

Научная статья

УДК 621.762

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30307>



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

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

✉ voevodenko.daniil@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ДЕФЕКТОВ И МИКРОСТРУКТУРЫ В ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВАХ

Аннотация. В данной работе исследовано влияние различных параметров процесса селективного лазерного плавления (СЛП) на формирование дефектов и микроструктуры в жаропрочных никелевых сплавах. Экспериментальные образцы были изготовлены с использованием установки «ВПЛС Меркурий», оснащенной системой индуктивного высокотемпературного подогрева. Путем варьирования энергетических параметров СЛП были получены данные о зависимости линейной плотности энергии от количества и типов возникающих дефектов, таких как макротрещины и микродефекты. Результаты исследования показали, что увеличение линейной плотности энергии способствует значительному снижению дефектов в структуре образцов. На основании проведенного анализа также выявлены особенности формирования микроструктуры и причины возникновения дефектов при различных режимах СЛП. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации параметров процесса и улучшения качества изделий из жаропрочных никелевых сплавов, изготовленных методом аддитивного производства.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, дефекты, направленная структура, жаропрочный никелевый сплав, γ' -фаза.

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

Для цитирования:

Воеводенко Д.В., Стариков К.А., Попович А.А. Исследование влияния параметров селективного лазерного плавления на формирование дефектов и микроструктуры в жаропрочных никелевых сплавах // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 3. С. 83–91. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30307>



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

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

✉ voevodenko.daniil@mail.ru

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF SELECTIVE LASER MELTING PARAMETERS ON THE FORMATION OF DEFECTS AND MICROSTRUCTURE IN NICKEL-BASED SUPERALLOYS

Abstract. The paper investigates the effect of various parameters on the selective laser melting (SLM) process on the formation of defects and microstructure in nickel-based superalloys. Experimental specimens were fabricated using a High-Temperature Layer-by-Layer Laser Synthesis Plant “Mercury” equipped with an inductive high-temperature heating system. By varying the energy parameters of the SLM, data on the dependence of the linear energy density on the number and types of emerging defects, such as macro-cracks and micro-defects, were obtained. The results showed that an increase in linear energy density contributes to a significant reduction of defects in the structure of the samples. Based on the analysis, the features of microstructure formation and the causes of defects at different SLM modes were revealed. The obtained results can be used to optimize the process parameters and improve the quality of products made of nickel-based superalloys manufactured by the additive manufacturing method.

Keywords: selective laser melting, defects, directional structure, nickel-based superalloy, γ' -phase.

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:

D.V. Voevodenko, K.A. Starikov, A.A. Popovich, Research of the influence of selective laser melting parameters on the formation of defects and microstructure in nickel-based superalloys, *Global Energy*, 30 (03) (2024) 83–91, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30307>

Введение. В настоящее время аддитивные технологии приобретают все большее значение как инновационный способ создания сложных и функциональных компонентов. Одним из важнейших направлений развития аддитивных технологий, которому уделяется особое значение, является расширение спектра используемых материалов. По причине того, что аддитивное производство (АП) считается относительно молодым направлением, имеющим существенные технологические различия с классическими технологиями, критически значимо понимание важности разработки новых материалов, подходящих для АП и их возможностей. В связи с этим значительный интерес представляет исследование применения различных методов аддитивных технологий для изготовления деталей из жаропрочных никелевых суперсплавов (ЖНС) со структурами, имеющими строгую направленность [1].

Разработки в области металлургии ЖНС за последнее десятилетие показали значительное улучшение их эксплуатационных характеристик при введении в их химический состав различных элементов, в том числе редкоземельных металлов. Если с момента открытия направленных структур их традиционно получали методами литья, позволяющими формировать ее в осевом градиенте температуры нагревателя [2], то с появлением и развитием АП, все более широкое использование

ЖНС в нем позволяет контролировать направление градиента свойств в структуре. В настоящее время для производства деталей со сложной топологией из ЖНС используются такие методы АП, как селективное лазерное плавление (СЛП), электронно-лучевое плавление (ЭЛП) и лазерная наплавка [3, 4].

Стоит отметить, что ЖНС представляют собой класс материалов, который был специально разработан для обеспечения надежности и эффективности работы деталей и изделий в условиях экстремальных температур и механических нагрузок. Этот класс материалов играет ключевую роль в производстве компонентов газотурбинных двигателей, турбореактивных двигателей, аэрокосмических конструкций и других систем, где жаропрочные свойства материала существенно влияют на общую производительность энергетической установки [5].

