

Научная статья

УДК 621.762

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30405>



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

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

✉ voevodenko.daniil@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ОТЕЧЕСТВЕННОГО АНАЛОГА ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА GTD111 ПОСЛЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Аннотация. В статье представлены результаты исследования микроструктуры и химического состава отечественного аналога жаропрочного никелевого сплава GTD111, полученного методом селективного лазерного плавления (СЛП). Проведено детальное изучение морфологии порошка, использованного в процессе, а также анализ структуры и фазового состава полученных образцов. Особое внимание уделено влиянию легирующих элементов, таких как тантал, на формирование топологически плотно упакованных фаз и их распределение в сплаве. Результаты работы демонстрируют соответствие химического состава конечного материала исходным спецификациям, а также подчеркивают значимость корректировки химического состава для оптимизации свойств сплава. Полученные данные позволяют сделать выводы о перспективах применения безрениевых никелевых сплавов в высокотемпературных условиях, а также о потенциале использования технологии СЛП для создания топологически сложных и термостойчивых конструкционных материалов.

Ключевые слова: селективное лазерное плавление, химический состав, направленная структура, жаропрочный никелевый сплав, GTD111, 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 микроструктуры и изменения химического состава отечественного аналога жаропрочного никелевого сплава GTD111 после селективного лазерного плавления // Глобальная энергия. 2024. Т. 30, № 4. С. 65–73. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30405>



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 MICROSTRUCTURE AND CHANGES IN CHEMICAL COMPOSITION OF DOMESTIC ANALOGUE OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY GTD111 AFTER SELECTIVE LASER MELTING

Abstract. The paper presents the results of the study of microstructure and chemical composition of the domestic analogue of heat-resistant nickel alloy GTD111 obtained by selective laser melting (SLM). A detailed study of the morphology of the powder used in the process, as well as an analysis of the structure and phase composition of the obtained samples were carried out. Special attention is paid to the influence of alloying elements, such as tantalum, on the formation of topologically close-packed phases and their distribution in the alloy. The results of the work demonstrate the compliance of the chemical composition of the final material with the initial specifications, and also emphasize the importance of adjusting the chemical composition to optimize the properties of the alloy. The obtained data allow us to draw conclusions about the prospects of application of rhenium-free nickel alloys in high-temperature conditions, as well as the potential of using SLM technology to create topologically complex and thermostable structural materials.

Keywords: selective laser melting, chemical composition, directional structure, nickel-based superalloy, GTD111, 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:

Voevodenko D.V., Starikov K.A., Popovich A.A., Research of microstructure and changes in chemical composition of domestic analogue of heat-resistant nickel alloy GTD111 after selective laser melting, *Global Energy*, 30 (04) (2024) 65–73, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.30405>

Введение. Существует множество различных классов материалов, которые предназначены для конкретных задач. К ним относятся жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС), которые были разработаны для обеспечения надежности и эффективности работы деталей и изделий в условиях экстремальных температур и механических нагрузок.

Основным элементом, усиливающим прочность этих материалов, является γ' -фаза, которая представляет собой интерметаллидное соединение $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$. Эта фаза формирует когерентные выделения в матрице γ , которая является твердым раствором на основе никеля, существенно увеличивая жаропрочность сплава. Nimonic 80A, один из первых сплавов в данной серии, нашел широкое применение в авиации для производства турбинных лопаток. В составе сплава содержалось около 25% γ' -фазы, что позволяло ему выдерживать температуры до 750°C [1].

В первые годы создания суперсплавов основное внимание уделялось γ -матрице и γ' -фазам, которые стали фундаментом для последующих исследований в области упрочнения. Эти фазы были признаны ключевыми для улучшения свойств суперсплавов, особенно при их эксплуатации в условиях высоких температур. В последующие годы развитие химического состава никелевых суперсплавов сосредоточилось на увеличении содержания γ' -фазы и стабилизации γ -матрицы.

Легирующие элементы в ЖНС делят на следующие категории [2]:

1. Элементы, способствующие стабилизации γ -фазы:

о Так как Ni, Cr, Mo, Ru, Re, Co, W и Fe по большей части распределяются в аустенитной γ -фазе, эти элементы считаются стабилизирующими. Это происходит из-за того, что они обладают атомными радиусами, близкими к радиусу никеля, что обеспечивает высокую растворимость и способствует укреплению матрицы.

