



05.02.07 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

**ОТРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОГО РЕЖИМА СПЛАВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОПОРОШКОВОЙ КОМПОЗИЦИИ PR-12X18H10T**

**Мазалов Алексей Борисович**

Генеральный директор АО «Центр технологической компетенции аддитивных технологий», г. Воронеж, РФ

**Силутин Дмитрий Евгеньевич**

Заместитель управляющего директора по исследованиям и разработкам АО «Центр технологической компетенции аддитивных технологий», г. Воронеж, РФ

✉<sup>1</sup> **Зеленина Лидия Сергеевна**

Инженер АО «Центр технологической компетенции аддитивных технологий», г. Воронеж, РФ  
e-mail: lidiya.zelenina@3d-made.com

**Ендальцев Евгений Петрович**

Инженер АО «Центр технологической компетенции аддитивных технологий», г. Воронеж, РФ

**Аннотация.**

Рассмотрено применение металлопорошковой композиции из стали с добавками хрома и никеля 12X18H10T для использования в аддитивных технологиях 3D-печати методом селективного лазерного сплавления (SLM). Исследовано влияние мощности лазерного излучения и скорости сканирования лазерного луча на сплошность получаемой стали в образцах. особенности формирования материала в процессе селективного лазерного сплавления металла, определены технологические особенности оборудования. Получены результаты по физико-механическим свойствам сплава, полученного SLM: предел прочности образцов после закалки при температуре  $1050 \pm 10$  °C – 660 МПа; предел текучести – 356 МПа, относительное удлинение – 40 %.

**DEVELOPMENT OF AN EFFECTIVE MELTING MODE OF THE METAL-MACHINE COMPOSITION PR-12X18H10T**

**Mazalov Alexey Borisovich**

General director of JSC "Center for Technological Competence of Additive Technologies", Voronezh, RF

**Silutin Dmitry Evgenievich**

Deputy managing director for research and development JSC "Center for Technological Competence of Additive Technologies", Voronezh, RF

✉<sup>1</sup> **Zelenina Lydia Sergeevna**

Engineer JSC "Center for technological competence of additive technologies", Voronezh, RF  
e-mail: lidiya.zelenina@3d-made.com

**Endaltsev Evgeny Petrovich**

Engineer JSC "Center for technological competence of additive technologies", Voronezh, RF

**Annotation.**

The use of metal-powered composition made of steel with chromium and nickel additives 12X18H10T for use in additive 3D printing technologies by selective laser fusion method (SLM) is considered. The effect of laser radiation power and the scanning rate of the laser beam on the solidness of the resulting steel in samples was investigated. Features of the formation of material in the process of selective laser melting of metal, the technological features of the equipment are determined. Results on the physico-mechanical properties of the alloy obtained by SLM are obtained: the strength of the samples after quenching at a temperature of 1050 °C - 660 MPa; The yield strength is 356 MPa, the relative elongation is 40 %.

**Ключевые слова:** АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, СЕЛЕКТИВНОЕ ЛАЗЕРНОЕ СПЛАВЛЕНИЕ, МЕТАЛЛОПОРОШКОВАЯ КОМПОЗИЦИЯ, СПЛАВ 12X18H10T, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

**Keywords:** ADDITIVE TECHNOLOGIES, SELECTIVE LASER FLOW, METAL POWER SUPPLIES, ALLOY Fe12Cr18Ni10Mn, MECHANICAL PROPERTIES

<sup>1</sup> Автор для ведения переписки

### **Состояние вопроса исследования и актуальность работы**

Аустенитные нержавеющие стали составляют более 70 % от общего объема производства нержавеющей стали во всем мире. Они содержат не менее 16 % хрома и достаточное количество никеля и/или марганца для сохранения аустенитной структуры при любых температурах. Хром создает защиту от окисления и предотвращает коррозию во влажных условиях. Кристаллографическая структура аустенита представляет собой гранцентрированную кубическую (ГЦК) элементарную ячейку, характеризующуюся 12-ю системами скольжения (3 направления на 4 плоскостях скольжения).

