

DOI: 10.15593/2224-9982/2018.55.11

УДК 620.172.2

А.В. Ильиных

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ 12X18H10T, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Рассматриваются вопросы экспериментального исследования механического поведения стали 12X18H10T, полученной методом селективного лазерного сплавления порошка с размерами частиц от 10 до 63 мкм. Механические свойства стали 12X18H10T определялись при испытаниях на растяжение сплошных цилиндрических образцов, выращенных в вертикальном и горизонтальном направлениях. Заготовки для образцов выращивались на промышленной системе 3D-печати Concept Laser M2 CUSING 400 W, после чего обрабатывались механическим способом. Эксперименты проводились на специализированной испытательной системе Instron 8801 в Центре экспериментальной механики ПНИПУ. Для измерения деформаций использовался динамический осевой экстензометр Instron 2620-603. Приведены новые результаты испытаний на растяжение образцов нержавеющей стали 12X18H10T. Показано, что у образцов, выращенных послойно в горизонтальном направлении, все механические свойства значительно выше по величине, чем у образцов, выращенных в горизонтальном направлении. По результатам серии испытаний на растяжение выполнено сравнение механических характеристик образцов без термообработки и с термообработкой. Показано, что у термообработанных образцов величины предела прочности и условного предела текучести значительно ниже, модуля Юнга и коэффициента поперечного сужения немного выше, а коэффициента относительного удлинения значительно больше по сравнению с величинами аналогичных механических свойств у образцов, не прошедших термообработку.

Ключевые слова: экспериментальная механика, селективное лазерное сплавление, сталь 12X18H10T, растяжение, термообработка, механические свойства.

A.V. Ilinykh

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

MECHANICAL TENSILE PROPERTIES OF X12CRNITI-18-10 STEEL, OBTAINED BY THE METHOD OF SELECTIVE LASER MELTING

The problems of experimental investigation of mechanical behavior of steel X12CrNiTi-18-10 obtained by the selective laser melting method of powder with particle sizes from 10 to 63 microns are considered. Steel X12CrNiTi-18-10 mechanical properties were determined by tensile tests of solid cylindrical specimens grown in vertical and horizontal directions. Sample blanks were grown on the Concept Laser M2 CUSING 400 W industrial 3D printing system, was machined afterwards. The experiments were conducted on Instron 8801 specialized testing system at the PNRPU Experimental Mechanics Center. To measure deformations, an Instron 2620-603 dynamic axial extensometer was used. New results of tensile testing of stainless steel X12CrNiTi-18-10 are given. It is shown for samples grown in layers in the horizontal direction all the mechanical properties are significantly higher in magnitude than for samples grown in the horizontal direction. According to the results of a series of tensile tests, the mechanical characteristics of the samples were compared without heat treatment and with heat treatment. It is shown the heat-treated samples have the strength and conditional yield strength values significantly lower the Young's modulus and the transverse taper coefficient are slightly higher, and the coefficient of relative elongation is significantly higher compared to the values of similar mechanical properties of the samples that have not been heat treated.

Keywords: experimental mechanics, selective laser melting, steel X12CrNiTi-18-10, tensile, heat processing, mechanical properties.

Введение

Развитие современных цифровых производств на предприятиях возможно, за счет использования аддитивных технологий, которые позволяют изготавливать детали или элементы конструкций путем послойного синтеза по цифровой 3D-модели. В настоящее время наиболее распространенной при изготовлении металлических деталей сложной геометрии является технология селективного лазерного сплавления (СЛС), основанная на послойном сплавлении

металлического порошка лазерным лучом. В ходе внедрения в производство объемной печати в условиях масштабного использования, при наличии дешевого металлического порошка и отработанной технологии сплавления, можно значительно сократить издержки на материалах и создавать детали с разнообразной формой. Оптимизированная технология селективного лазерного сплавления позволяет сократить количество последующих операций финишной обработки поверхности изделий и перенаправить высвободившиеся ресурсы на другие направления [1–5].