В последние годы возрос интерес к исследованиям, посвященным возможности изготовления деталей с направленной структурой из ЖНС методом ЭЛП. Так, в работе [6] был продемонстрирован метод формирования монокристаллической структуры методом селективного электронно-лучевого плавления в никелевых сплавах CMSX-4 и Inconel 718. Эта разработка позволяет говорить о возможности изготовления лопаток турбинных двигателей с направленной и монокристаллической структурой с помощью АП. Актуальность производства лопаток турбинных двигателей с использованием аддитивных методов обусловлена уникальными возможностями АП локального контроля структуры и свойств изготавливаемой детали [6, 7]. Кроме того, эти методы позволяют снизить ограничения на топологию проектируемых и изготавливаемых деталей. Также использование аддитивных методов в производстве лопаток турбинных двигателей с направленной структурой демонстрирует высокую экономическую эффективность при мелкосерийном производстве и сопоставимую экономическую эффективность при крупносерийном производстве по сравнению с традиционной технологией направленного литья [8].

Однако несмотря на растущий интерес к АП, следует отметить, что не все материалы могут быть использованы для изготовления деталей. Использование материалов, разработанных для классических технологий нецелесообразно из-за больших технологических различий, а при попытке использования новых материалов часто возникают трудности, связанные с образованием различных дефектов. В частности, сложности в АП возникают при использовании ЖНС с повышенным содержанием γ' -фазы [9, 10]. В структурах образцов распространено появление трещин из-за образования значительных температурных градиентов при высокоэнергетической лазерной или электронно-лучевой обработке, а также из-за низких значений удлинения материала при разрыве [9–13]. Низкая склонность к сварке, а также сложный химический состав некоторых сплавов могут приводить к образованию дефектов, таких как различные трещины и повышенная пористость. В результате формируется специфическая структура с неравновесными характеристиками. Исследование способов предотвращения возникновения подобных дефектов является критически важным направлением развития АП, которое позволит расширить номенклатуру материалов и обеспечить требуемые свойства в изделиях. Так, например, в ряде работ изучались вопросы образования и уменьшения дефектов [9, 10, 12, 14–17]. В данных исследованиях было установлено, что одной из основных причин образования дефектов в виде трещин является сегрегация компонентов сплава и их осаждение по границам зерен, а также образование усадочных пустот [11, 16]. Для воздействия на получаемую структуру чаще всего пользуются самым эффективным для этого методом – регулированием и изменением различных энергетических параметров процессов послойного синтеза. Эти параметры влияют на распределение напряжений, возникающих при плавлении материала. Возможность перемещения электронного пучка со скоростью до 8000 м/с позволяет осуществлять высокотемпературный нагрев поверхностного слоя до 1000°C при селективном ЭЛП [9, 10, 12, 14, 16, 18], что уменьшает количество микродефектов и трещин. Однако в технологии СЛП достижение аналогичной скорости луча невозможно из-за технологических ограничений системы подвижных зеркал, отклоняющих лазерный луч. Например,

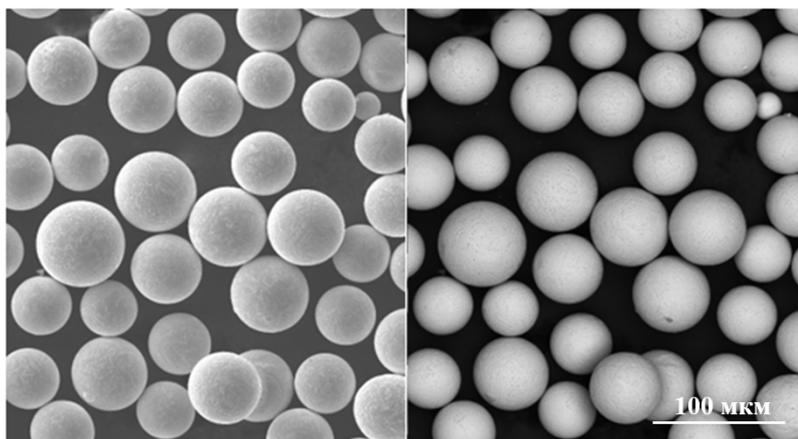


Рис. 1. Частицы порошка несвариваемого суперсплава на основе никеля
 Fig. 1. Powder particles of non-weldable nickel-based superalloy

в работе [16] проведено исследование возможности снижения количества трещин в сплаве при СЛП путем подбора оптимальных технологических параметров.

