

Научная статья

УДК 621.762

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32105>



*Д.В. Воеводенко* ✉, *К.А. Стариков*, *А.А. Попович*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия

✉ [voevodenko.daniil@mail.ru](mailto:voevodenko.daniil@mail.ru)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЛП НА МИКРОСТРУКТУРУ ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА**

*Аннотация.* Проведено исследование влияния параметров селективного лазерного плавления (СЛП) с высокотемпературным подогревом платформы до 1000 °С на формирование микроструктуры жаропрочного никелевого сплава GTD-111. Установлено, что варьирование параметров сканирования (линейной и объемной плотности энергии) не оказывает существенного влияния на размер выделений  $\gamma'$ -фазы. Однако выявлена закономерная пространственная неоднородность микроструктуры: в нижних слоях всех образцов, подвергавшихся длительному высокотемпературному воздействию, наблюдается начальная стадия формирования рафт-структуры (удлиненные частицы  $\gamma'$ -фазы). Показано, что данный процесс является следствием коагуляции частиц под влиянием температуры подогрева платформы и внутренних напряжений, что аналогично начальной стадии деградации сплавов в условиях ползучести. Результаты работы важны для разработки режимов СЛП монокристаллических изделий, таких как лопатки газовых турбин, с целью управления их структурой и эксплуатационными свойствами.

*Ключевые слова:* жаропрочный никелевый сплав, селективное лазерное плавление, микроструктура, параметры.

*Благодарности:* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда в рамках реализации проекта «Разработка новых функциональных материалов, интеллектуальных конструкций и технологий их создания методами аддитивного производства на основе современных подходов моделирования и прогнозирования свойств» (Соглашение № 23-79-30004, <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>).

*Для цитирования:*

Воеводенко Д.В., Стариков К.А., Попович А.А. Исследование влияния параметров СЛП на микроструктуру жаропрочного никелевого сплава // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 1. С. 66–74. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32105>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32105>*D.V. Voevodenko* ✉, *K.A. Starikov*, *A.A. Popovich*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

✉ [voevodenko.daniil@mail.ru](mailto:voevodenko.daniil@mail.ru)

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SLM PARAMETERS ON THE MICROSTRUCTURE OF A HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY

**Abstract.** The influence of the parameters of selective laser melting (SLM) with high-temperature heating of the platform to 1000 °C on the formation of the microstructure of heat-resistant nickel alloy GTD-111 has been studied. It was found that varying the scanning parameters (linear and volumetric energy density) has not significantly affect the size of the  $\gamma'$ -phase secretions. However, a regular spatial heterogeneity of the microstructure was revealed: in the lower layers of all samples exposed to prolonged high-temperature exposure, the initial stage of formation of the raft structure (elongated particles of the  $\gamma'$ -phase) was observed. It was shown that this process was a consequence of particle coagulation under the influence of platform heating temperature and internal stresses, which was similar to the initial stage of alloy degradation under creep conditions. The results of the work are important for the development of SLM modes for monocrystalline products, such as gas turbine blades, in order to control their structure and operational properties.

**Keywords:** heat-resistant nickel alloy, selective laser melting, microstructure, parameters.

**Acknowledgements:** The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-30004 “Development of new functional materials, intelligent structures and technologies for their creation using additive manufacturing methods based on modern approaches to modeling and predicting properties”. Available online: <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>.

**Citation:**

Voevodenko D.V., Starikov K.A., Popovich A.A., Investigation of the effect of SLM parameters on the microstructure of a heat-resistant nickel alloy, *Global Energy*, 32 (01) (2026) 66–74, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32105>

**Введение.** Современные исследования в области технологий селективного лазерного плавления (СЛП) концентрируются вокруг двух основных векторов. Один из них нацелен на разработку и изучение новых сплавов, специально адаптированных для аддитивного производства [1–6]. Другой вектор подразумевает всестороннее изучение воздействия технологических параметров и режимов СЛП на такие ключевые характеристики изделий, как плотность, микроструктура и механические свойства [7–10].