Стремление к оптимизации формы, размеров и массы тела при сохранении эксплуатационных характеристик ответственных деталей и элементов конструкций, в том числе отдельных компонентов газотурбинных двигателей, приводит к необходимости использования современных подходов в проектировании и внедрения инновационных цифровых технологий в производство. В работах [6–9] показано, что применение в проектировании деталей авиационных двигателей алгоритма топологической оптимизации SIMP в различных инженерных программных комплексах и технологии селективного лазерного сплавления позволило в несколько раз сократить массу изделий при сохранении прочностных характеристик и произвести замену сложного узла из нескольких сборочных единиц на одну деталь сложной геометрии.

Одной из особенностей технологии селективного лазерного сплавления является наведенная анизотропия упругих и прочностных свойств, которая получается за счет послойного формирования всего объема изделия. Наличие остаточных напряжений после изготовления детали приводит к увеличению прочности и понижению пластичных свойств. Ввиду этого расположение детали при изготовлении по отношению к формируемым слоям влияет на ее механическое поведение при эксплуатационных нагрузках. Для снятия остаточных напряжений и повышения характеристик вязкости и пластичности проводят дополнительную температурную обработку [5].

Анализ работ авторов [10–15] показывает, что наиболее актуальным направлением научных исследований в области аддитивных методов изготовления сложнопрофильных деталей является изучение влияния технологических параметров изготовления (характеристики лазера, параметры сканирования слоев, свойства и температура порошков, расположение деталей в камере и т.д.) и дополнительных высокотемпературных способов обработки на структуру, пористость, физико-механические свойства и механическое поведение СЛС-сплавов.

Целью работы является исследование особенностей механического поведения стали 12X18H10T, полученной методом селективного лазерного сплавления, при одноосном растяжении сплошных цилиндрических образцов, выращенных в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Заготовки образцов выращивались на промышленной системе 3D-печати Concept Laser M2 CUSING 400 W, в которую загружался порошок стали 12X18H10T с размерами частиц от 10 до 63 мкм. На рис. 1 показаны принципиальная схема установки для селективного лазерного сплавления и расположение заготовок образцов по отношению к направлению выращивания.

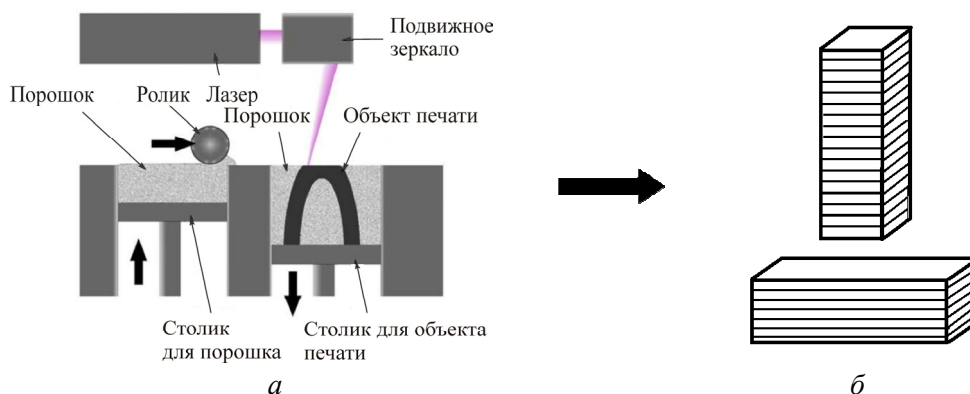


Рис. 1. Принципиальная схема установки селективного лазерного сплавления (а) и схемы изготовления заготовок образцов для испытаний (б), выращенных в вертикальном и горизонтальном направлениях (горизонтальной штриховкой показано расположение сплавляемых слоев в заготовках)

Эксперименты на растяжение образцов, полученных из порошка стали 12Х18Н10Т методом селективного лазерного сплавления, проводились в Центре экспериментальной механики ПНИПУ на универсальной сервогидравлической испытательной системе Instron 8801 (рис. 2, а), оснащенной датчиком усилий 100 кН и с точностью измерения 0,5 %. Для определения деформаций в процессе испытаний использовался осевой динамический экстензометр Instron 2620-603 с базой 25 мм и диапазоном измерения деформаций ± 4 %. На рис. 2, б показана схема установки образца в резьбовых захватах испытательной системы.