Подводя итоги, можно сделать вывод, что получение с помощью СЛП бездефектных деталей из ЖНС, имеющих структурную направленность, является актуальной задачей в области развития АП.

Оборудование

Исследуемые образцы были изготовлены методом СЛП на разработанной в Санкт-Петербургском Политехническом университете совместно с ЗАО «Биоград» (3DLam) установке высокотемпературного послойного лазерного синтеза «ВПЛС Меркурий». Данная установка имеет мультилазерную систему с 1 лазером 500 Вт и 2 по 1000 Вт, габариты рабочей зоны 210 мм по высоте и 120 мм в диаметре, а также подогрев до 1000°C.

При изготовлении экспериментальных образцов процесс проводился в инертной среде из аргона, а содержание кислорода поддерживалось ниже 20 ppm. Чтобы снизить вероятность возникновения температурного градиента при плавлении новых слоев, подложка предварительно была нагрета до 1000°C.

Методы исследования

По завершению процесса послойного синтеза образцы отделяли от подложки и проводили их полировку вдоль направления роста, после чего травили в растворе, содержащем соляную и серную кислоты, а также сульфат меди. Выявление и количественная оценка дефектов, а также изучение структуры проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) «Carl Zeiss Supra 55VP».

Материалы

По результатам проведенного предварительного исследования морфологии порошка с помощью СЭМ можно сделать вывод о том, что, так как частицы порошка сферичны и частиц неокруглой формы не обнаружено, порошок обладает улучшенной текучестью, что благоприятно повлияет на процесс СЛП.

Для исследования влияния параметров СЛП на структуру были изготовлены компактные образцы в виде прямоугольного параллелепипеда со сторонами 8x8 мм и высотой 40 мм. Поскольку ЖНС трудно спекаются из-за образования на поверхности частиц стабильного слоя оксида

Al_2O_3 , работа с данным сплавом при предварительном нагреве имеет решающее значение [11]. Для достижения содержания кислорода в камере менее 20 ppm было установлено непрерывное заполнение рабочей зоны высокочистым газом аргоном.

Энергетические параметры процесса СЛП играют ключевую роль в определении характеристик ванны расплава, включая ее размеры и глубину. Эти параметры также напрямую влияют на температурный градиент в зоне плавления и скорость кристаллизации материала, что, в свою очередь, определяет тип кристаллизационного фронта, формирующегося в процессе остывания и затвердевания материала. Линейная плотность энергии (E_L , Дж/мм) главным образом определяет глубину ванны расплава. Чем выше значения линейной плотности энергии, тем больше глубина проплавления материала при воздействии на него лазерного луча, от которой, в свою очередь, зависят значения температурного градиента и скорости кристаллизации.

Для понимания взаимосвязи между энергетическими параметрами процесса и количеством дефектов были изготовлены образцы по 3 группам параметров с различной линейной плотностью энергии.

Таблица 1

Наборы параметров процесса СЛП при изготовлении компактных образцов

Table 1

Sets of SLM process parameters in the fabrication of compact samples

Группа	P , Вт	S , мм/с	E_L , Дж/мм
1	120–200	2000–3000	0,06
2	120–250	500–1000	0,24
3	120–970	120–900	1,00

Результаты и обсуждение

С помощью оптического микроскопа был проведен анализ полученных компактных образцов, который показал, что в первоначально выбранном диапазоне параметров (группа 2) процесса СЛП с линейной плотностью энергии (E_L) 0,24 Дж/мм (табл. 1) образовались макротрещины, преимущественно в центральной и периферийной областях образцов (рис. 2б). При этом образцы группы 1, которые были получены с минимальной линейной плотностью энергии, имели признаки критического разрушения, составляющие более 20% площади поверхности вырезанных образцов (рис. 2а). Напротив, при использовании высокого значения линейной плотности энергии группы 3 (1 Дж/мм) в образце практически не образуется дефектов в виде трещин (рис. 2в). Полученные изображения выявили отчетливые особенности на поверхности макротрещин. К ним относятся зоны горячего внутрикристаллического разрушения, характеризующиеся наличием дендритных узоров. Кроме того, имеются области холодного внутрикристаллического разрушения, характеризующиеся наличием фасетчатых поверхностей разрушения, которые придают общей структуре отчетливый вид «речного узора» (рис. 2г).