Среди различных методов изготовления сложнопрофильных металлических деталей, включая методы 3D-печати, наибольшее распространение получил метод селективного лазерного послойного сплавления металлического порошка (СЛС). Использование метода обусловлено его достоинством, заключающемся, во-первых, в развитости и, в основном, отработанности технологии сплавления и, во-вторых, в значительном сокращении издержек используемого материала для изготовления сложнопрофильных деталей. На основе реализации резервов развития технологии СЛС путем оптимизации технологических режимов сплавления может быть заметно сокращена трудоемкость финишной обработки поверхностей получаемых деталей [1-5].

Как показывают известные исследования [6-10], оптимизация технологических режимов в технологиях СЛС при изготовлении сложнопрофильных деталей является наиболее актуальным направлением как для процесса изготовления, так и для процесса последующей обработки. В обоих случаях оптимизация процессов должна учитывать влияние на свойства детали значимых факторов. При изготовлении деталей к таким факторам относятся характеристики лазерного луча, кинематические параметры сканирования каждого слоя, параметры порошка для сплавления, технологические параметры координации деталей и др. При последующей обработке после печати к таким факторам относятся способы высокотемпературной обработки и их параметры, которые и определяют свойства получаемой детали, а именно, характеристики структуры, пористость, физико-механические свойства сплавов.

Целью работы является определение влияния основных параметров СЛС, а именно, мощности лазерного излучения и скорости сканирования лазерного луча, на сплошность получаемых образцов из стали 12X18H10T и их физико-механические характеристики при одноосном растяжении.

## **2 Материалы и методы**

### **2.1. Материалы**

В качестве материала для исследования выбран сплав на основе железа.

Химический состав используемой металлопорошковой композиции представлен в таблице 1. Порошок не содержит посторонних включений.

### **2.2. Оборудование**

В данной статье при 3D-печати экспериментальных образцов использовалась установка SLM 280HL (максимальная мощность лазера 400 Вт, рабочая камера 280x280x350 мм), работающая по технологии СЛС. В качестве защитного газа использовался азот высокой степени чистоты.

Таблица 1 – Химический состав порошковой композиции 12X18H10T

Марка	Массовая доля элементов, %				
	Fe	Cr	Ni	Mn	O, ppm
ПР-12X18H10T	основа	17,00-19,00	9,00-11,00	<2,00	< 300

СЭМ-изображения металлопорошковой композиции представлены на рисунке 1. Размеры частиц составляют 20-63 мкм с почти сферической формой частиц.