2. Элементы, способствующие образованию γ' -фазы:

о Ti, Al, Ta и Nb характеризуются большими атомными радиусами, что способствует образованию упорядоченных фаз, таких как $Ni_3(Ti, Al, Ta)$, известных как γ' . Данные элементы упрочняют материал благодаря тому, что образуют твердые растворы и выделения, что улучшает как механические, так и термические свойства.

3. Элементы, склонные к сегрегации на границах зерен:

о Zr, C и B имеют значительно отличающиеся от никеля атомные размеры, что становится причиной их сегрегации на границах зерен γ -фазы.

о Эти элементы способствуют образованию карбидов и боридов, которые укрепляют межзеренные границы.

С 1990-х годов новые исследования были сосредоточены на добавлении нового элемента в состав суперсплавов – рения. Это способствовало разработке сплавов нового поколения, которые обладают еще более высокими показателями жаропрочности [3]. Re увеличивает параметр решетки γ -твердого раствора, что непосредственно влияет на величину мисфита и, следовательно, повышает энергию границ раздела фаз в суперсплавах. Температуры полного растворения γ' -фазы ($T_{п.р.}$) и солидуса (T_s) являются критическими для обеспечения термической стабильности и жаропрочности никелевых сплавов, поэтому их повышение способствует улучшению характеристик данных сплавов [4]. Эти сплавы традиционно относят ко II и III поколениям [5].

Тем не менее по причине того, что упрочняющие возможности Re ограничены и при длительном воздействии температур выше 1000°C его действие начинает ослабевать, в начале 2000-х годов для повышения устойчивости сплавов к высокотемпературным нагрузкам начали использовать рутений. Ru способствует стабилизации в сплавах с Re и уменьшает их склонность к образованию топологически плотно упакованных фаз [6].

Следует отметить, что увеличение эффективности сплавов с каждым новым поколением незначительно. В среднем их работоспособность повышается на 20–25°C. Таким образом, соотношение стоимости и свойств показывает отрицательную тенденцию: незначительное улучшение характеристик сопровождается значительным увеличением стоимости из-за того, что, например, стоимость Re и Ru составляет в среднем около 60% от всей стоимости [7]. По этой причине на данном этапе развития ЖНС у промышленности растет интерес к безрениевым сплавам [8].

В поисках способов оптимизации производства лопаток из ЖНС в настоящее время все больше проявляется интерес к другому способу их изготовления – селективному лазерному плавлению (СЛП). Этапы совершенствования конструкции рабочих лопаток, для изготовления которых используются преимущественно ЖНС, напрямую связаны с этапами развития технологий их производства и применяемых материалов. Появление новых методов и схем охлаждения рабочих лопаток становится возможным благодаря применению новых производственных методов. Так как конфигурации современных систем охлаждения рабочих лопаток ограничены возможностями традиционных методов производства, технология СЛП обладает одним из наиболее явных преимуществ – способностью производить не столько геометрически, сколько именно топологически сложные тела [9]. Таким образом, технология СЛП позволяет инженерам переосмыслить и оптимизировать формы изделий с целью повышения их производительности и функциональности, а возможность быстрой итерации дизайна позволяет сократить время разработки. За счет развития СЛП можно добиться снижения процента брака, а также изготавливать топологически

сложные детали, в которых будут использованы новые и более эффективные конфигурации систем охлаждения, которые не могут быть получены при использовании классических методов изготовления [10].

Оборудование

Исследуемые образцы были получены 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 одним лазером 500 Вт и двумя 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 проводились с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Carl Zeiss Supra 55VP.

Материалы

Для изготовления исследуемых образцов использовался порошок ЖНС. Отечественный аналог GTD111, не содержащий Re с упрочняющей фазой γ' с размером частиц 10–58 мкм был изготовлен в ООО «ГРАНКОМ» с учетом оптимального для данной технологии гранулометрического состава. Химический состав сплава указан в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемого сплава

Table 1

Chemical composition of the investigated alloy

Ni	Al	Ti	Cr	Co	Mo	Ta	W
Осн.	3,20	5,59	14,53	9,52	1,87	3,09	2,89

По результатам проведенного предварительного исследования морфологии порошка с помощью СЭМ (рис. 1) можно сделать вывод о том, что, так как частицы порошка сферичны либо округлой формы, порошок обладает улучшенной текучестью, что благоприятно повлияет на процесс СЛП. Также, хотя на изображениях виднеются небольшие «наросшие» частицы, называемые сателлитами, их количество практически не влияет на свойства порошка.