Несмотря на высокую исследовательскую активность, внедрение аддитивных подходов в серийные промышленные процессы пока не достигло широкого масштаба. Основными сдерживающими факторами являются отсутствие унифицированных стандартов, а также недостаточная изученность как теоретических основ, так и практических нюансов применения технологии. В то же время СЛП предлагает ряд принципиальных преимуществ, недоступных при использовании традиционных способов обработки. Ключевое из них – практически неограниченная свобода в создании деталей сложной геометрии, позволяющая реализовывать конструкции, которые невозможно получить классическими методами. Такие инженерные решения открывают путь к оптимизации компонентов технических систем, к облегчению веса конструкций без потери их надежности и, как результат, к повышению эффективности готовых изделий. Ярким

примером служат топологически оптимизированные, или бионические, структуры, создаваемые на основе расчетов методом конечных элементов. Данный подход, при котором из модели удаляется материал из ненагруженных областей, позволяет формировать сложные конфигурации, осуществимые исключительно благодаря аддитивным технологиям [11, 12].

Дальнейший прогресс в области СЛП в значительной степени будет зависеть от разработки новых материалов и усовершенствования методов их обработки. Особую роль здесь играет целенаправленное управление структурой и свойствами изделия, которое становится возможным благодаря особенностям кристаллизации, протекающей непосредственно в цикле печати [13–16].

Целью настоящего исследования являлось изучить, каким образом параметры СЛП в условиях повышенной температуры подогрева рабочей платформы воздействуют на процесс формирования структуры и на эксплуатационные характеристики материала.

### **Материалы и методы исследования**

В данной работе использовался порошок жаропрочного никелевого сплава, применяемого для получения продуктов методом направленной кристаллизации. Для исследований был выбран распространенный жаропрочный никелевый сплав GTD-111, который применяется для производства турбинных лопаток (химический состав приведен в табл. 1).

Таблица 1

**Химический состав никелевого сплава (мас. %)**

Table 1

**Chemical composition of nickel alloy (% by weight)**

Элемент	Ni	Co	Cr	W	Mo	Al	Ti	Ta	C
Содержание, %	Осн.	9,0–10,0	13,5–14,3	3,5–4,1	1,7–2,3	2,7–3,2	2,7–3,2	2,5–3,1	0,07–0,12

В исследовании применялся порошковый материал, полученный методом плазменного распыления вращающегося электрода. Особенности фазового состава – наличие значительного количества интерметаллидных соединений – в сочетании с экстремальными скоростями локального нагрева и охлаждения при СЛП приводят к возникновению трещин. Для уменьшения этого эффекта используется подогрев рабочей зоны, который снижает температурные градиенты и уменьшает вероятность разрушения. Сплав относится к трехфазным системам и включает:  $\gamma$ -твердый раствор на основе Ni с ГЦК-решеткой; дисперсионные выделения  $\gamma'$ -фазы на базе интерметаллида Ni<sub>3</sub>Al; карбиды типа MC.

Образцы для исследований изготовлены на установке высокотемпературного послойного лазерного синтеза «ВПЛС Меркурий» методом СЛП. Данная установка была разработана в СПбПУ вместе с ЗАО «Биоград» (3DLam). Данная установка имеет мультилазерную систему с одним лазером 500 Вт и двумя по 1000 Вт, габариты рабочей зоны 210 мм по высоте и 120 мм в диаметре, а также подогрев платформы до 1300 °С.

Изготовление образцов для экспериментов проводилось в инертной среде аргона при содержании кислорода не выше 20 ppm. Чтобы снизить вероятность возникновения температурного градиента при плавлении новых слоев, подложка предварительно была нагрета до 1000 °С. Прочие параметры процесса СЛП приведены в табл. 2.