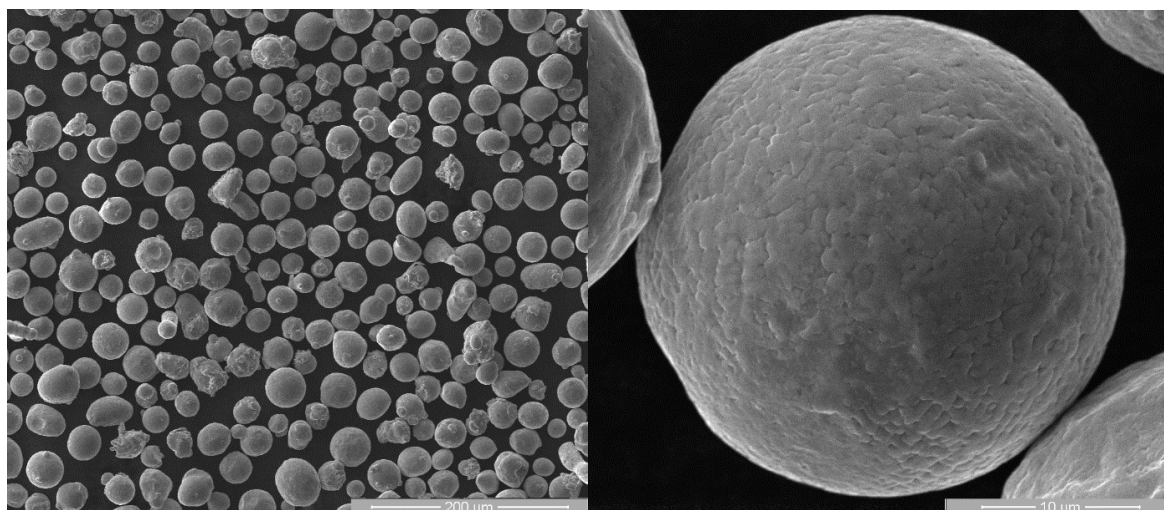


Рисунок 1 – СЭМ-изображения металлопорошковой композиции

СЭМ-изображения получены с использованием системы с электронным и сфокусированными пучками QUANTA 200 3D. Система компьютерной томографии ХТ Н 320 Nikon использовалась для получения данных о распределении пустот в объеме экспериментальных образцов. Используемое оборудование для проведения механических испытаний: двухколонная рама напольного типа серии 5980 (модель Instron 5982), стандартное устройство для испытаний на сжатие, стандартное устройство для испытаний на растяжение (губки зажимные), штангенциркуль ШЦЦ-1-150-0,01, копер МК – 10: максимальная энергия удара маятника при испытании 98,1 Дж (10 кгс·м), скорость маятника в момент удара 5 м/с; микроскоп МПП-2.

### 3 Результаты исследований

Первый этап исследования заключался в подборе оптимального режима сплавления металлопорошковой композиции.

Самыми значимыми факторами в данном эксперименте являются: мощность лазерного излучения и скорость лазерного сканирования, которые изменялись в процессе построения с определенным шагом.

Зафиксированные факторы: расстояние между треками – 140 мкм; толщина слоя – 530 мкм; инертная среда – азот; фракционный состав – 20–63 мкм; смещение по осям  $X$  и  $Y$  на 1 мм.

Главные параметры эксперимента, мощность лазерного излучения ( $P$ , Вт) и скорость лазерного сканирования ( $v$ , мм/с), определялись исходя из режима, заложенного в оборудовании и на основе литературных данных. Выбранный диапазон значений  $P$  и  $v$  для первой итерации лежит в интервалах 195-315 Вт и 550-850 мм/с, на основании значений которой построена матрица кубиков (размером  $7 \times 7 \times 5$  мм). Параметры процесса построения экспериментальных образцов второй итерации (265-285 Вт, 650-750 мм/с) были выбраны после анализа результатов исследования первой партии. В дальнейшем проведено металлографическое исследование по выявлению пор в поверхности, а также компьютерная томография.

Доля пор для большинства комбинаций параметров процесса составляет интервал от 0,1

до 2,5 %. Расчет процентного содержания пор и их площади осуществляется автоматически.

Процентное соотношение пор вычисляется по формуле

$$П = \frac{S_H}{S_{об}} \cdot 100 \% , \quad (1)$$

где П – пористость, %;  $S_H$  – площадь, занимаемая порами на поверхности образца,  $\text{мкм}^2$ ;  $S_{об}$  – площадь поверхности образца,  $\text{мкм}^2$ .

В пределах этого диапазона видно, что с увеличением скорости сканирования доля пор увеличивается до максимального значения в зависимости от используемой мощности лазера. Наиболее заметными являются комбинации самых низких энергетических параметров и наибольшей скорости (215 Вт и 850 мм/с). При такой низкой энергии на входе доля пор составила 6,7 %. Эти наблюдения становятся более ясными, если построить гистограмму пористости от значений исследуемых параметров (рис. 2).