Результаты и обсуждение

С помощью исследования поверхности шлифов методом сканирующей электронной микроскопии в компактных образцах была обнаружена гетерофазная структура со столбчатыми ячейками γ -твердого раствора, которые имеют ориентацию и вытянуты вдоль направления синтеза (рис. 2). Также были выявлены квазикубоидные дисперсные выделения γ' -фазы. Анализ ориентации кристаллитов показывает, что направление их роста сохраняется в последующих слоях.

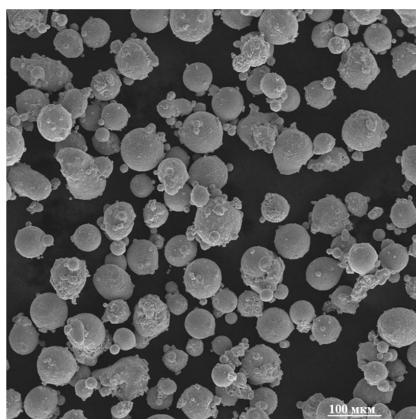


Рис. 1. СЭМ-изображения частиц исследуемого порошка

Fig. 1. SEM images of particles of the investigated powder

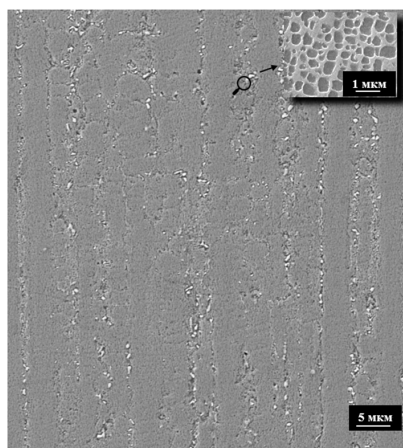


Рис. 2. Структура образца, полученного на установке «ВПЛС Меркурий»

Fig. 2. Structure of sample obtained at the High-Temperature Layer-by-Layer Laser Synthesis Plant “Mercury”

Это, вероятно, связано с тем, что внезапные отклонения от основной ориентации быстро подавляются, за счет чего поддерживается преимущественная направленность.

По результатам рентгенодифракционного фазового анализа, проведенного в поперечных и продольных сечениях компактного образца (рис. 3), также было обнаружено, что структура в исследуемом образце обладает направленностью, а кристаллиты имеют индекс Миллера (100).

Результаты анализа химического состава образцов после СЛП (табл. 2) показывают, что полученные значения в основном соответствуют исходному составу порошка. Концентрации ключевых элементов, таких как Ni, Cr, Co, Al и Ti, близки к эталонным значениям, что указывает на хорошее распределение элементов в процессе СЛП и соответствие химического состава начальным спецификациям. Концентрации Mo и W также близки к исходным значениям. Проведенный анализ подтверждает, что с минимальными отклонениями от эталонных значений химический состав полученных образцов после СЛП соответствует исходным значениям, однако наблюдаются некоторые расхождения в концентрациях Ta. Значения этого элемента, хотя и приближаются к эталонным, все же имеют самые большие отклонения. Это может свидетельствовать о том, что Ta локализуется внутри областей топологически плотно упакованных фаз.

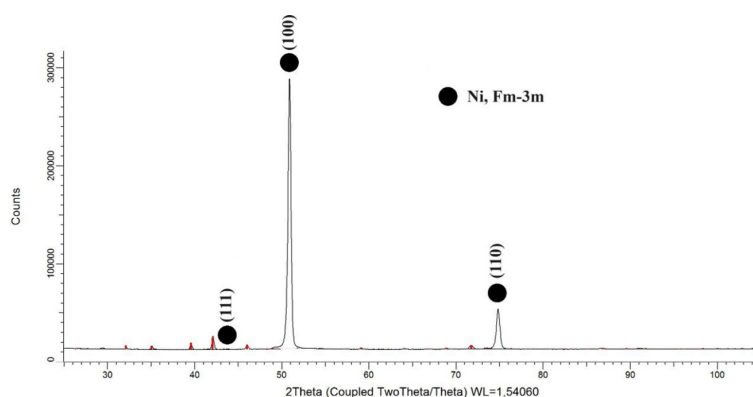


Рис. 3. Результаты дифракционного анализа полученного компактного образца
 Fig. 3. Results of diffraction analysis of the obtained compact sample