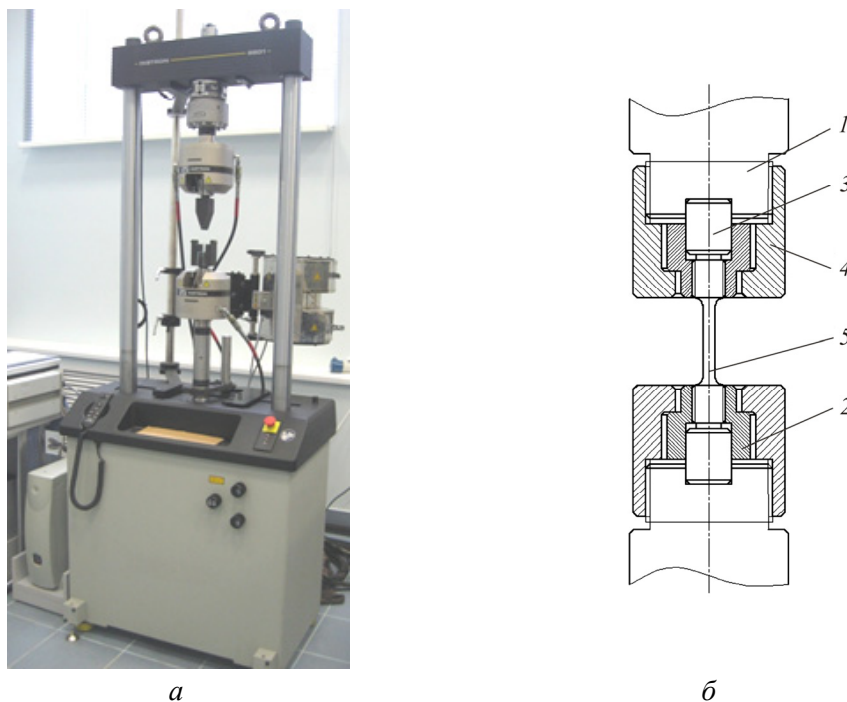


Рис. 2. Сервогидравлическая испытательная система Instron 8801 (а) и схема установки образца в захватах испытательной системы (б): 1 – тяга испытательной машины, 2 – адаптер, 3 – сухарь, 4 – накидная гайка, 5 – образец

После изготовления заготовки подвергались механической обработке для получения сплошных цилиндрических образцов с резьбовыми захватными частями и рабочей частью длиной 30 мм и диаметром 6 мм, сделанных в соответствии со стандартом ГОСТ 1497–84. На рис. 3 представлены эскиз образца и фотография закрепления датчика осевых деформаций на поверхности рабочей части образца.