После окончания процесса 3D печати образцы были удалены с платформы с применением эрозионной резки и отполированы вдоль направления роста образцов. После этого образцы были подвержены травлению в растворе, содержащем сульфат меди, а также серную и соляную

Таблица 2

## Параметры процесса СЛП

Table 2

## SLM process parameters

Плотность энергии	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Линейная (Дж/мм)	0,1	0,3	0,5
Объемная (Дж/мм <sup>3</sup> )	60	100	150

кислоты. Дальнейшие исследования структуры, выявление и количественная оценка дефектов проводились с использованием сканирующего электронного микроскопа Carl Zeiss Supra 55VP. Оптическая микроструктура образцов после СЛП исследовалась на световом оптическом микроскопе Leica DMI 5000.

## Результаты и обсуждение

Распределение частиц порошка по размерам находится в диапазоне:  $d_{10} = 26,3$  мкм;  $d_{60} = 92,7$  мкм, со средним значением  $d_{50} = 52,1$  мкм. Порошок имеет форму частиц, близкую к идеальным сферам, с небольшим количеством поверхностных дефектов.

Микроструктурные исследования показали наличие округлых частиц  $\gamma'$ -фазы ( $\text{Ni}_3\text{Al}$ ), распределенных в  $\gamma$ -матрице на основе Ni(Al). Средние размеры таких частиц составляют 0,16–0,21 мкм. При анализе зон, расположенных на одинаковом расстоянии от основания образцов, зависимости размеров выделений  $\gamma'$  от параметров лазерного плавления зафиксировано не было. Однако в направлении роста отмечено постепенное уменьшение их размеров (рис. 2).

В нижней части образцов наблюдаются удлиненные частицы  $\gamma'$ -фазы с неполными границами раздела твердого раствора. Такая морфология может быть связана с коагуляцией частиц и трансформацией их формы. Поскольку нижние слои дольше подвергались воздействию температуры нагрева платформы, именно там возможно начало формирования рафт-структуры. Обычно подобная структура возникает в жаропрочных никелевых сплавах в условиях длительной ползучести при высоких температурах.

При ползучести пластическая деформация в  $\gamma/\gamma'$ -системах может происходить за счет скольжения дислокаций в каналах матрицы с изгибом частиц  $\gamma'$  либо через их рассеечение дислокациями, что сопровождается накоплением дефектов. Формирование рафт-структуры исключает

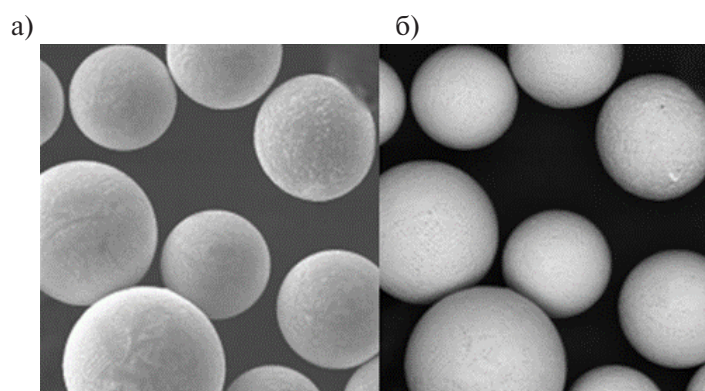


Рис. 1. Частицы порошка жаропрочного никелевого сплава GTD-111. Тип детектора, использованного при обследовании: а) SE; б) BSE

Fig. 1. Particles of heat-resistant nickel alloy GTD-111 powder. Type of detector used in the examination: a) SE; b) BSE

