока 6. Прочностной расчет нагруженных элементов приспособления показал необходимый для испытания запас по прочности.

При испытаниях камеры двигателя на герметичность была обнаружена повышенная пористость и негерметичность материала камер.

Анализ выявленных параметров технологии выборочного лазерного сплавления

В результате отработки технологии печати образцов и камер ракетного двигателя на конкретном принтере выявлены следующие особенности [7]:

- напечатанные изделия обладают изотропными механическими свойствами;
- невысокая скорость печати;
- внутренняя пористость полученного изделия;
- наличие усадки изделия после термообработки [8];
- возможность коробления изделия после термообработки;
- необходимость постобработки поверхности изделия для снижения шероховатости [9–14];
- ограничение размеров изделия габаритами пространства печатающего устройства;
- высокая стоимость порошка.

В дальнейшем, изменяя режимы печати камер двигателя, были достигнуты удовлетворительные результаты по повышению качества и надежности изделий при проведении испытаний на прочность и герметичность.

По результатам проведенных работ можно выделить четыре группы управляемых параметров SLM печати, влияющих на свойства получаемого материала изделия:

1. Характеристики лазера F_l :

- мощность лазера N_l ;
- температура пятна печати T ;
- размер пятна печати d_l ;

$$F_l(N_l, T, d_l).$$

2. Свойства сплавляемого слоя F_c :

- зернистость порошка d_s ;
- высота сплавляемого слоя порошка h [15];
- величина наложения краев луча при печати следующим проходом лазера в слое Δ_d ;

$$F_c(d_s, h, \Delta_d).$$

3. Временные параметры печати F_t :

- скорость движения лазера при печати v ;
- время возврата лазера при печати следующим проходом в слое t ;

$$F_t(v, t).$$

4. Геометрические параметры изделия F_r :

- поперечный размер изделия b ;
- толщина стенки изделия δ ;
- угол в горизонтальной плоскости между изделием и направлением движения луча лазера α ;

$$F_r(b, \delta, \alpha).$$

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы:

- экспериментально отработана технология подбора параметров принтера для SLM печати, позволяющая получать изделия с необходимыми механическими свойствами материала;
- разработаны рекомендации по проведению контрольных испытаний изделий, изготовленных методом 3D-печати;
- исследованы свойства изделий, изготовленных методом 3D-печати и выявлены отличия от изделий, изготовленных традиционными методами;
- систематизированы управляемые параметры SLM печати, влияющие на свойства получаемого материала изделия.

Для внедрения новой технологии в производство необходимо исследовать степень влияния различных факторов на отдельные физические и механические свойства материалов в виде функциональных или статистических зависимостей $F_i(F_l, F_c, F_t, F_r)$. В первую очередь это относится к таким характеристикам принтеров, как возможность управления параметрами лазера,

формой и размерами печатаемого изделия. Это позволит разработать теоретические основы новых технологий производства, значительно сократив экспериментальную отработку технологии изготовления каждого нового изделия [16–18].

Библиографические ссылки

1. Критерии применения аддитивных технологий в изделиях энергетического и тяжелого машиностроения / Э. Ю. Колпишон, А. В. Дуб, Н. Г. Разумов и др. // Аддитивные технологии. 2022. № 3. С. 33–37.

2. Комаров В. А. Проектирование силовых аддитивных конструкций: теоретические основы // Онтология проектирования. 2017. Т. 7, № 2(24). С. 191–206. Doi: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-191-206.

3. Металлографический анализ камеры, изготовленной методом 3D-печати / Е. Е. Жигурова, К. Е. Мумбер, Р. А. Казаков и др. // Решетневские чтения : материалы XXVI Междунар. науч.-практ. конф. (Красноярск, 09–11 ноября 2022). Ч. 1. Красноярск, 2022. С. 175–177.

4. Смелов В. Г., Сотов А. В., Агаповичев А. В. Исследование структуры и механических свойств изделий, полученных методом СЛС из порошка стали 316L // Черные металлы. 2016. № 9. С. 61–65.

5. Анализ механических характеристик материала корпуса камеры-демонстратора ракетного двигателя малой тяги, изготовленного методом 3D-печати / Е. Е. Жигурова, К. Е. Мумбер, Р. А. Казаков и др. // Решетневские чтения : материалы XXVI Междунар. науч.-практ. конф. (Красноярск, 09–11 ноября 2022). Ч. 1. Красноярск, 2022. С. 172–174.