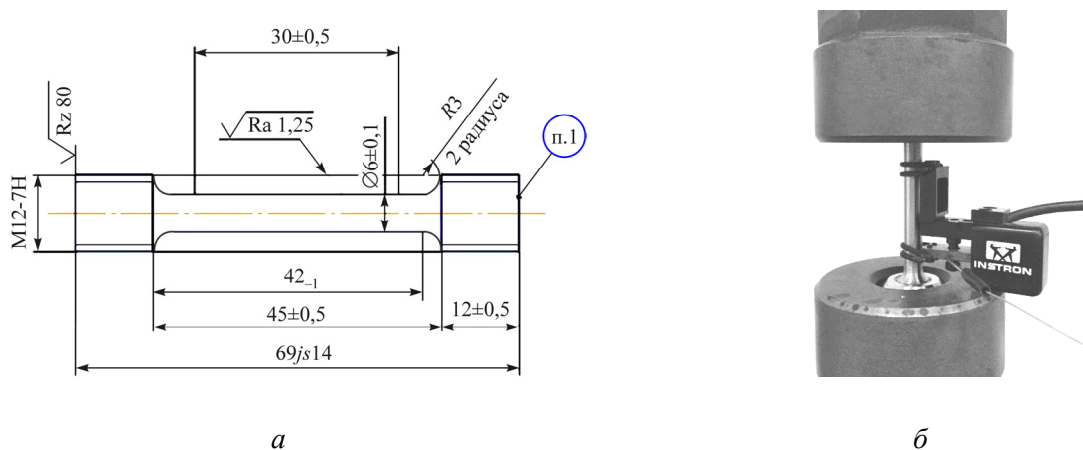


Рис. 3. Эскиз образца (а) и закрепление датчика осевых деформаций (б)

При проведении испытаний на растяжение образцов из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, полученных методом селективного лазерного сплавления, определялись следующие механические характеристики: предел прочности (σ_B , МПа), предел текучести ($\sigma_{0,2}$, МПа), относительное удлинение (δ , %) и сужение (ψ , %), модуль упругости на растяжение (E , ГПа). Анализ механического поведения рассматриваемой стали при растяжении в зависимости от направления выращивания заготовок производился на основе построенных диаграмм деформирования в диапазоне деформаций от 0 до 4 % (4 % – предельное показываемое значение у динамического экстензометра Instron 2620-603, установленного на базе измерения 25 мм). Для определения относительного удлинения при разрыве на образцы перед испытанием маркером наносились специальные метки, между которыми замерялось расстояние до начала испытания и после разрушения образцов на две части.

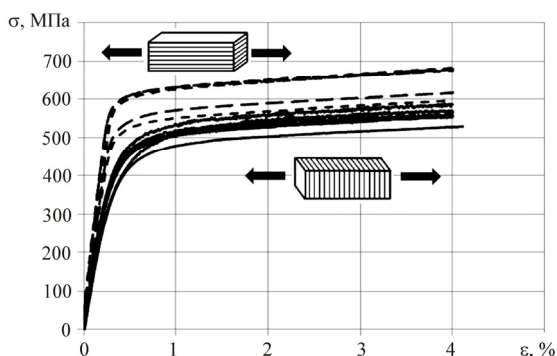


Рис. 4. Влияние технологии изготовления образцов на механическое поведение СЛС-12Х18Н10Т в условиях растяжения при поперечном формировании образца в поперечном (сплошная линия) и продольном (штриховая линия) направлениях

На рис. 4 показаны диаграммы деформирования для образцов, изготовленных в вертикальном и горизонтальном направлениях. Для каждого направления выращивания было испытано по семь образцов. Из полученных диаграмм и таблицы видно, что при горизонтальном способе выращивания величины модуля Юнга и предела прочности и текучести в среднем на 30 % превышают аналогичные величины, полученные на вертикально выращенных образцах. Но разбросы, оцениваемые по рассчитанным доверительным интервалам (см. таблицу), в результатах испытаний для предела прочности, условного предела текучести и модуля Юнга в среднем в 3 раза выше у тех образцов, которые выращены горизонтальным способом, что может свидетельствовать о необходимости корректировки технологических параметров сплавления при таком способе выращивания заготовок.

При этом у параметров относительного удлинения и относительного сужения отличия в величинах и разбросах результатов испытаний незначительны по сравнению с характеристиками прочности и жесткости.

Результаты испытаний СЛС-12Х18Н10Т на растяжение при разных технологических режимах изготовления (ТО – термическая обработка, доверительные интервалы рассчитаны методом Стьюдента с $\alpha = 0,95$ и $n = 7$)

Технология изготовления	E , ГПа	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Литой материал*	198	550–650	225–315	46–74	66–80
Вертикальные без ТО	156±12	660±14	445±10	56±1	35±6
Горизонтальные без ТО	200±19	826±37	580±38	57±3	42±6
Вертикальные с ТО	167±6	619±11	293±9	75±6	41±8

Примечание. * Использована информация с сайта <http://metallischekiy-portal.ru>.