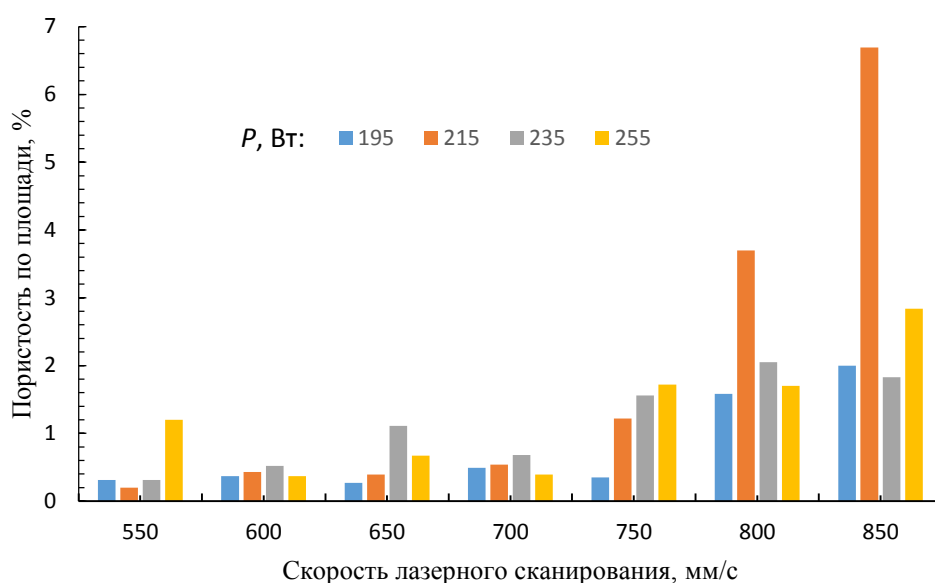
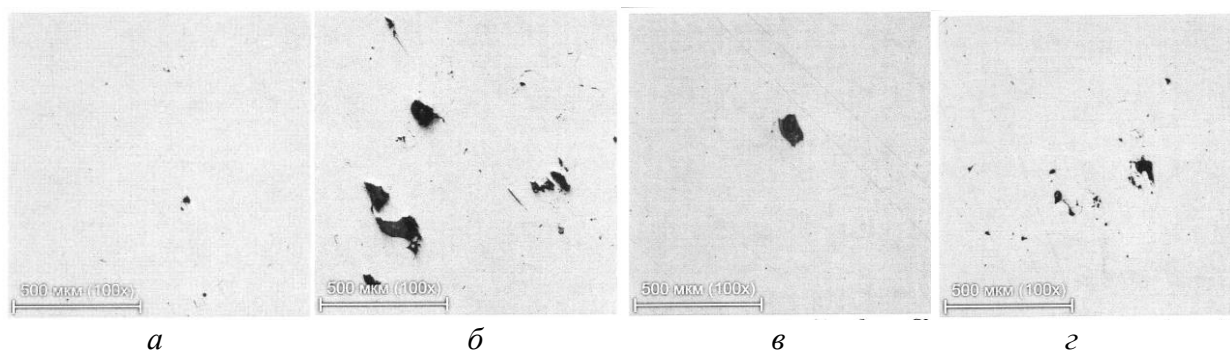


Рисунок 2 – Гистограмма значений пористости от мощности и скорости сканирования для первой итерации

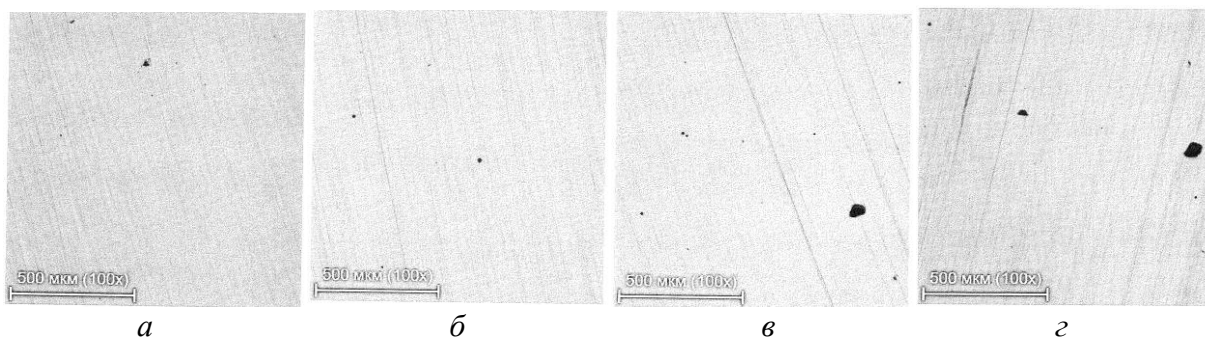
Результаты металлографических исследований представлены на рисунке 3 и 4. Показано, что на поверхности экспериментальных образцов из первой итерации присутствуют поры более 40  $\text{мкм}$ .



275 Вт, 700 мм/с – а; 295 Вт, 800 мм/с – б; 235 Вт, 600 мм/с – в; 195 Вт, 750 мм/с – г

Рисунок 3 – Фотографии образцов (первая итерация)





272 Вт, 855 мм/с – а; 273 Вт, 840 мм/с – б; 274 Вт, 840 мм/с – в; 270 Вт, 835 мм/с – г

Рисунок 4 – Фотографии образцов (вторая итерация)

Результаты металлографических исследований второй итерации экспериментальных образцов представлены в виде гистограммы на рисунке 5.

