

Научная статья

УДК 621.762

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32106>



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

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

 voevodenko.daniil@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СЛП НА ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕ В ЖАРОПРОЧНОМ НИКЕЛЕВОМ СПЛАВЕ

Аннотация. В работе исследовано влияние параметров селективного лазерного плавления (СЛП) на образование трещин в монокристаллическом никелевом жаропрочном сплаве с предварительным нагревом подложки до 1200 °С. Установлено, что увеличение линейной и объемной плотности энергии подавляет трещинообразование, снижая количество дефектов, а также показано, что трещины зарождаются преимущественно вдоль границ дендритов в зонах сегрегации легирующих элементов и выделения карбидов Та и Мо. Сделан вывод, что повышение энергетических параметров СЛП снижает скорость кристаллизации, обеспечивает более равномерное затвердевание и способствует значительному уменьшению количества трещин.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, селективное лазерное плавление, дефекты, трещины, 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. Влияние параметров селективного лазерного плавления на трещинообразование в жаропрочном никелевом сплаве // Глобальная энергия. 2026. Т. 32, № 1. С. 75–83. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32106>



D.V. Voevodenko , K.A. Starikov, A.A. Popovich

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

 voevodenko.daniil@mail.ru

EFFECT OF SELECTIVE LASER MELTING PARAMETERS ON CRACKING IN HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY

Abstract. The effect of the parameters of selective laser melting (SLM) on the formation of cracks in a monocrystalline nickel heat-resistant alloy with preheating of the substrate to 1200 °C. It was found that an increase in linear and volumetric energy density suppresses cracking, reducing the number of defects, and it is also shown that cracks originate mainly along the boundaries of dendrites in the zones of segregation of alloying elements and the release of carbides Ta and Mo. It is concluded that increasing the energy parameters of SLM reduces the rate of crystallization, ensures more uniform solidification and contributes to a significant reduction in the number of cracks.

Keywords: heat-resistant nickel alloy, selective laser melting, defects, cracks, 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., Effect of selective laser melting parameters on cracking in heat-resistant nickel alloy, *Global Energy*, 32 (01) (2026) 75–83, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.32106>

Введение. Интенсивное развитие аддитивных технологий напрямую связано с необходимостью поиска и внедрения новых материалов, пригодных для изготовления сложных деталей методом аддитивного производства (АП). За последние годы опубликовано значительное количество исследований, посвященных созданию, исследованию свойств и применению материалов для аддитивной промышленности [1–6].

Монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы были разработаны во второй половине XX в. и традиционно применяются для производства рабочих лопаток газотурбинных двигателей методом направленной кристаллизации [7, 8]. Однако из-за неравновесного характера кристаллизации изделия, полученные этим способом, отличаются выраженной химической и структурной неоднородностью. В частности, в дендритных осях и приграничных областях наблюдаются существенные различия в морфологии γ' -фазы: вблизи границ дендритов частицы γ' значительно крупнее по сравнению с их размером в центральных зонах. Проведение высокотемпературной гомогенизации позволяет снизить указанную неоднородность и обеспечить более равномерное распределение фаз в микроструктуре сплава.

Селективное лазерное плавление (СЛП) имеет определенное преимущество по сравнению с направленной кристаллизацией, так как способствует более равномерному распределению легирующих элементов в объеме изделия. Вместе с тем данный метод требует тщательной оптимизации технологических параметров и сопровождается рядом характерных проблем, среди которых одной из наиболее серьезных является склонность материала к образованию трещин в процессе печати [9–17].

Целью настоящего исследования являлось изучить, каким образом параметры СЛП в условиях повышенной температуры подогрева рабочей платформы воздействуют на процесс трещинообразования в монокристаллическом жаропрочном никелевом сплаве GTD-111, а также выявить механизмы их образования.

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 порошка никелевого сплава (мас. %)

Table 1

Chemical composition of nickel alloy powder (% 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

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 1200 °С. Прочие параметры процесса СЛП приведены в табл. 2.

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 ³)	60	100	150

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 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.



