

## ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ В ИЗДЕЛИЯХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ\*

А.П. Симонов

cimonovleshka@yandex.ru

SPIN-код: 7469-8023

А.А. Дренин

drenin@inbox.ru

SPIN-код: 8671-0369

А.О. Денежкин

denezhkin.anton95@gmail.com

SPIN-код: 6556-9171

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

---

### Аннотация

*Использование медных сплавов в технологии селективного лазерного плавления позволит существенно улучшить характеристики радиаторов. Для получения качественных деталей необходимо контролировать получаемую структуру металла. В работе исследованы образцы, полученные на разработанной компанией Additive Solutions установке D250 с волоконным лазером мощностью 400 Вт. Рассказано о постановке и проведении эксперимента. Описана и проанализирована структура полученных образцов, выявлены ее особенности и зависимости ее характеристик от режимов процесса выращивания. Обсуждено влияние этих особенностей на механические свойства деталей. Приведены оптимальные параметры процесса выращивания и указаны способы их поиска.*

### Ключевые слова

*Аддитивное производство, селективное лазерное плавление, микроструктура, бронза, сплав БрХ, выращивание, лазер, ячеистая структура*

Поступила в редакцию 24.09.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

---

**Введение.** Аддитивное производство, в частности, селективное лазерное плавление (СЛП) является активно развивающимся направлением. Основным преимуществом технологии СЛП является возможность получения сложной геометрии, формирование которой традиционными методами затруднено или невозможно. В СЛП используется узкий ассортимент материалов. Наиболее часто применяемые на сегодняшний день материалы — коррозионно-стойкая сталь, титан и алюминий. Медь и медные сплавы представляют большой интерес как материалы для СЛП, однако еще не получили широкого распространения из-за сложности их обработки [1]. Теплообменники, в которых используется высокая теплопроводность меди, могут быть значительно усовершенствованы с помощью СЛП. Снятие ограничений по сложности геометрии внутренних каналов позволит изготавливать крайне эффективные теплоотводящие элементы [2].

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00940

Для получения качественных изделий необходимо контролировать структуру металла, которая определяет механические свойства. Оптимизация структуры зерна и его размера позволит улучшить механические свойства производимых изделий [3]. В работе исследовано влияние режимов выращивания на структуру зерен в образцах из медного сплава, полученного по технологии СЛП. Режимы и условия выращивания определяют градиент температуры, скорость затвердевания, что, как показано в работе, влияет на структуру зерна. Варьируя основные параметры выращивания, можно добиться желаемой структуры зерна в изделии.

Получение плотных, прочных образцов из меди затруднено: повышенная теплопроводность и низкая жидкотекучесть нарушают стабильность процесса СЛП и сужают область оптимальных параметров; высокая отражательная способность меди в инфракрасном диапазоне создает дополнительные трудности [1]. Эти трудности сдерживают внедрение производства деталей из меди. Однако существуют способы стабилизации процесса выращивания. Одним из них является дополнительный подогрев бункера построения с целью снижения теплового потока из зоны расплавленного металла, что несколько компенсирует высокую теплопроводность меди. В работе исследована структура металла образцов из сплава БрХ, полученных по технологии СЛП с использованием дополнительного подогрева. Проанализировано влияние параметров процесса выращивания на качественные и количественные характеристики структуры.

**Постановка эксперимента. Материал.** Исходным материалом для этого исследования является распыленный газом порошок бронзы ПР-БрХ с содержанием хрома 0,4...1,2 % и содержанием примесей не более 0,3 % [4]. Его фотография, полученная под микроскопом, показана на рис. 1. Распределение частиц по размерам (13...53 мкм) со средним размером 32 мкм представлено на рис. 2. Измерение проводили на лазерном анализаторе Horiba Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-350. Размер частиц порошка является приемлемым для процесса СЛП, нормальное распределение позволяет достичь высокой плотности упаковки порошинок в слое [5].