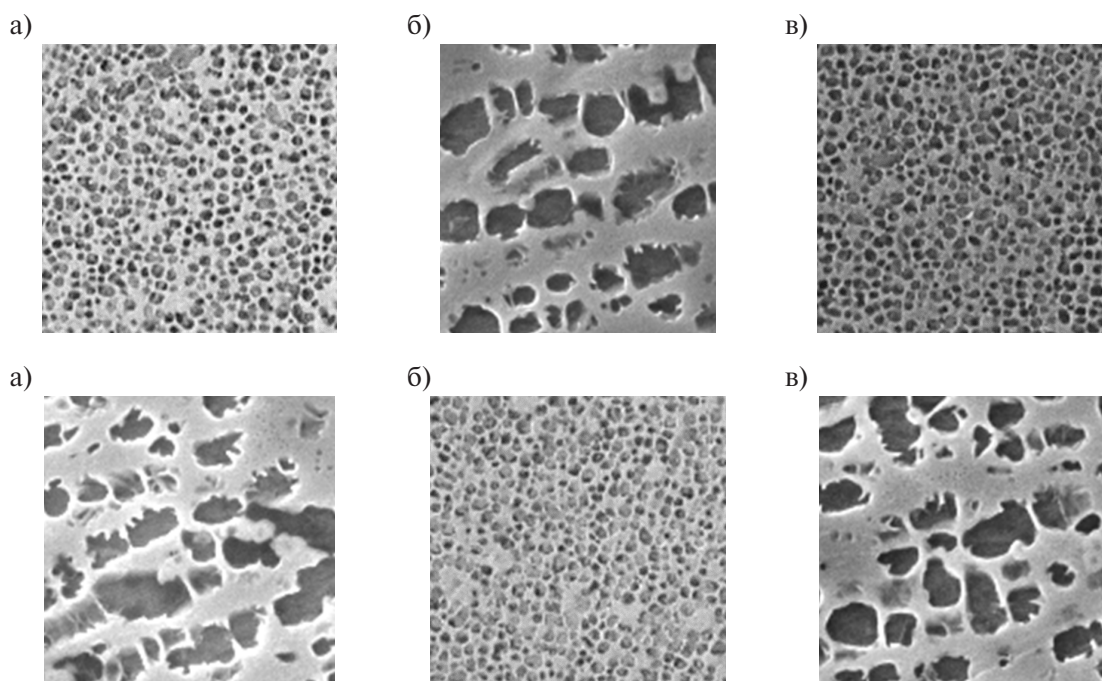


Рис. 2. Изображения микроструктуры  $\gamma/\gamma'$  после СЛП в верхней (а) и нижней (б) частях образца 1; в верхней (в) и нижней (г) частях образца 2; в верхней (д) и нижней (е) частях образца 3

Fig. 2. Images of the  $\gamma/\gamma'$  microstructure after SLM in the upper (a) and lower (b) parts of sample 1; in the upper (c) and lower (d) parts of sample 2; in the upper (e) and lower (f) parts of sample 3

оба этих механизма, вынуждая материал деформироваться за счет перемещения винтовых дислокаций – процесса энергозатратного, особенно при отношении длины пластин к их толщине больше единицы. В этом случае более вероятным становится рассечение пластин парой дислокаций, что приводит к охрупчиванию нижних слоев. Даже несмотря на начальную стадию объединения частиц  $\gamma'$ -фазы в пластины, при изготовлении, например, турбинной лопатки процесс займет значительно больше времени. Это означает, что нижние слои дольше будут находиться в условиях высокотемпературной ползучести, что может привести к развитию полноценной рафт-структуры.

Послойное формирование изделий в технологии СЛП накладывает ограничения на величину температуры подогрева и общую продолжительность процесса при производстве деталей с монокристаллической или направленной структурами, таких как, например, лопатки газовых турбин. Во время сильного подогрева рабочей платформы значения температуры должны быть зафиксированы в рабочих пределах выбранного сплава.