Рис. 1. Трещины вдоль поперечного сечения по направлению построения (BD) образца: а) 1; б) 2; в) 3
 Fig. 1. Cracks along the cross section in the direction of construction (BD) of the sample: а) 1; б) 2; в) 3

Результаты и обсуждение

Исследование целостности образцов методом оптической микроскопии показало, что при увеличении линейной плотности и объемной плотности энергии снижается количество трещин и разломов. На панорамных изображениях центральной части образцов (рис. 1) видно, что образцы демонстрируют улучшение целостности материала при более высоких значениях. В частности, на рис. 1в показано, что в образце 3, выращенном при линейной плотности энергии 0,5 и объемной 150 (табл. 2), практически отсутствуют крупные дефекты.

Таблица 3

Результаты графического анализа изображений, полученных с помощью оптического микроскопа
 Table 3

The results of graphical analysis of images obtained using an optical microscope

	Образец 1	Образец 2	Образец 3
Количество трещин, %	> 3,5	> 0,8	> 0,03

Микроструктурный анализ выявил, что образцы характеризуются гетерофазной структурой, включающей столбчатые ячейки γ -фазы, ориентированные вдоль направления построения (указано стрелкой на рис. 1), а также дисперсную γ' -фазу на основе интерметаллида Ni_3Al , локализованную вблизи дендритных границ. Дополнительно в междендритных зонах отмечены сегрегация легирующих элементов и образование карбидов (рис. 2 и 3). Карбидные выделения играют важную роль в обеспечении прочностных характеристик жаропрочных никелевых сплавов при температурах выше предела растворимости γ' -фазы. Их упрочняющее действие связано с подавлением рекристаллизации вдоль дендритных границ и улучшением термостойкости материала. Согласно данным EDX-анализа (рис. 3), данные выделения идентифицированы как карбиды Ta и Mo.

Данные сканирующей электронной микроскопии показали, что трещины преимущественно формируются вдоль границ дендритных зерен в областях повышенной концентрации карбидных выделений, несмотря на их важную роль в обеспечении жаропрочных свойств никелевых сплавов.

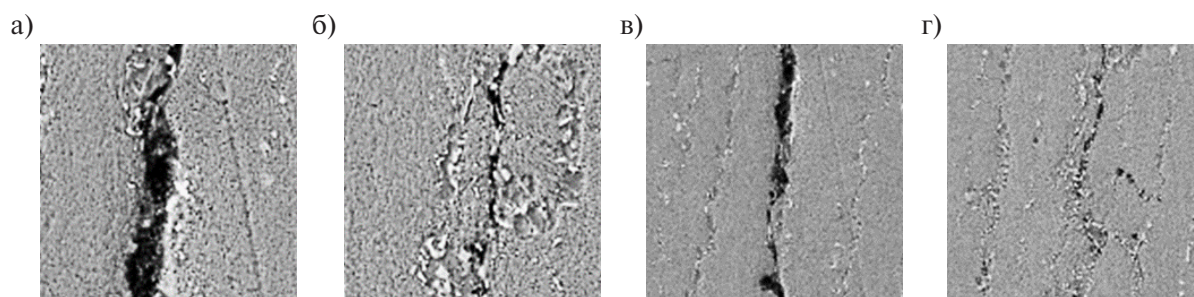


Рис. 2. Изображения сканирующей электронной микроскопии, показывающие растрескивание внутри дендритной микроструктуры: а и б – образец 1; в – образец 2; г – образец 3

Fig. 2. Scanning electron microscopy images showing cracking inside the dendritic microstructure: a and b – sample 1; c – sample 2; d – sample 3