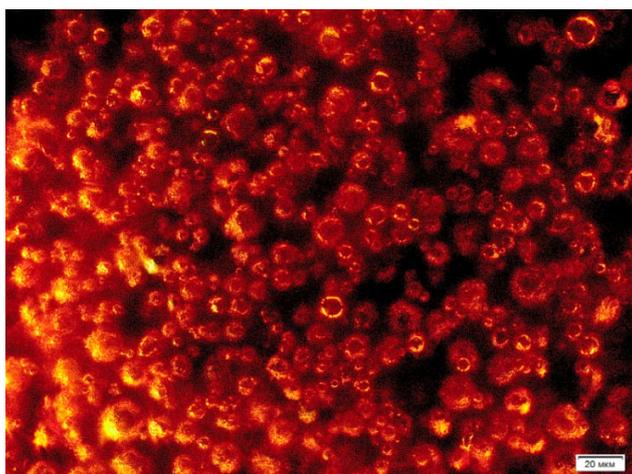
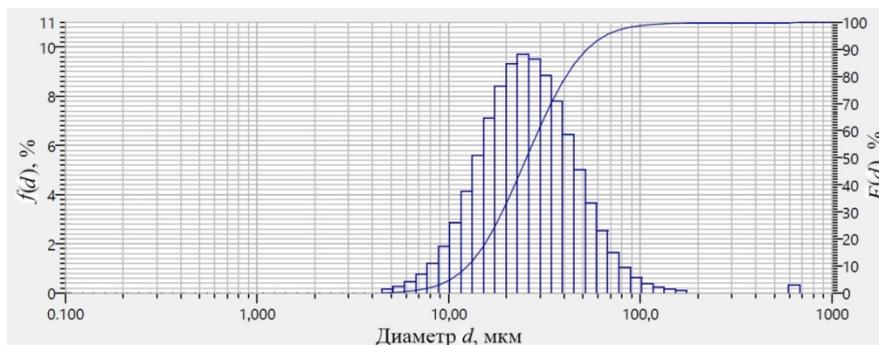


Рис. 1. Увеличенное изображение порошка ПР-БрХ

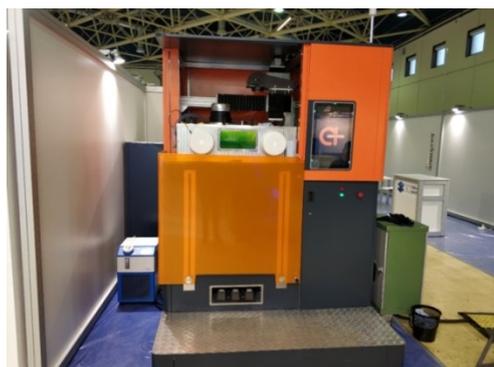


**Рис. 2.** Распределение порошка ПР-БрХ по размеру частиц:

$f(d)$  — дифференциальная функция распределения по размеру;  
 $F(d)$  — интегральная функция распределения по размеру

**Оборудование.** Эксперимент проводили на установке D250, разработанной компанией Additive Solutions. Установка оснащена вакуумной камерой с контролируемой инертной атмосферой и иттербиевым волоконным лазером мощностью 400 Вт. Параметры камеры D250 приведены ниже:

Рабочая область, мм .....	250 × 250 × 250
	(имеется уменьшитель зоны построения)
Тип лазера .....	иттербиевый волоконный
Мощность излучения лазера, Вт .....	400
Оптика .....	Focal-πShaper, объектив F-theta
Скорость сканирования, м/с .....	15,0
Диаметр луча в фокусе, мкм .....	65
Толщина слоя, мкм .....	от 20
Защитный газ .....	азот, аргон



**Рис. 3.** Установка D250

**Планирование и обработка эксперимента.** Для проведения эксперимента необходимо выбрать параметры процесса, влияние которых планируется изучать. Зачастую в технологии СЛП используют четыре параметра: толщину слоя, диаметр пятна, расстояние между треками и скорость сканирования [6]. В этом исследовании изучали влияние скорости сканирования на структуру металла.

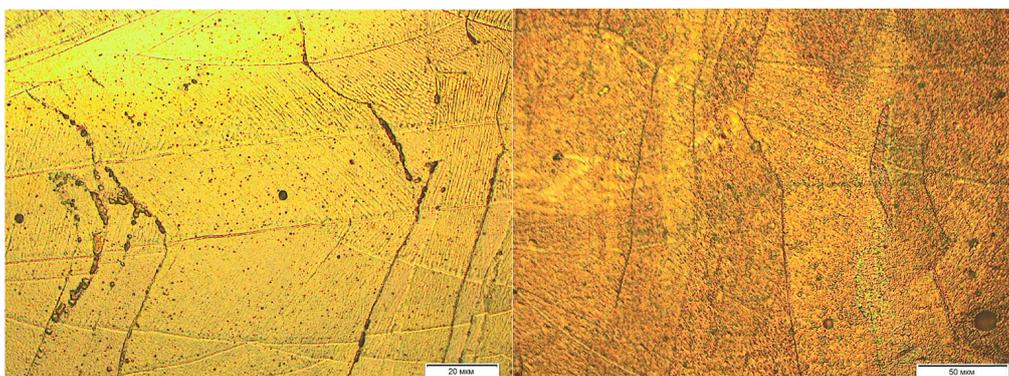
Расстояние между треками выбирали равным диаметру пятна. Из-за вышеупомянутых особенностей меди было решено проводить серию экспериментов на мощности 350 Вт и варьировать скорость сканирования. Подогрев имитировали повторным сканированием слоя без нане-