6. Грязнов М. Ю., Шотин С. В., Чувильдеев В. Н. Физико-механические свойства и структура сплава Inconel 718, полученного по технологии послойного лазерного сплавления // Вестник Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. 2014. № 4–1. С. 46–51.

7. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms / D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe // International Materials Reviews. 2012. No. 57 (3). P. 133–164.

8. Лихтнер А. С. Практическое исследование усадки 3D-печатных керамических деталей, изготовленных по DLP-процессу // Аддитивные технологии. 2023. № 2. С. 12–15.

9. Электрохимическая обработка изделий аддитивного производства из металлов и сплавов / Е. В. Краснова, Б. П. Саушкин, И. А. Слюсарь, С. В. Смян // Аддитивные технологии. 2023. № 2. С. 49–57.

10. Zhao C., Qu N., Tang X. Removal of adhesive powders from additive manufactured internal surface via electrochemical machining with flexible cathode // Precision Engineering. 2021. Vol. 67. P. 438–452. Doi: 67.438-452.10.1016/j.precisioneng.2020.11.003.

11. Nandwana P., Kirka M., Okello A., Dehoff R. Electron beam melting of Inconel 718: effects of processing and post-processing // Materials Science and Technology. 2018. Vol. 34. P. 1–8. Doi: 10.1080/02670836.2018.1424379.

12. Application of electrochemical polishing in surface treatment of additively manufactured structures / Mu Jierui, Sun Tengting, Leung Chu Lun Alex et al. // Progress in Materials Science. 2023. Vol. 136. P. 103. Doi: 10.1016/j.pmatsci.2023.101109.

13. State of the art on chemical and electrochemical based finishing processes for additive manufactured features / Mulla Mahaboob Basha, Shaik Mahaboob Basha, V. K. Jain, M. R. Sankar // Additive Manufacturing. 2022. Vol. 58. Doi: 10.1016/j.addma.2022.103028.

14. An Linchao, Wang Dengyong, Zhu Di. Combined electrochemical and mechanical polishing of interior channels in parts made by additive manufacturing // Additive Manufacturing. 2022. Vol. 51. Doi: 102638.10.1016/j.addma.2022.102638.

15. Суфриянов В. Ш., Попович А. А., Борисов Е. В. Влияние толщины слоя построения при селективном лазерном плавлении сплава Инконель 718 на микроструктуру и свойства // Цветные металлы. 2016. № 1(877). С. 81–86.

16. Krasnova E. V., Saushkin, B. P., Shandrov B. V. Pre-production engineering in additive manufacturing / Lecture Notes in Mechanical Engineering // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). 2021. Vol. 2. P. 261–268.

17. Евгенов А. Г., Королев В. А., Шуртаков С. В. Перспективы разработки высокопроизводительных режимов селективного лазерного сплавления жаропрочных сплавов на основе никеля для изготовления деталей ГТД // Аддитивные технологии: настоящее и будущее : сб. докладов III Междунар. конф. (Москва, 23 марта 2017). Москва, 2017. С. 23.

18. Совместное производство деталей методом 3D-печати в ООО «Гранком» и АО «ЦАТ» / А. И. Демченко, А. А. Максимов, А. И. Андрейко, В. С. Маршов // Аддитивные технологии. 2022. № 3. С. 8–10.

References

1. Kolpishon E. Y., Dubh A. V., Razumov N. G. et al. [Criteria for the application of additive technologies in energy and heavy engineering products]. *Additivnye tehnologii*. 2022, No. 3, P. 33–37 (In Russ.).

2. Komarov V. A. [Design of power additive structures: theoretical foundations]. *Ontologiya proektirovaniya*. 2017. Vol. 7, No. 2(24), P. 191–206 (In Russ). Doi: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-191-206.

3. Zhigurova E. E., Mumber K. E., Kazakov R. A. et al. [Metallographic analysis of a camera made by 3D printing]. *Reshetnevskie chteniya : materialy XXVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii* [Reshetnev readings : materials of the XXVI International Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, 2022, Part 1, P. 175–177 (In Russ.).

4. Smelov V. G., Sotov A. V., Agapovichev A. V. [Investigation of the structure and mechanical properties of products obtained by the SLS method from 316L steel powder]. *Chyornye metally*. 2016, No. 9, P. 61–65 (In Russ.).