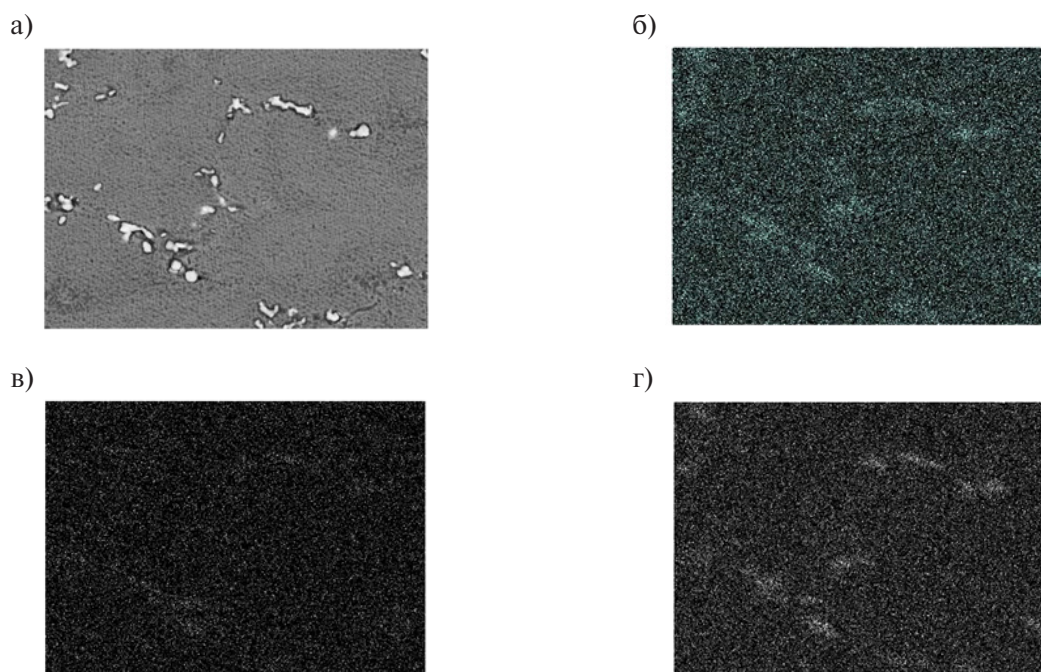


Рис. 3. Результаты EDX-анализа первого образца, полученного методом селективного лазерного плавления: а) общее изображение; б) тантал; в) углерод; г) молибден

Fig. 3. Results of EDX analysis of the first sample obtained by selective laser melting: a) general image; b) tantalum; c) carbon; d) molybdenum

Основной механизм развития трещинообразования связан с формированием усадочных микропор в междендритных пространствах монокристаллического сплава, а также на границах γ -фазы, эвтектики, частиц упрочняющей γ' -фазы и карбидов Ta и Mo. При высоких скоростях кристаллизации, характерных для режимов с низкой линейной плотностью энергии, зоны расплава ограничены, с одной стороны, фронтом растущих дендритов, а с другой, выделившимися в расплаве карбидами. В процессе затвердевания такие зоны испытывают тепловую усадку, что приводит к зарождению трещин. Последующее увеличение объема пор и их коагуляция под действием термических напряжений вызывают образование макротрещин.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует влияние параметров СЛП на уплотнение и образование трещин в монокристаллическом никелевом сплаве. Установлено, что целостность образцов напрямую зависит от линейной и объемной плотности энергии: при их увеличении количество дефектов существенно снижается.

Механизм трещинообразования связан с термической усадкой в процессе кристаллизации локальных зон расплава, ограниченных дендритами и карбидами Ta и Mo. В условиях высокой скорости кристаллизации, характерной для режимов с низкой линейной плотностью энергии, такие зоны быстро затвердевают, что приводит к образованию усадочных микропор.

Последующая их коагуляция под действием термических напряжений вызывает формирование трещин.

Увеличение линейной плотности энергии снижает скорость кристаллизации и обеспечивает более равномерное протекание процессов затвердевания по всему объему расплава. Это способствует компенсации усадки и уменьшает количество критических зон, что, в свою очередь, снижает склонность материала к образованию трещин.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

[1] **Eskandari H., Lashgari H.R., Zangeneh Sh., Kong C., Ye L., Eizadjou M., Wang H.** Microstructural characterization and mechanical properties of SLM-printed Ti–6Al–4V alloy: Effect of build orientation, *Journal of Materials Research*, 37 (2022) 2645–2660. DOI: 10.1557/s43578-021-00468-z

[2] **Zhenglei Yu, Zezhou Xu, Yunting Guo, Pengwei Sha, Ruiyao Liu, Renlong Xin, Lunxiang Li, Lixin Chen, Xiebin Wang, Zhihui Zhang, Luquan Ren.** Analysis of microstructure, mechanical properties, wear characteristics and corrosion behavior of SLM-NiTi under different process parameters, *Journal of Manufacturing Processes*, 75 (2022) 637–650. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.01.010

[3] **Farber E., Zhu J.-N., Popovich A., Popovich V.** A review of NiTi shape memory alloy as a smart material produced by additive manufacturing, *Materials Today: Proceedings*, 30 (3) (2020) 761–767. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.563

[4] **Hosseini E., Popovich V.A.** A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718, *Additive Manufacturing*, 30 (2019) 100877.