сения новой порции порошка. Из полученных образцов были изготовлены шлифы. Изображение полученных образцов можно увидеть на рис. 4, а некоторых шлифов — на рис. 5. Для всех десяти экспериментов толщина слоя составляла 25 мкм, диаметр пятна и расстояние между треками — 120 мкм, скорость сканирования изменялась в диапазоне 100...1000 мм/с с шагом 100 мм/с.

**Обсуждение результатов.** Множественные циклы плавления-затвердевания во время процесса выращивания изделия приводят к возникновению сложных микроструктур и изменениям пространственных характеристик зерен в материале. Типичная морфология затвердевших зерен, которая широко наблюдается и в других материалах, полученных различными методами аддитивного производства, — это крупная столбчатая структура, вытянутая по направлению построения изделия сквозь слои в результате эпитаксиального роста [7–10]. Кроме того, часто наблюдаются мелкие равноосные зерна вблизи поверхности ванны расплава [10, 11]. Согласно теориям затвердевания сплавов, из-за концентрационного переохлаждения морфология раздела твердого и жидкого состояний может быть плоской, ячеистой или дендритной в зависимости от состояния затвердевания и состава материала [12]. Концентрационное переохлаждение происходит с перераспределением растворенного вещества, что приводит к тому, что температура жидкости на фронте затвердевания становится ниже температуры ликвидуса.



Рис. 4. Полученные образцы



*a*

*б*

Рис. 5. Первичная структура зерна:

*a* — скорость сканирования 300 мм/с; *б* — скорость сканирования 900 мм/с

В медных образцах в пределах ванны расплава наблюдается дендритная и ячеистая первичная структура на низких и высоких скоростях выращивания

соответственно (рис. 5). Изменения направления хода луча от слоя к слою создают анизотропию свойств по осям, поперечным направлению построения детали, к минимуму. По границе вторичной структуры и границе слоя происходит выделение хрома, примесей и скопление пор. Вторичная структура определяет различие свойств по оси выращивания, и ее размеры определяются режимами выращивания (рис. 6). Зависимость средней ширины колонии для вторичной структуры от скорости сканирования приведена ниже:

Скорость сканирования, мм/с .....	200	300	400	600	800	900
Средняя ширина колонии, мкм .....	—	15,3	17,9	19,4	16,0	14,63

На низких скоростях лазерного луча скорость охлаждения ниже. В этом случае наблюдается вторичная столбчатая структура относительно большего размера. Вторичные зерна имеют схожие размеры. Увеличение скорости лазерного луча приводит к увеличению скорости охлаждения. Наблюдается измельчение первичной структуры, а также измельчение и сужение вторичной структуры. Такая структура будет иметь более высокие прочностные характеристики.

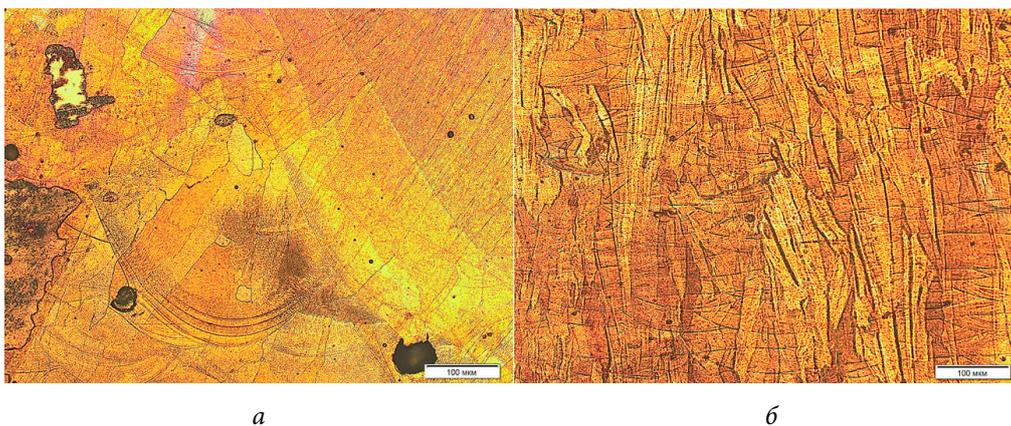


Рис. 6. Вторичная структура:

*a* — скорость сканирования 200 мм/с; *б* — скорость сканирования 900 мм/с

Дендритная структура (скорость сканирования 300 мм/с) показана на рис. 5. Хорошо видна слоистая структура, образованная во время процесса построения детали. Границы слоев хорошо различимы. Толщина слоев составляет 25 мкм.

Изучение тонкой структуры металла показало, что она имеет сложное гетерогенное дендритное строение. Вытянутые дендриты шириной около 1 мкм образуют вытянутые колонии, разориентированные друг относительно друга. В пределах одного валика очень редко встречается более одной дендритной колонии.

Неравновесные условия кристаллизации при последовательном наплавлении слоев металла предопределяют появление различий в формировании кри-

сталлов. В направлении фронта кристаллизации дендриты образуют протяженные ветви кристаллов, ориентированные в разных направлениях и объединенные в колонии. Обращает на себя внимание некоторое преимущественное направление с небольшими углами разориентации отдельных участков. При переходе через границу слоя дендритная колония в большинстве случаев сохраняется, изменяется лишь угол ориентации дендритов, что связано с изменением направления образования дорожки и соответственно направления фронта кристаллизации. Механические свойства материала отдельной колонии сильно анизотропны.

На режимах с высокой скоростью выращивания вместо дендритов видна ячеистая структура. Ячейки также формируют продолговатые колонии. Отметим, что механические свойства материала с ячеистой структурой более изотропны, чем материала с дендритной структурой.

На режиме с малой скоростью колонии выражены слабее, имеют крупные размеры и слабовыраженный направленный рост, хотя дендриты сохраняют свое направление роста.

Образование границы происходит на поверхности предыдущего слоя. В самом начале процесса кристаллизации нового слоя дендриты сохраняют свое направление роста, поскольку градиент температур на таком малом масштабе не оказывает сильного влияния. Со временем его влияние становится значительнее, и в определенный момент кристаллы почти одновременно изменяют направление роста (рис. 7).

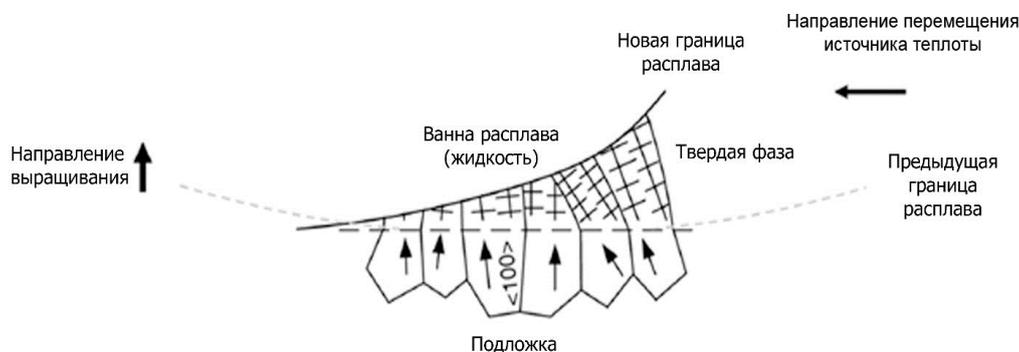


Рис. 7. Схема образования границы между слоями

Границы колоний хорошо прослеживаются (см. рис. 7). На этих границах скапливается большое количество примесей, неоднородностей, пор. На некоторых участках можно заметить скольжение колоний друг относительно друга вдоль их границ, вызванное термическими деформациями, что свидетельствует о невысокой прочности этих границ и ведет к ухудшению механических свойств в направлениях, перпендикулярных росту колоний.

**Выводы.** Режим выращивания позволяет управлять структурой и механическими свойствами выращиваемых изделий. Почти при всех режимах образуются продолговатые столбчатые зерна, растущие через слои. На малых скоростях

они больше (17,9 мкм), на больших — меньше (14,63 мкм). Согласно соотношению Холла — Петча, прочность образцов с меньшим размером зерен выше. Это будет подтверждено в следующих экспериментах.