5. Zhigurova E. E., Mumber K. E., Kazakov R. A. et al. [Analysis of the mechanical characteristics of the body material of a low-thrust rocket engine demonstrator camera made by 3D printing]. *Reshetnevskie chteniya : materialy XXVI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii* [Reshetnev readings : materials of the XXVI International Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, 2022, Part 1, P. 172–174 (In Russ.).

6. Gryaznov M. Yu., Shotin S. V., Chuvildeev V. N. [Physico-mechanical properties and structure of the Inconel 718 alloy obtained by the technology of layered laser fusion]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo*. 2014, No. 4–1, P. 46–51 (In Russ.).

7. Gu D. D., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Laser additive manufacturing of metallic components: Materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*. 2012, No. 57 (3), P. 133–164.

8. Lichtner A. C. [Practical study of shrinkage of 3D-printed ceramic parts made by DLP process]. *Additivnye tehnologii*. 2023, No. 2, P. 12–15 (In Russ.).

9. Krasnova E. V., Saushkin B. P., Slyusar I. A., Smeyan S. V. [Electrochemical processing of additive manufacturing products from metals and alloys]. *Additivnye tehnologii*. 2023, No. 2, P. 49–57 (In Russ.).

10. Zhao Chenhao, Qu Ningsong, Tang Xiaochuan. Removal of adhesive powders from additive manufactured internal surface via electrochemical machining with flexible cathode. *Precision Engineering*, 2021, Vol. 67, P. 438–452. Doi: 67.438-452.10.1016/j.precisioneng.2020.11.003.

11. Nandwana P., Kirka M., Okello A., Dehoff R. Electron beam melting of Inconel 718: effects of processing and post-processing. *Materials Science and Technology*. 2018, Vol. 34, P. 1–8. Doi: 10.1080/02670836.2018.1424379.

12. Mu Jierui, Sun Tengeng, Leung Chu Lun Alex et al. Application of electrochemical polishing in surface treatment of additively manufactured structures. *Progress in Materials Science*. 2023, Vol. 136, P. 103. Doi: 10.1016/j.pmatsci.2023.101109.

13. Mulla Mahaboob Basha, Shaik Mahaboob Basha, Jain V. K., Sankar M. R. State of the art on chemical and electrochemical based finishing processes for additive manufactured features. *Additive Manufacturing*. 2022, Vol. 58. Doi: 10.1016/j.addma.2022.103028.

14. An Linchao, Wang Dengyong, Zhu Di. Combined electrochemical and mechanical polishing of interior channels in parts made by additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. 2022, Vol. 51. Doi: 102638.10.1016/j.addma.2022.102638.

15. Sufriyanov V. Sh., Popovich A. A., Borisov E. V. [Influence of the thickness of the construction layer during selective laser melting of inconel 718 alloy on microstructure and properties]. *Cvetnye metally*. 2016, No. 1(877), P. 81–86 (In Russ.).

16. Krasnova E. V., Saushkin, B. P., Shandrov B. V. Pre-production engineering in additive manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering. *Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)*. 2021, Vol. 2. P. 261–268.

17. Eugenov A. G., Korolev V. A., Shurtakov S. V. [Prospects for the development of high-performance modes of selective laser fusion of nickel-based heat-resistant alloys for the manufacture of gas turbine engine parts]. *Additivnye tehnologii: nastoyashhee i budushhee : Sbornik докладов III Mezhdunarodnoy konferencii* [Additive technologies: Present and Future : Collection of reports of the III International Conference]. 2017, P. 23.

18. Demchenko A. I., Maksimov A. A., Andreiko A. I., Marshov V. S. [Joint production of parts by 3D printing in Grankom LLC and TSAT JSC]. *Additivnye tehnologii*. 2022, No. 3, P. 8–10 (In Russ.).

© Журавлев В. Ю., Манохина Э. С., Шикарев М. А., 2024

Журавлев Виктор Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры двигателей летательных аппаратов; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: vz@sibsau.ru.

Манохина Эльвира Сергеевна – магистрант кафедры двигателей летательных аппаратов, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: xim96@inbox.ru.

Шикарев Матвей Александрович – магистрант кафедры двигателей летательных аппаратов, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: 89134467140@bk.ru.

Zhuravlev Viktor Yur'yevich – Cand. Sc., Assistant professor of a department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: vz@sibsau.ru.

Manokhina Elvira Sergeevna – Master of the Department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: xim96@inbox.ru.

Shinkarev Matvey Alexandrovich – Master of the Department of Aircraft Engines; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: 89134467140@bk.ru.