[5] **Praneeth J., Venkatesh S., Krishna L.S.** Process parameters influence on mechanical properties of AlSi10Mg by SLM, *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.12.222

[6] **Heo S., Lim Y., Kwak N., Jeon C., Choi M., Jo I.** Impact of heat treatment and building direction on tensile properties and fracture mechanism of Inconel 718 produced by SLM process, *Metals*, 14 (4) (2024) 440. DOI: 10.3390/met14040440

[7] **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

[8] **Tao S., Gao R., Peng H., Guo H., Chen B.** High-reliability repair of single-crystal Ni-base superalloy by selective electron beam melting, *Materials & Design*, 224 (2022) 111421. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.111421

[9] **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

[10] **Kou S.** A criterion for cracking during solidification, *Acta Materialia*, 88 (2015) 366–374. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.01.034

- [11] Chunlei Qiu, Haoxiu Chen, Qi Liu, Sheng Yue, Huaming Wang. On the solidification behaviour and cracking origin of a nickel-based superalloy during selective laser melting, *Materials Characterization*, 148 (2019) 330–344. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.12.032
- [12] Jingjing Yang, Fangzhi Li, Zemin Wang, Xiaoyan Zeng. Cracking behavior and control of Rene 104 superalloy produced by direct laser fabrication, *Journal of Materials Processing Technology*, 225 (2015) 229–239. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.06.002
- [13] Han Q., Mertens R., Montero-Sistiaga M.L., Yang S., Setchi R., Vanmeensel K., Van Hooreweder B., Evans S.L., Fan H. Laser powder bed fusion of Hastelloy X: Effects of hot isostatic pressing and the hot cracking mechanism, *Materials Science and Engineering: A*, 732 (2018) 228–239. DOI: 10.1016/j.msea.2018.07.008
- [14] Zhaoyang Liu, Huan Qi, Liang Jiang. Control of crystal orientation and continuous growth through inclination of coaxial nozzle in laser powder deposition of single-crystal superalloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 230 (2016) 177–186. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.11.017
- [15] Jones R., Rans C., Iliopoulos A.P., Michopoulos J.G., Phan N., Peng D. Modelling the variability and the anisotropic behaviour of crack growth in SLM Ti-6Al-4V, *Materials*, 14 (6) (2021) 1400. DOI: 10.3390/ma14061400
- [16] Haselbozchaloe D., Correia J.A.F.O., Braga D.F.O., Cipriano G., Reis L., Manuel L., Moreira P.M.G.P. Quantifying uncertainty in fatigue crack growth of SLM 316L through advanced predictive modeling, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures (FFEMS)*, 47 (9) (2024) 3116–3132. DOI: 10.1111/ffe.14361
- [17] He Y., Zhao K., Zhang Y., Prashanth K.G., Ye Z., Yu Z., Zhang F. Evaluation of fatigue crack growth rates and fracture toughness in a selective laser-melted Ti-5.6 Al-3.8 V alloy with optimized microstructure after heat treatment, *Materials Science and Engineering: A*, 924 (2025) 147822. DOI: 10.1016/j.msea.2025.147822

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

E-mail: voevodenko.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] H. Eskandari, H.R. Lashgari, Sh. Zangeneh, C. Kong, L. Ye, M. Eizadjou, H. Wang, Microstructural characterization and mechanical properties of SLM-printed Ti-6Al-4V alloy: Effect of build orientation, *Journal of Materials Research*, 37 (2022) 2645–2660. DOI: 10.1557/s43578-021-00468-z