### Заключение

В данной статье образцы были изготовлены с использованием трех наборов параметров (табл. 2) для изучения влияния параметров процесса СЛП на микроструктуру  $\gamma/\gamma'$ . Для сравнительной оценки микроструктуры полученных образцов определялись размер и форма частиц  $\gamma'$ -фазы. На основе полученных данных мы можем заключить, что параметры сканирования не влияют на микроструктуру. Однако в ходе исследования было выявлено закономерное изменение микроструктуры в нижних слоях всех образцов. В нижних слоях происходит начальная стадия перехода от округлой структуры частиц  $\gamma'$ -фазы к рафт-структуре. Этот переход происходит под воздействием высокой температуры нагрева рабочей платформы ( $>1000$  °C), а также под воздействием внутренних напряжений, возникающих в образцах в процессе кристаллизации при СЛП.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Chauvet E., Tassin C., Blandin J.-J., Dendievel R., Martin G.** Producing Ni-base superalloys single crystal by selective electron beam melting, *Scripta Materialia*, 152 (2018) 15–19. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.03.041
- [2] **Battaglia F., Zhang X., Arie M.A., Shoostari A., Sarmiento A.P., Ohadi M.** Additive manufacturing of a high temperature, Ni-based superalloy compact heat exchanger: A study on the role of select key printing parameters, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 145 (4) (2023) 041901. DOI: 10.1115/1.4056484
- [3] **Ramsperger M., Körner C.** Selective electron beam melting of the single crystalline nickel-base superalloy CMSX-4®: From columnar grains to a single crystal, *Superalloys 2016: Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Symposium of Superalloys*, (2016) 341–349.
- [4] **Mazzer E.M., da Silva M.R., Gargarella P.** Revisiting Cu-based shape memory alloys: Recent developments and new perspectives, *Journal of Materials Research*, 37 (2022) 162–182. DOI: 10.1557/s43578-021-00444-7
- [5] **Hao Liu, Xinbao Zhao, Yong Yuan, Yingying Dang, Weiqi Li, Jiachen Xu, Yuan Cheng, Quanzhao Yue, Yuefeng Gu, Ze Zhang.** Influence of thermal exposure on microstructural stability and tensile properties of a new Ni-base superalloy, *Journal of Materials Research and Technology*, 21 (2022) 4462–4472. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.11.050
- [6] **Zifu Li, Hongyao Yu, Zhongnan Bi, Xingmao Wang, Guohao Liu, Guangbao Sun, Rui Wang, Shangzhou Zhang.** Oxygen-rich combustion behaviors and mechanisms of a new Ni-Cr-based superalloy fabricated by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 914 (2024) 147133. DOI: 10.1016/j.msea.2024.147133
- [7] **Wei Xiong, Liang Hao, Yan Li, Danna Tang, Qian Cui, Zuying Feng, Chunze Yan.** Effect of selective laser melting parameters on morphology, microstructure, densification and mechanical properties of super-saturated silver alloy, *Materials & Design*, 170 (2019) 107697. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107697
- [8] **Popovich V.A., Borisov E.V., Sufiyarov V.Sh., Popovich A.A.** Tailoring the properties in functionally graded alloy Inconel 718 using additive technologies, *Metal Science and Heat Treatment*, 60 (2019) 701–709. DOI: 10.1007/s11041-019-00343-z
- [9] **Nandhakumar R., Venkatesan K.** A process parameters review on selective laser melting-based additive manufacturing of single and multi-material: Microstructure, physical properties, tribological, and surface roughness, *Materials Today Communications*, 35 (2023) 105538. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.105538
- [10] **Jalali M., Mohammadi K., Movahhedy M.R., Karimi F., Khatiboleslam Sadrnezhaad S., Chernyshikhin S.V., Shishkovsky I.V.** SLM additive manufacturing of NiTi porous implants: a review of constitutive models, finite element simulations, manufacturing, heat treatment, mechanical, and biomedical studies, *Metals and Materials International*, 29 (2023) 2458–2491. DOI: 10.1007/s12540-023-01401-1
- [11] **Gasser A., Backes G., Kelbassa I., Weisheit A., Wissenbach K.** Laser additive manufacturing: Laser metal deposition (LMD) and selective laser melting (SLM) in turbo-engine applications, *Laser Technik Journal*, (2010) 58–63. DOI: 10.1002/latj.201090029
- [12] **Kushwaha A.K., Rahman M.H., Slater E., Patel R., Evangelista C., Austin E., Tompkins E., McCarrroll A., Rajak D.K., Menezes P.L.** Powder bed fusion-based additive manufacturing: SLS, SLM, SHS, and DMLS, *Tribology of Additively Manufactured Materials*, (2022) 1–37. DOI: 10.1016/B978-0-12-821328-5.00001-9
- [13] **Razumov N.G., Popovich A.A., Grigor'ev A.V., Silin A.O., Goncharov I.S.** Morphology of high-strength heat-resistant steel powder for machines for additive production from shavings, *Metal Science and Heat Treatment*, 60 (2019) 710–714. DOI: 10.1007/s11041-019-00344-y
- [14] **Jianjun Xu, Xin Lin, Pengfei Guo, Hongbiao Dong, Xiaoli Wen, Qiuge Li, Lei Xue, Weidong Huang.** The initiation and propagation mechanism of the overlapping zone cracking during laser solid forming

of IN-738LC superalloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 749 (2018) 859–870. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.366