На рис. 5 продемонстрировано влияние дополнительной термической обработки на механические свойства стали 12Х18Н10Т (см. таблицу), полученной методом селективного лазерного сплавления и выращенной вертикальным способом. Видно, что после температурной обработки заметнее всего снижается условный предел текучести (на 30 %) по сравнению с материалами без термообработки, менее существенно уменьшается предел прочности (на 8 %), что

может быть связано со снижением величины остаточных напряжений. Модуль Юнга и коэффициент относительного поперечного сужения изменяются незначительно. Наибольшее изменение при температурной обработке получило у коэффициента относительного удлинения, который увеличился примерно на 40 % по сравнению с материалом без термообработки.

Приведенные в таблице результаты экспериментальных исследований позволяют произвести оценку влияния различных технологий (литье и селективное лазерное сплавление) на комплекс механических свойств нержавеющей стали 12X18H10T. Видно, что материал, полученный методом СЛС и не прошедший температурную обработку, значительно превосходит по пределу прочности и условному пределу текучести, но значительно уступает по величине коэффициентов относительного удлинения и относительного поперечного сужения литому материалу. Термическая обработка вертикально выращенных образцов в целом не оказывает существенного влияния на модуль Юнга, приводит к снижению прочностных свойств, но при этом значительно позволяет увеличить коэффициент относительного удлинения.

Заключение

Таким образом, проведены экспериментальные исследования при одноосном растяжении сплошных цилиндрических образцов и стали 12X18H10T, полученной методом селективного лазерного сплавления при двух схемах выращивания заготовок в горизонтальном и вертикальном направлениях. Определены основные механические свойства, и построены диаграммы деформирования на растяжение нержавеющей стали СЛС-12X18H10T на образцах трех типов: выращенных вертикально без термообработки, выращенных вертикально с термообработкой и выращенных горизонтально без термообработки. Произведено сравнение механических свойств рассматриваемой стали при разных способах изготовления с характеристиками литого материала.

Показано, что механические свойства для образцов, выращенных в вертикальном направлении и прошедших термообработку, получились сопоставимыми по величинам с аналогичными характеристиками литой стали 12X18H10T, за исключением модуля Юнга и коэффициента относительного поперечного сужения.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО ПНИПУ при финансовой поддержке Министерства высшего образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0168 от 01.12.2015 г. в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218).

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Аддитивные технологии – доминанта национальной технологической инициативы // Интеллект и технологии. – 2015. – № 2(11). – С. 52–55.
2. Каблов Е.Н. Доминанта национальной технологической инициативы. Проблемы ускорения развития аддитивных технологий в России // Металлы Евразии. – 2017. – № 3. – С. 2–6.
3. Вдовин Р.А., Смелов В.Г. Совершенствование технологического процесса многономенклатурного производства // Известия СНЦ РАН. – 2013. – Т. 15, № 6(3). – С. 612–619.

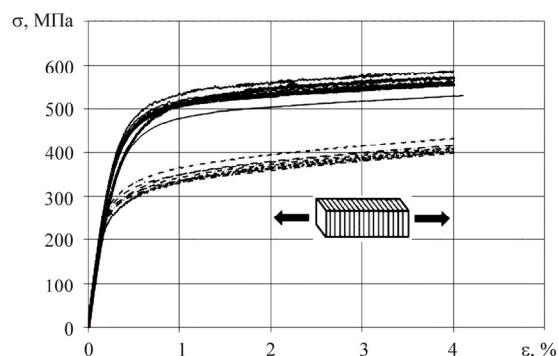


Рис. 5. Влияние технологии изготовления образцов на механическое поведение СЛС-12X18H10T в условиях растяжения при послойном формировании образца в поперечном направлении без термообработки (сплошная линия) и с термообработкой (штриховая линия)