- [2] **Zhenglei Yu, Zezhou Xu, Yunting Guo, Pengwei Sha, Ruiyao Liu, Renlong Xin, Lunxiang Li, Lixin Chen, Xiebin Wang, Zhihui Zhang, Luquan Ren**, Analysis of microstructure, mechanical properties, wear characteristics and corrosion behavior of SLM-NiTi under different process parameters, *Journal of Manufacturing Processes*, 75 (2022) 637–650. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.01.010
- [3] **E. Farber, J.-N. Zhu, A. Popovich, V. Popovich**, A review of NiTi shape memory alloy as a smart material produced by additive manufacturing, *Materials Today: Proceedings*, 30 (3) (2020) 761–767. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.563
- [4] **E. Hosseini, V.A. Popovich**, A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718, *Additive Manufacturing*, 30 (2019) 100877.
- [5] **J. Praneeth, S. Venkatesh, L.S. Krishna**, Process parameters influence on mechanical properties of AlSi10Mg by SLM, *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.12.222
- [6] **S. Heo, Y. Lim, N. Kwak, C. Jeon, M. Choi, I. Jo**, Impact of heat treatment and building direction on tensile properties and fracture mechanism of Inconel 718 produced by SLM process, *Metals*, 14 (4) (2024) 440. DOI: 10.3390/met14040440
- [7] **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
- [8] **S. Tao, R. Gao, H. Peng, H. Guo, B. Chen**, High-reliability repair of single-crystal Ni-base superalloy by selective electron beam melting, *Materials & Design*, 224 (2022) 111421. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.111421
- [9] **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
- [10] **S. Kou**, A criterion for cracking during solidification, *Acta Materialia*, 88 (2015) 366–374. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.01.034
- [11] **Chunlei Qiu, Haoxiu Chen, Qi Liu, Sheng Yue, Huaming Wang**, On the solidification behaviour and cracking origin of a nickel-based superalloy during selective laser melting, *Materials Characterization*, 148 (2019) 330–344. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.12.032
- [12] **Jingjing Yang, Fangzhi Li, Zemin Wang, Xiaoyan Zeng**, Cracking behavior and control of Rene 104 superalloy produced by direct laser fabrication, *Journal of Materials Processing Technology*, 225 (2015) 229–239. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.06.002
- [13] **Q. Han, R. Mertens, M.L. Montero-Sistiaga, S. Yang, R. Setchi, K. Vanmeensel, B. Van Hooreweder, S.L. Evans, H. Fan**, Laser powder bed fusion of Hastelloy X: Effects of hot isostatic pressing and the hot cracking mechanism, *Materials Science and Engineering: A*, 732 (2018) 228–239. DOI: 10.1016/j.msea.2018.07.008
- [14] **Zhaoyang Liu, Huan Qi, Liang Jiang**, Control of crystal orientation and continuous growth through inclination of coaxial nozzle in laser powder deposition of single-crystal superalloy, *Journal of Materials Processing Technology*, 230 (2016) 177–186. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.11.017
- [15] **R. Jones, C. Rans, A.P. Iliopoulos, J.G. Michopoulos, N. Phan, D. Peng**, Modelling the variability and the anisotropic behaviour of crack growth in SLM Ti-6Al-4V, *Materials*, 14 (6) (2021) 1400. DOI: 10.3390/ma14061400
- [16] **D. Haselibozechaloe, J.A.F.O. Correia, D.F.O. Braga, G. Cipriano, L. Reis, L. Manuel, P.M.G.P. Moreira**, Quantifying uncertainty in fatigue crack growth of SLM 316L through advanced predictive modeling, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures (FFEMS)*, 47 (9) (2024) 3116–3132. DOI: 10.1111/ffe.14361
- [17] **Y. He, K. Zhao, Y. Zhang, K.G. Prashanth, Z. Ye, Z. Yu, F. Zhang**, Evaluation of fatigue crack growth rates and fracture toughness in a selective laser-melted Ti-5.6 Al-3.8 V alloy with optimized microstructure after heat treatment, *Materials Science and Engineering: A*, 924 (2025) 147822. DOI: 10.1016/j.msea.2025.147822

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

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

Поступила: 28.10.2025; Одобрена: 05.12.2025; Принята: 05.12.2025.

Submitted: 28.10.2025; Approved: 05.12.2025; Accepted: 05.12.2025.