[15] **Cheng Ai, Qing Li, Jun Zhang, Haijun Su, Wenchao Yang, Lin Liu, Yi Ru, Heng Zhang, Yuanyuan Song, Yongnan Chen, Shusuo Li, Shengkai Gong.** Effect of substituting Mo for W on  $\gamma/\gamma'$  partitioning behaviors of alloying elements in heat-treated second generation Ni based single crystal superalloys: An atom probe tomography study, *Intermetallics*, 134 (2021) 107198. DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107198

[16] **Fengyun Ding, Linsen Zhou, Liang Zhao, Xilong Dou, Kela Xiao, Jiangfeng Song, Jiguang Du, Gang Jiang.** Theoretical study on the influence of Cr, Mo, and W alloying additions on the helium behavior in nickel, *Journal of Nuclear Materials*, 565 (2022) 153720. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2022.153720

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ВОЕВОДЕНКО Даниил Витальевич** – инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: vovodenko.daniil@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3045-5923>

**СТАРИКОВ Кирилл Андреевич** – младший научный сотрудник, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, без степени.

E-mail: starikovkirillandreevich@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8466-3340>

**ПОПОВИЧ Анатолий Анатольевич** – директор ИММТ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, д-р техн. наук.

E-mail: popovicha@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

### REFERENCES

[1] **E. Chauvet, C. Tassin, J.-J. Blandin, R. Dendievel, G. Martin,** Producing Ni-base superalloys single crystal by selective electron beam melting, *Scripta Materialia*, 152 (2018) 15–19. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.03.041

[2] **F. Battaglia, X. Zhang, M.A. Arie, A. Shoostari, A.P. Sarmiento, M. Ohadi,** Additive manufacturing of a high temperature, Ni-based superalloy compact heat exchanger: A study on the role of select key printing parameters, *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 145 (4) (2023) 041901. DOI: 10.1115/1.4056484

[3] **M. Ramsperger, C. Körner,** Selective electron beam melting of the single crystalline nickel-base superalloy CMSX-4®: From columnar grains to a single crystal, *Superalloys 2016: Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Symposium of Superalloys*, (2016) 341–349.

[4] **E.M. Mazzer, M.R. da Silva, P. Gargarella,** Revisiting Cu-based shape memory alloys: Recent developments and new perspectives, *Journal of Materials Research*, 37 (2022) 162–182. DOI: 10.1557/s43578-021-00444-7

[5] **Hao Liu, Xinbao Zhao, Yong Yuan, Yingying Dang, Weiqi Li, Jiachen Xu, Yuan Cheng, Quanzhao Yue, Yuefeng Gu, Ze Zhang,** Influence of thermal exposure on microstructural stability and tensile properties of a new Ni-base superalloy, *Journal of Materials Research and Technology*, 21 (2022) 4462–4472. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.11.050