Анализ снимков СЭМ показал, что микроструктура образцов характеризуется высокоорганизованной структурой, состоящей из вытянутых столбчатых ячеек, расположенных вдоль направления роста γ -твердого раствора. Эти столбчатые ячейки, называемые γ/γ' ячейками, представляют собой первичные дендритные рукава. Внутри каждой ячейки преобладает матрица γ -фазы, а по всей матрице рассеяны кубовидные частицы, состоящие из γ' -фазы. Эти кубовидные частицы образованы на основе интерметаллического соединения Ni_3Al (рис. 3).

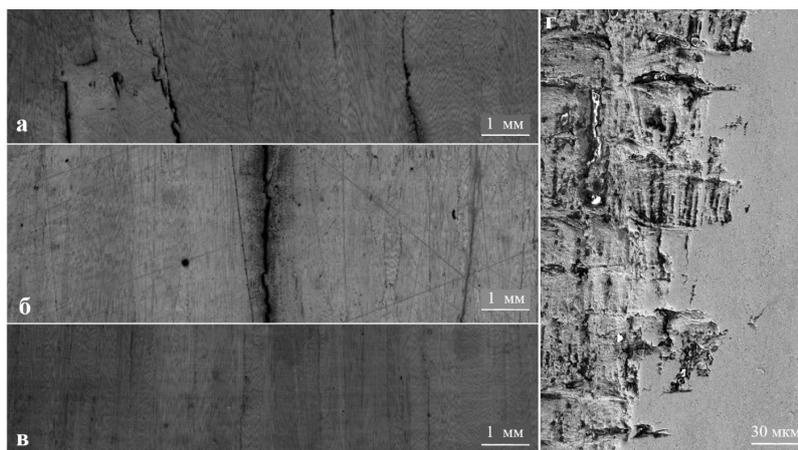


Рис. 2. Трещины вдоль поперечного направления строительства образца, построенного при:
а) группа 1, б) группа 2, в) группа 3; г) поверхность трещин

Fig. 2. Cracks along the transverse construction direction of the specimen constructed at:
a) group 1, b) group 2, c) group 3; d) crack surface

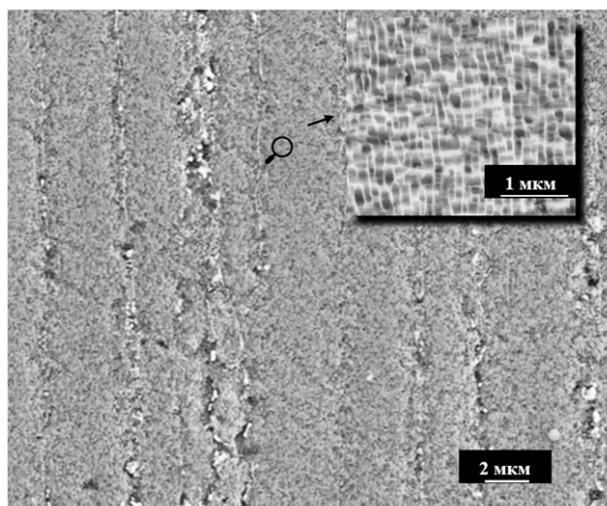


Рис. 3. Микроструктура образцов, полученных на установке «ВПЛС Меркурий»

Fig. 3. Microstructure of samples obtained at the High-Temperature Layer-by-Layer Laser Synthesis Plant "Mercury"