Границы зерен с большим количеством примесей имеют слабое сцепление, что может приводить к ухудшению механических свойств. Приоритетным является режим, при котором на границах будет выделяться минимальное количество примесей, хрома и пор. Из полученных результатов можно выделить режимы с большими скоростями сканирования, при которых наблюдается меньшее количество примесей. На больших скоростях хром и примеси не успевают выделяться (900 мм/с).

Внутренне строение зерен имеет дендритное строение на малых скоростях выращивания и ячеистое на больших (ширина дендритов 1 мкм). Ячеистая структура обладает более изотропными механическими свойствами. Данный вывод также будет проверен в дальнейшей работе.

## Литература

- [1] Colopia M., Caprio L., Demir A.G., et al. Selective laser melting of pure Cu with a 1 kW single mode fiber laser. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 74, pp. 59–63. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.030 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282711830814X>
- [2] Baraty Beni S., Bahrami A., Salimpour M.R. Design of novel geometries for microchannel heat sinks used for cooling diode lasers. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2017, vol. 112, pp. 689–698. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.043 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001793101633513X>
- [3] Popovich A., Sufiarov V., Polozov I., et al. Microstructure and mechanical properties of additive manufactured copper alloy. *Mater. Lett.*, 2016, vol. 179, pp. 38–41. DOI: 10.1016/j.matlet.2016.05.064 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167577X16307819>
- [4] ГОСТ 18175-78. Бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением. М., Изд-во стандартов, 2004.
- [5] Pleass C., Jothi S. Influence of powder characteristics and Additive manufacturing process parameters on the microstructure and mechanical behaviour of Inconel 625 fabricated by selective laser melting. *Addit. Manuf.*, 2018, vol. 24, pp. 419–431. DOI: 10.1016/j.addma.2018.09.023 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860418303518>
- [6] Mao Z., Zhanga D.Z., Jianga J., et al. Processing optimisation, mechanical properties and microstructural evolution during selective laser melting of Cu-15Sn high-tin bronze. *Mater. Sci. Eng. A*, 2018, vol. 721, pp. 125–134. DOI: 10.1016/j.msea.2018.02.051 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092150931830234X>
- [7] Wu X., Liang J., Mei J., et al. Microstructures of laser-deposited Ti-6Al-4V. *Mater. Des.*, 2004, vol. 25, no. 2, pp. 137–144. DOI: 10.1016/j.matdes.2003.09.009 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306903001742>
- [8] Al-Bermani S.S., Blackmore M.L., Zhang W., et al. The origin of microstructural diversity, texture, and mechanical properties in electron beam melted Ti-6Al-4V. *Metall. Mater. Trans.*, 2010, vol. 41, no. 13, pp. 3422–3434. DOI: 10.1007/s11661-010-0397-x URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11661-010-0397-x>

- [9] Ma M., Wang Z., Zeng X. A comparison on metallurgical behaviors of 316L stainless steel by selective laser melting and laser cladding deposition. *Mater. Sci. Eng.*, 2017, vol. 685, pp. 265–273. DOI: 10.1016/j.msea.2016.12.112 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092150931631615X>
- [10] Helmer H., Bauerei A., Singer R.F., et al. Grain structure evolution in Inconel 718 during selective electron beam melting. *Mater. Sci. Eng.*, 2016, vol. 668, pp. 180–187. DOI: 10.1016/j.msea.2016.05.046 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509316305536>
- [11] Zhu Y., Liu D., Tian X., et al. Characterization of microstructure and mechanical properties of laser melting deposited Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy. *Mater. Des.*, 2014, vol. 56, pp. 445–453. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.11.044 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913010935>
- [12] Kou S. *Welding metallurgy*. John Wiley & Sons, 2003.

**Симонов Алексей Павлович** — студент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Дренин Алексей Анатольевич** — аспирант кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Денежкин Антон Олегович** — аспирант кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Колчанов Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Симонов А.П., Дренин А.А., Денежкин А.О. Особенности формирования микроструктуры в изделиях, полученных по технологии селективного лазерного плавления из медных сплавов. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 11(40). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-11-547>

## FEATURES OF MICROSTRUCTURE FORMATION IN PRODUCTS OBTAINED BY THE TECHNOLOGY OF SELECTIVE LASER MELTING FROM COPPER ALLOYS