4. Sercombe T.B., Li X. Selective laser melting of aluminium and aluminium metal matrix composites: review // *Materials Technology*. – 2016. – Vol. 31(2). – P. 77–85.
5. Селективное лазерное сплавление алюминиевых сплавов (обзор) / Н.В. Дынин, А.О. Иванова, Д.В. Хасиков, М.С. Оглодков // *Труды ВИАМ*. – 2017. – № 8(56). – С. 12–23.
6. Topology optimization of a gas-turbine engine part / R.N. Faskhutdinov, A.S. Dubrovskaya, K.A. Dongauzer, P.V. Maksimov, N.A. Trufanov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – Intern. Conf. on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. – 2017. – Vol. 177. – 5 p. – URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/177/1/012077> (accessed 9 December 2018). DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012077
7. Dubrovskaya A.S., Dongauzer K.A., Faskhutdinov R.N. The design of lightweight gas turbine engine parts using topology optimization // *MATEC Web Conf., International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017)*. – 2017. – No. 129. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/43/mateconf_icmtmte2017_01067.pdf (accessed 9 December 2018). DOI: 10.1051/mateconf/201712901067
8. Fetisov K.V., Maksimov P.V. Topology optimization and laser additive manufacturing in design process of efficiency lightweight aerospace parts // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1015. – 5 p. – URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/5/052006/meta> (accessed 9 December 2018).
9. Krotkikh A.A., Maximov P.V. Investigation of another approach in topology optimization // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol. 1015. – P. 5. – URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/3/032074/meta> (accessed 9 December 2018).
10. Грязнов М.Ю., Шотин С.В., Чувильдеев В.Н. Физико-механические свойства и структура сплава incoel 718, полученного по технологии послойного лазерного сплавления // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. – 2014. – № 4(1). – С. 46–51.
11. A study of the microstructure and the mechanical properties of an Al–Si–Ni alloy produced via selective laser melting / A. Aversa, M. Lorusso, G. Cattano, D. Manfredi // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2016. – Vol. 695. – P. 1470–1478. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.10.285
12. Aboulkhai N.T., Maskery I., Tuck C. The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment // *Materials Science & Engineering: A*. – 2016. – Vol. 667. – P. 139–146. DOI: 10.1016/j.msea.2016.04.092
13. Изменение механических свойств сплава АК9ч., полученного по технологии селективного лазерного сплавления / Д.К. Рябов, Л.В. Морозова, В.А. Королев, А.О. Иванова // *Труды ВИАМ*. – 2016. – № 9(45). – С. 12–19.
14. Reschetnik W. Fatigue crack growth behavior and mechanical properties of additively processed EN AW-7075 aluminium alloy // *Procedia Structural Integrity*. – 2016. – Vol. 2. – P. 3040–3048. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.380
15. Maskery I., Aboulkhair N.T., Corfield M.R. Quantification and characterisation of porosity in selectively lasermelted Al–Si10–Mg using X-ray computed tomography // *Materials Characterization*. – 2016. – Vol. 111. – P. 193–204. DOI: 10.1016/j.matchar.2015.12.001

References

1. Kablov E.N. Additivnyye tekhnologii - dominanta natsionalnoy tekhnologicheskoy initsiativy [Additive technologies - a dominant feature of the national technology initiative]. *Intel&Tech*, 2015, Vol. 2(11), pp. 52-55.
2. Kablov E.N. Dominanta natsionalnoy tekhnologicheskoy initsiativy. Problemy uskoreniya razvitiya additivnykh tekhnologiy v Rossii [The dominant feature of the national technology initiative. Problems of accelerating the development of additive technologies in Russia]. *Eurasian Metals*, 2017, Vol. 3, pp. 2-6.
3. Vdovin R.A., Smelov V.G. Sovershenstvovaniye tekhnologicheskogo protsessa mnogonomenklaturnogo proizvodstva [Multiproduct manufacture process improvement]. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2013, Vol. 6(3), pp. 612-619.
4. Sercombe T.B., Li X. Selective laser melting of aluminium and aluminium metal matrix composites: review. *Materials Technology*, 2016, Vol. 31(2), pp. 77-85.
5. Dynin N.V., Ivanova A.O., Khasikov D.V., Oglodkov M.S. Selektivnoye lazernoye splavleniye alyuminiyevykh spлавov (obzor) [Selective laser melting of aluminium alloy (review)]. *Proceedings of VIAM*, 2017, Vol. 8 (56), pp. 12-23.