Заключение

Благодаря анализу образцов на основании полученных данных можно сделать вывод, что количество макро- и микродефектов находится в прямой зависимости от линейной плотности энергии (E_L). С увеличением этого параметра количество и вероятность возникновения дефектов значительно уменьшается. Эти данные позволят быстрее находить оптимальные параметры процесса селективного плавления для ЖНС. Помимо прочего, были обнаружены зоны горячего внутрикристаллического разрушения с дендритными узорами и холодного внутрикристаллического разрушения с «речными узорами». Помимо этого, структура является высокоорганизованной, состоящей из вытянутых столбчатых ячеек, и имеет кубовидные частицы. Такая сложная морфология поверхности позволяет получить ценные сведения о механизмах и условиях образования и распространения трещин в образцах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] **Воеводенко Д.В., Стариков К.А., Попович А.А.** Исследование микроструктуры компактных образцов из экономно-легированного жаропрочного никелевого сплава, полученных методом направленной кристаллизации в процессе селективного лазерного плавления // Глобальная энергия. 2023. Т. 29, № 4. С. 72–82. DOI: 10.18721/JEST.29404
- [2] **Borisov E., Starikov K., Popovich A., Popovich V.** Cracks formation in nickel-based single crystal alloy manufactured by selective laser melting. Proceedings of the 29th International Conference on Metallurgy and Materials (METAL 2020), (2020) 875–879. DOI: 10.37904/metal.2020.3625
- [3] **Borisov E.V., Popovich V.A., Popovich A.A., Sufiiarov V.Sh., Jia-Ning Zhu, Starikov K.A.** Selective laser melting of Inconel 718 under high laser power. Materials Today: Proceedings, 30 (3) (2020) 784–788. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.571
- [4] **Zhang G., Zhu R., Xie G., Li S., Sundén B.** Optimization of cooling structures in gas turbines: A review. Chinese Journal of Aeronautics, 35 (6) (2022) 18–46. DOI: 10.1016/j.cja.2021.08.029
- [5] **Yadav M., Misra A., Malhotra A., Kumar N.** Design and analysis of a high-pressure turbine blade in a jet engine using advanced materials. Materials Today: Proceedings, 25 (4) (2020) 639–645. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.530
- [6] **Gotterbarm M.R., Rausch A.M., Körner C.** Fabrication of Single Crystals through a μ -Helix Grain Selection Process during Electron Beam Metal Additive Manufacturing. Metals, 10 (3) (2020) 313. DOI: 10.3390/met10030313
- [7] **Afkhami S., Dabiri M., Alavi S.H., Björk T., Salminen A.** Fatigue characteristics of steels manufactured by selective laser melting. International Journal of Fatigue, 122 (2019) 72–83. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.12.029
- [8] **Chowdhury T.S., Mohsin F.T., Tonni M.M., Mita M.N.H., Ehsan M.M.** A critical review on gas turbine cooling performance and failure analysis of turbine blades. International Journal of Thermofluids, 18 (2023) 100329. DOI: 10.1016/j.ijft.2023.100329
- [9] **Haghdadi N., Whitelock E., Lim B. et al.** Multimodal γ' precipitation in Inconel-738 Ni-based superalloy during electron-beam powder bed fusion additive manufacturing. Journal of Materials Science, 55 (27) (2020) 13342–13350. DOI: 10.1007/s10853-020-04915-w
- [10] **Kirka M.M. et al.** Mechanical Performance of a Non-weldable Ni-Base Superalloy: Inconel 738 Fabricated by Electron Beam Melting. Superalloys 2020, (2020) 1075–1084. DOI: 10.1007/978-3-030-51834-9_105
- [11] **Ramsperger M., Singer R.F., Körner C.** Microstructure of the Nickel-Base Superalloy CMSX-4 Fabricated by Selective Electron Beam Melting. Metallurgical and Materials Transactions A, 47 (3) (2016) 1469–1480. DOI: 10.1007/s11661-015-3300-y
- [12] **Lopez-Galilea I., Rutttert B., He J., Hammerschmidt T., Drautz R., Gault B., Theisen W.** Additive manufacturing of CMSX-4 Ni-base superalloy by selective laser melting: Influence of processing parameters and heat treatment. Additive Manufacturing, 30 (2019) 100874. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100874
- [13] **Liu Z., Qi H., Jiang L.** 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
- [14] **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
- [15] **Chauvet E., Kontis P., Jäggle E.A., Gault B., Raabe D., Tassin C., Blandin J.-J., Dendievel R., Vayre B., Abed S., Martin G.** Hot cracking mechanism affecting a non-weldable Ni-based superalloy produced by selective electron Beam Melting. Acta Materialia, 142 (2018) 82–94. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.09.047
- [16] **Qiu C., Chen H., Liu Q., Yue S., Wang H.** 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

[17] Jones A., Leary M., Bateman S., Easton M. Effect of surface geometry on laser powder bed fusion defects. *Journal of Materials Processing Technology*, 296 (2021) 117179. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117179

[18] Carter L.N., Martin C., Withers P.J., Attallah M.M. The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 615 (2014) 338–347. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.06.172

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

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

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.