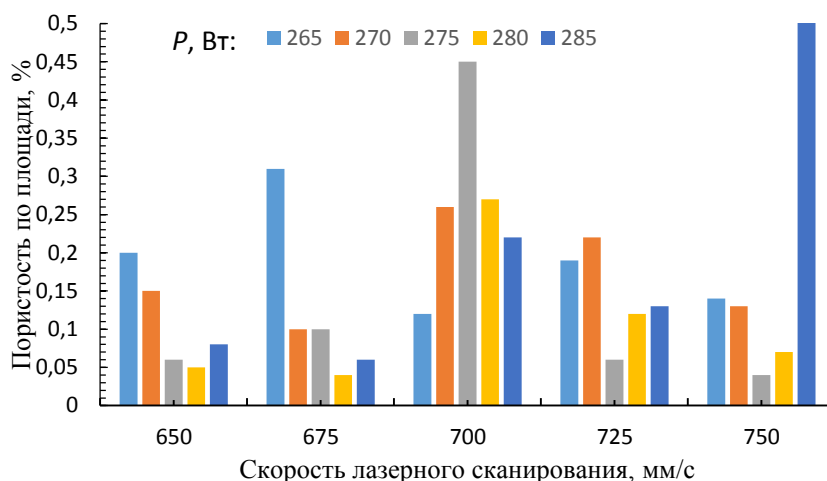


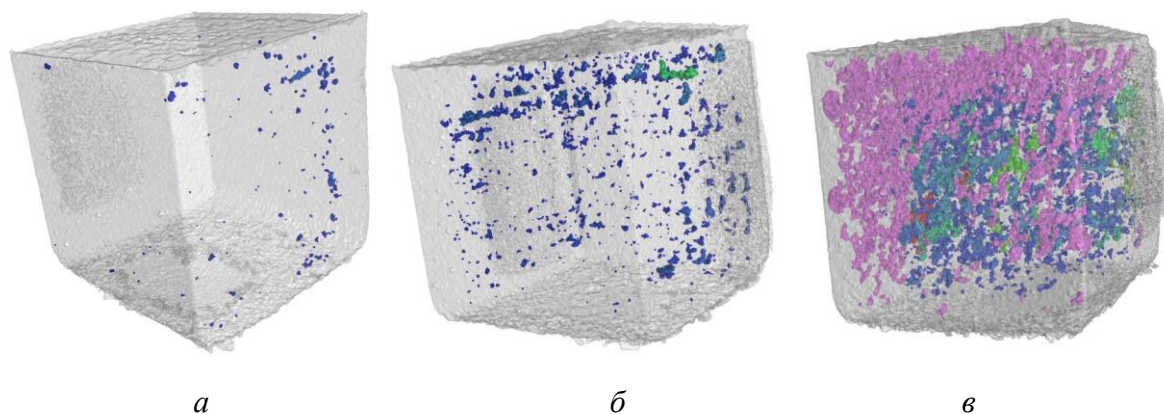
Рисунок 5 – Гистограмма значений пористости от мощности и скорости сканирования для второй итерации

Проанализировав полученные результаты получаем два режима 3D-печати, позволяющие получать изделия с наименьшей долей несплошностей.

В дальнейшем была произведена компьютерная томография экспериментальных образцов (кубическая форма, расположение в различных местах на платформе построения), напечатанных на двух указанных режимах. Результаты, показывающие содержание пор в объеме, представлены в таблице 2. Фотографии пор в объеме представлены на рисунках 6 и 7.