A.P. Simonov

cimonovleshka@yandex.ru

SPIN-code: 7469-8023

A.A. Drenin

drenin@inbox.ru

SPIN-code: 8671-0369

A.O. Denezhkin

denezhkin.anton95@gmail.com

SPIN-code: 6556-9171

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

*The use of copper alloys in selective laser melting technology will significantly improve the characteristics of radiators. To obtain quality parts, it is necessary to control the resulting metal structure. In this work, we studied the samples obtained on the installation D250 developed by Additive Solutions with a 400 W fiber laser. The article discusses the setting up and running of experiment. The structure of the obtained samples is described and analyzed, its features and the dependences of its characteristics on the modes of the growing process are revealed. The influence of these features on the mechanical properties of parts is discussed. The optimal parameters of the growing process are given and methods for their search are indicated.*

### Keywords

*Additive manufacturing, selective laser melting, microstructure, bronze, BrH alloy, growing, laser, cellular structure*

Received 24.09.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

---

### References

- [1] Colopia M., Capriola L., Demir A.G., et al. Selective laser melting of pure Cu with a 1 kW single mode fiber laser. *Procedia CIRP*, 2018, vol. 74, pp. 59–63. DOI: 10.1016/j.procir.2018.08.030 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282711830814X>
- [2] Baraty Beni S., Bahrami A., Salimpour M.R. Design of novel geometries for microchannel heat sinks used for cooling diode lasers. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2017, vol. 112, pp. 689–698. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.03.043 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001793101633513X>
- [3] Popovich A., Sufiiarov V., Polozov I., et al. Microstructure and mechanical properties of additive manufactured copper alloy. *Mater. Lett.*, 2016, vol. 179, pp. 38–41. DOI: 10.1016/j.matlet.2016.05.064 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167577X16307819>
- [4] GOST 18175-78. Bronzy bezolovyannye, obrabatyvaemye davleniem [State standard 18175-78. Tin-free pressure-worked bronzes. Grades]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 2004 (in Russ.).
- [5] Pleass C., Jothi S. Influence of powder characteristics and Additive manufacturing process parameters on the microstructure and mechanical behaviour of Inconel 625 fabricat-

- ed by selective laser melting. *Addit. Manuf.*, 2018, vol. 24, pp. 419–431. DOI: 10.1016/j.addma.2018.09.023 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860418303518>
- [6] Maoa Z., Zhanga D.Z., Jianga J., et al. Processing optimisation, mechanical properties and microstructural evolution during selective laser melting of Cu-15Sn high-tin bronze. *Mater. Sci. Eng. A*, 2018, vol. 721, pp. 125–134. DOI: 10.1016/j.msea.2018.02.051 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092150931830234X>
- [7] Wu X., Liang J., Mei J., et al. Microstructures of laser-deposited Ti-6Al-4V. *Mater. Des.*, 2004, vol. 25, no. 2, pp. 137–144. DOI: 10.1016/j.matdes.2003.09.009 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306903001742>
- [8] Al-Bermani S.S., Blackmore M.L., Zhang W., et al. The origin of microstructural diversity, texture, and mechanical properties in electron beam melted Ti-6Al-4V. *Metall. Mater. Trans.*, 2010, vol. 41, no. 13, pp. 3422–3434. DOI: 10.1007/s11661-010-0397-x URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11661-010-0397-x>
- [9] Ma M., Wang Z., Zeng X. A comparison on metallurgical behaviors of 316L stainless steel by selective laser melting and laser cladding deposition. *Mater. Sci. Eng.*, 2017, vol. 685, pp. 265–273. DOI: 10.1016/j.msea.2016.12.112 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092150931631615X>
- [10] Helmer H., Bauerei A., Singer R.F., et al. Grain structure evolution in Inconel 718 during selective electron beam melting. *Mater. Sci. Eng.*, 2016, vol. 668, pp. 180–187. DOI: 10.1016/j.msea.2016.05.046 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509316305536>
- [11] Zhu Y., Liu D., Tian X., et al. Characterization of microstructure and mechanical properties of laser melting deposited Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy. *Mater. Des.*, 2014, vol. 56, pp. 445–453. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.11.044 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306913010935>
- [12] Kou S. *Welding metallurgy*. John Wiley & Sons, 2003.

**Simonov A.P.** — Student, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Drenin A.A.** — PhD Student, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Denezhkin A.O.** — PhD Student, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Kolchanov D.S., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

**Please cite this article in English as:**

Simonov A.P., Drenin A.A., Denezhkin A.O. Features of microstructure formation in products obtained by the technology of selective laser melting from copper alloys. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2019, no. 11(40). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-11-547.html> (in Russ.).