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] D.V. Voevodenko, K.A. Starikov, A.A. Popovich, Research of the microstructure of compact samples from economical heat-resistant nickel alloy obtained by directed crystallization in the process of selective laser melting. *Global Energy*, 29 (04) (2023) 72–82. DOI: 10.18721/JEST.29404

[2] E. Borisov, K. Starikov, A. Popovich, V. Popovich, Cracks formation in nickel-based single crystal alloy manufactured by selective laser melting. *Proceedings of the 29th International Conference on Metallurgy and Materials (METAL 2020)*, (2020) 875–879. DOI: 10.37904/metal.2020.3625

[3] E.V. Borisov, V.A. Popovich, A.A. Popovich, V.Sh. Sufiarov, Jia-Ning Zhu, K.A. Starikov, Selective laser melting of Inconel 718 under high laser power. *Materials Today: Proceedings*, 30 (3) (2020) 784–788. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.01.571

[4] G. Zhang, R. Zhu, G. Xie, S. Li, B. Sundén, Optimization of cooling structures in gas turbines: A review. *Chinese Journal of Aeronautics*, 35(6) (2022) 18–46. DOI: 10.1016/j.cja.2021.08.029

[5] M. Yadav, A. Misra, A. Malhotra, N. Kumar, Design and analysis of a high-pressure turbine blade in a jet engine using advanced materials. *Materials Today: Proceedings*, 25 (4) (2020) 639–645. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.530

[6] M.R. Gotterbarm, A.M. Rausch, C. Körner, Fabrication of Single Crystals through a μ -Helix Grain Selection Process during Electron Beam Metal Additive Manufacturing. *Metals*, 10 (3) (2020) 313. DOI: 10.3390/met10030313

[7] S. Afkhami, M. Dabiri, S.H. Alavi, T. Björk, A. Salminen, Fatigue characteristics of steels manufactured by selective laser melting. *International Journal of Fatigue*, 122 (2019) 72–83. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.12.029

[8] T.S. Chowdhury, F.T. Mohsin, M.M. Tonni, M.N.H. Mita, M.M. Ehsan, A critical review on gas turbine cooling performance and failure analysis of turbine blades. *International Journal of Thermofluids*, 18 (2023) 100329. DOI: 10.1016/j.ijft.2023.100329

- [9] N. Haghdad, E. Whitelock, B. Lim et al., Multimodal γ' precipitation in Inconel-738 Ni-based superalloy during electron-beam powder bed fusion additive manufacturing. *Journal of Materials Science*, 55 (27) (2020) 13342–13350. DOI: 10.1007/s10853-020-04915-w
- [10] Kirka M.M. et al., Mechanical Performance of a Non-weldable Ni-Base Superalloy: Inconel 738 Fabricated by Electron Beam Melting. *Superalloys 2020*, (2020) 1075–1084. DOI: 10.1007/978-3-030-51834-9_105
- [11] M. Ramsperger, R.F. Singer, C. Körner, Microstructure of the Nickel-Base Superalloy CMSX-4 Fabricated by Selective Electron Beam Melting. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(3) (2016) 1469–1480. DOI: 10.1007/s11661-015-3300-y
- [12] I. Lopez-Galilea, B. Rutttert, J. He, T. Hammerschmidt, R. Drautz, B. Gault, W. Theisen, Additive manufacturing of CMSX-4 Ni-base superalloy by selective laser melting: Influence of processing parameters and heat treatment. *Additive Manufacturing*, 30 (2019) 100874. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100874
- [13] Z. Liu, H. Qi, L. 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
- [14] 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
- [15] E. Chauvet, P. Kontis, E.A. Jägle, B. Gault, D. Raabe, C. Tassin, J.-J. Blandin, R. Dendievel, B. Vayre, S. Abed, G. Martin, Hot cracking mechanism affecting a non-weldable Ni-based superalloy produced by selective electron Beam Melting. *Acta Materialia*, 142 (2018) 82–94. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.09.047
- [16] C. Qiu, H. Chen, Q. Liu, S. Yue, H. 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
- [17] A. Jones, M. Leary, S. Bateman, M. Easton, Effect of surface geometry on laser powder bed fusion defects. *Journal of Materials Processing Technology*, 296 (2021) 117179. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117179
- [18] L.N. Carter, C. Martin, P.J. Withers, M.M. Attallah, The influence of the laser scan strategy on grain structure and cracking behaviour in SLM powder-bed fabricated nickel superalloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 615 (2014) 338–347. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.06.172

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: 05.09.2024; Одобрена: 25.09.2024; Принята: 26.09.2024.

Submitted: 05.09.2024; Approved: 25.09.2024; Accepted: 26.09.2024.