6. Faskhutdinov R.N., Dubrovskaya A.S., Dongauzer K.A., Maksimov P.V., Trufanov N.A. Topology optimization of a gas-turbine engine part. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [Electronic resource], 2017, Vol. 177: Intern. Conf. on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2016, 2729 October 2016, Tomsk, Russian Federation, URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/177/1/012077> (accessed 9 December 2018). DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012077

7. Dubrovskaya A.S., Dongauzer K.A., Faskhutdinov R.N. The design of lightweight gas turbine engine parts using topology optimization. MATEC Web Conf., International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017), 2017, no.129, Art. 01067 (2017). URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/43/mateconf_icmtmte2017_01067.pdf (accessed 9 December 2018). DOI: 10.1051/mateconf/201712901067

8. Fetisov K.V., Maksimov P.V. Topology optimization and laser additive manufacturing in design process of efficiency lightweight aerospace parts. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1015, Art. 052006. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/5/052006/meta> (accessed 9 December 2018).

9. Krotkikh A.A., Maximov P.V. Investigation of another approach in topology optimization. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, Vol. 1015, Art. 052006. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/3/032074/meta> (accessed 9 December 2018).

10. Gryaznov M.Yu. SHotin S.V. CHuvildeyev V.N. Fiziko-mekhanicheskiye svoystva i struktura splava inconel 718, poluchennogo po tekhnologii posloynogo lazernogo splavleniya [Physico-mechanical properties and structure of inconel 718 alloy obtained by selective laser melting technology]. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2012, Vol. 5(1), pp. 43-50.

11. Aversa A., Lorusso M., Cattano G., Manfredi D. A study of the microstructure and the mechanical properties of an Al-Si-Ni alloy produced via selective laser melting // *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, Vol. 695, pp. 1470-1478. DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.10.285

12. Aboulkhai N.T., Maskery I., Tuck C. The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment // *Materials Science & Engineering: A*, 2016, Vol. 667, P. 139-146. DOI: 10.1016/j.msea.2016.04.092.

13. Ryabov D.K., Morozova L.V., Korolev V.A., Ivanova A.O. Izmeneniye mekhanicheskikh svoystv splava AK9ch., poluchennogo po tekhnologii selektivnogo lazernogo splavleniya [Changes in mechanical properties of the alloy AK9ch obtained by the technology of selective laser melting]. *Proceedings of VIAM*, 2016, Vol. 9 (45), pp. 12-19.

14. Reschetnik W. Fatigue crack growth behavior and mechanical properties of additively processed EN AW-7075 aluminium alloy. *Procedia Structural Integrity*, 2016, Vol. 2, pp. 3040-3048. DOI: 10.1016/j.prostr.2016.06.380

15. Maskery I., Aboulkhai N.T., Corfield M.R. Quantification and characterisation of porosity in selectively lasermelted Al-Si10-Mg using X-ray computed tomography. *Materials Characterization*, 2016, Vol. 111, pp. 193-204. DOI: 10.1016/j.matchar.2015.12.001

Об авторе

Ильиних Артем Валерьевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Экспериментальная механика и конструкционное материаловедение» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: ilinih@yandex.ru).

About the author

Artem V. Ilinikh (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Experimental Mechanics and Structural Materials Science, Perm National Research Polytechnical University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ilinih@yandex.com).

Получено 10.12.2018