- [6] Zifu Li, Hongyao Yu, Zhongnan Bi, Xingmao Wang, Guohao Liu, Guangbao Sun, Rui Wang, Shangzhou Zhang, Oxygen-rich combustion behaviors and mechanisms of a new Ni-Cr-based superalloy fabricated by selective laser melting, *Materials Science and Engineering: A*, 914 (2024) 147133. DOI: 10.1016/j.msea.2024.147133
- [7] Wei Xiong, Liang Hao, Yan Li, Danna Tang, Qian Cui, Zuying Feng, Chunze Yan, Effect of selective laser melting parameters on morphology, microstructure, densification and mechanical properties of super-saturated silver alloy, *Materials & Design*, 170 (2019) 107697. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107697
- [8] V.A. Popovich, E.V. Borisov, V.Sh. Sufiyarov, A.A. Popovich, Tailoring the properties in functionally graded alloy Inconel 718 using additive technologies, *Metal Science and Heat Treatment*, 60 (2019) 701–709. DOI: 10.1007/s11041-019-00343-z
- [9] R. Nandhakumar, K. Venkatesan, A process parameters review on selective laser melting-based additive manufacturing of single and multi-material: Microstructure, physical properties, tribological, and surface roughness, *Materials Today Communications*, 35 (2023) 105538. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.105538
- [10] M. Jalali, K. Mohammadi, M.R. Movahhedy, F. Karimi, S. Khatiboleslam Sadrnezhad, S.V. Chernyshikhin, I.V. Shishkovsky, SLM additive manufacturing of NiTi porous implants: a review of constitutive models, finite element simulations, manufacturing, heat treatment, mechanical, and biomedical studies, *Metals and Materials International*, 29 (2023) 2458–2491. DOI: 10.1007/s12540-023-01401-1
- [11] A. Gasser, G. Backes, I. Kelbassa, A. Weisheit, K. Wissenbach, Laser additive manufacturing: Laser metal deposition (LMD) and selective laser melting (SLM) in turbo-engine applications, *Laser Technik Journal*, (2010) 58–63. DOI: 10.1002/latj.201090029
- [12] A.K. Kushwaha, M.H. Rahman, E. Slater, R. Patel, C. Evangelista, E. Austin, E. Tompkins, A. McCarroll, D.K. Rajak, P.L. Menezes, Powder bed fusion-based additive manufacturing: SLS, SLM, SHS, and DMLS, *Tribology of Additively Manufactured Materials*, (2022) 1–37. DOI: 10.1016/B978-0-12-821328-5.00001-9
- [13] N.G. Razumov, A.A. Popovich, A.V. Grigor'ev, A.O. Silin, I.S. Goncharov, Morphology of high-strength heat-resistant steel powder for machines for additive production from shavings, *Metal Science and Heat Treatment*, 60 (2019) 710–714. DOI: 10.1007/s11041-019-00344-y
- [14] Jianjun Xu, Xin Lin, Pengfei Guo, Hongbiao Dong, Xiaoli Wen, Qiuge Li, Lei Xue, Weidong Huang, The initiation and propagation mechanism of the overlapping zone cracking during laser solid forming of IN-738LC superalloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 749 (2018) 859–870. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.03.366
- [15] Cheng Ai, Qing Li, Jun Zhang, Haijun Su, Wenchao Yang, Lin Liu, Yi Ru, Heng Zhang, Yuanyuan Song, Yongnan Chen, Shusuo Li, Shengkai Gong, Effect of substituting Mo for W on  $\gamma/\gamma'$  partitioning behaviors of alloying elements in heat-treated second generation Ni based single crystal superalloys: An atom probe tomography study, *Intermetallics*, 134 (2021) 107198. DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107198
- [16] Fengyun Ding, Linsen Zhou, Liang Zhao, Xilong Dou, Kela Xiao, Jiangfeng Song, Jiguang Du, Gang Jiang, Theoretical study on the influence of Cr, Mo, and W alloying additions on the helium behavior in nickel, *Journal of Nuclear Materials*, 565 (2022) 153720. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2022.153720

### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Daniil V. VOEVODENKO** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
E-mail: voevodenko.daniil@mail.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3045-5923>

**Kirill A. STARIKOV** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*.  
E-mail: starikovkirillandreevich@yandex.ru  
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8466-3340>

**Anatoliy A. POPOVICH** – *Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.*

E-mail: [popovicha@mail.ru](mailto:popovicha@mail.ru)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5974-6654>

**Поступила: 20.10.2025; Одобрена: 19.11.2025; Принята: 04.12.2025.**

**Submitted: 20.10.2025; Approved: 19.11.2025; Accepted: 04.12.2025.**