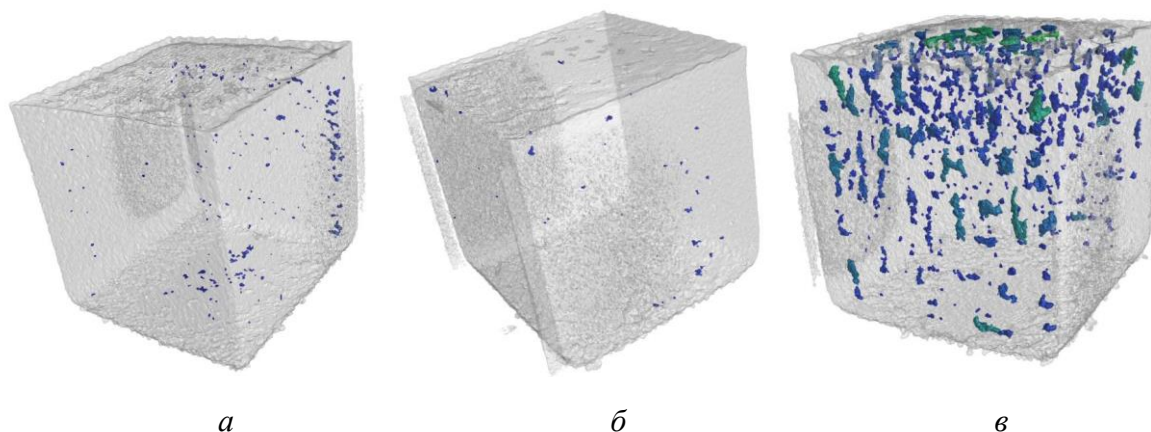
Таблица 2 – Результаты компьютерной томографии

Режим	265±15 Вт 740±25 мм/с левый	265±15 Вт 740±25 мм/с центральный	265±15 Вт 740±25 мм/с правый	270±15 Вт 665±25 мм/с левый	270±15 Вт 665±25 мм/с центральный	270±15 Вт 665±25 мм/с правый
Пустоты от общего объема, %	0,02	0,20	1,82	0,02	0,01	0,50



место расположения образца на платформе: *a* – левый, *б* – центральный, *в* – правый

Рисунок 6 – 3D-визуализация распределения пустот при режиме  $265 \pm 15$  Вт  $740 \pm 25$  мм/с



место расположения образца на платформе: *a* – левый, *б* – центральный, *в* – правый

Рисунок 7 – 3D-визуализация распределения пустот при режиме  $270 \pm 15$  Вт  $665 \pm 25$  мм/с

Анализ рисунков 6 и 7 показывает, что в образцах, расположенных в правой области печати, большое количество пор, что обусловлено технологическими особенностями используемого оборудования, которое необходимо учитывать при назначении режимов.

Учитывая требования, что, во-первых, размеры дефектов (микропор) должны быть не более 40 мкм и, во-вторых, что относительная плотность материала должна быть не менее 99,4 %, получим наиболее оптимальный режим сплавления металлопорошковой композиции ПР-12Х18Н10Т –  $270 \pm 15$  Вт,  $665 \pm 25$  мм/с.

Механические испытания проводились на образцах после термической обработки путем закалки при температуре  $1050 \pm 10$  °С.

Результаты проведенных механических испытаний: предел прочности  $\sigma_b = 660$  МПа; предел текучести  $\sigma_T = 356$  МПа; относительное удлинение 40 %.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что изделия аддитивного производства не уступают по свойствам деталям, изготовленным по традиционным технологиям.

#### 4 Обсуждение и заключение

1 Показано, что форма частиц металлопорошковой композиции – сферическая, фракционный состав 20-63 мкм.

2 В ходе проведенных экспериментов подобран эффективный режим сплавления металлопорошковой композиции: мощность лазерного излучения  $270 \pm 15$  Вт и скорость лазер-

ного сканирования  $665 \pm 25$  мм/с.

3 Полученные механические свойства сплава после термообработки не уступают сплаву, полученному с помощью традиционных технологий.

Таким образом, можно сделать вывод, что оптимизация технологии СЛС даже по двух факторам позволяет обеспечить высокое качество сплавления порошков нержавеющей стали по критериям сплошности и прочностных свойств, что открывает перспективы для дальнейшего развития и применения технологии при дополнительной оптимизации по влиянию других факторов.

### Список литературы

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 splavov (obzor) [Selective laser melting of aluminium alloy (review)]. Proceedings of VIAM, 2017, Vol. 8 (56), pp. 12-23.

6 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.

7 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.

8 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.

9 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.

10 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.

### 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 splavov (obzor) [Selective laser melting of aluminium alloy (review)]. Proceedings of VIAM, 2017, Vol. 8 (56), pp. 12-23.

6 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.

7 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.

8 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.

9 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.

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

© Мазалов А.Б., Силютин Д.Е., Зеленина Л.С., Ендальцев Е.П., 2021