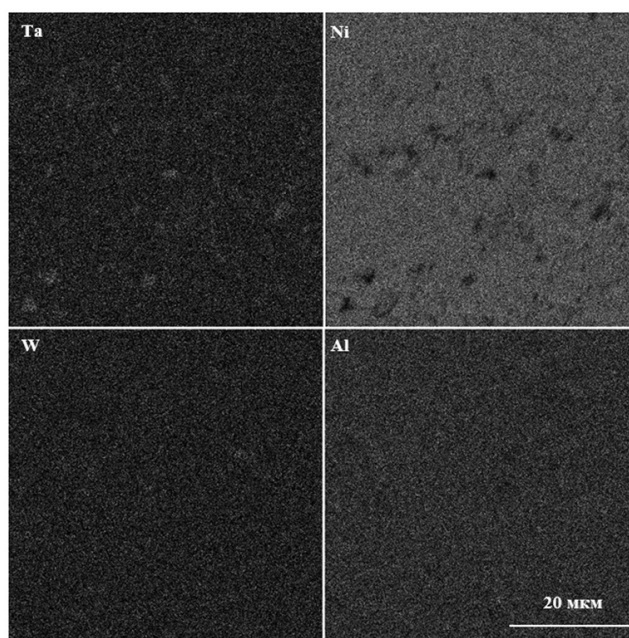


Рис. 4. Карты распределения элементов
 Fig. 4. Maps of elemental composition

Таблица 2

Химический состав образцов

Table 2

Chemical composition of the samples

Ni	Al	Ti	Cr	Co	Mo	Ta	W
Осн.	3,16	5,63	14,27	9,33	1,86	3,62	2,84

Для более подробного изучения несоответствия содержания Ta в исходном и полученном порошке с помощью ЭДС-анализа было проведено исследование методом распределения элементов посредством элементного картирования (рис. 4). При изучении распределения элементов

было выявлено, что элементы W и Al более равномерно распределяются по объему. Также отчетливо видно обеднение Ni в тех зонах, в которых Ta локализуется внутри областей топологически плотно упакованных фаз. Данная тенденция встречается и в других работах [10–15].

Заключение

В данной работе были изготовлены компактные образцы из порошка отечественного аналога GTD111 методом СЛП на разработанной и произведенной Санкт-Петербургским политехническим университетом совместно с ЗАО «Биоград» (3DLam) установке высокотемпературного послойного лазерного синтеза «ВПЛС Меркурий», позволяющей изготавливать детали газовых турбин из жаропрочных сплавов аддитивным способом. В компактных образцах была получена направленная структура со столбчатыми ячейками γ -твердого раствора, внутри которых присутствует γ' -фаза, характеризующаяся дисперсными выделениями γ' -фазы квазикубоидной формы. Помимо прочего, проведенный сравнительный анализ химического состава полученных в ходе работы образцов и исходного порошка показал повышенную локализацию Ta в топологически плотно упакованные фазы и обеднение в этих зонах Ni. Результаты исследования подчеркивают значимость работы по поиску оптимального химического состава порошка для ЖНС, используемых в СЛП.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Sims C.T. A history of superalloy metallurgy for superalloy metallurgists. *Superalloys* (1984) 399–419. DOI: 10.7449/1984/Superalloys_1984_399_419
- [2] Фоулей Р.У., Дэкер Р.Ф., Симс Ч.Т. Жаропрочные сплавы. М.: Металлургия. 1976. 567 с.
- [3] Бронфин М.Б., Другова И.А. О влиянии легирования на процессы сублимации и диффузии в γ' -фазе никелевых сплавов // Конструкционные и жаропрочные материалы для новой техники. М.: Наука. 1978. С. 138–146.
- [4] 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
- [5] Erickson G.L. The Development and Application of CMSX®-10. *Superalloys* (1996) 35–44.
- [6] Song W., Wang X.G., Li J.G., Ye L.H., Hou G.C., Yang Y.H., Liu J.L., Liu J.D., Pei W.L., Zhou Y.Z., Sun X.F. Effect of ruthenium on microstructure and high-temperature creep properties of fourth generation Ni-based single-crystal superalloys. *Materials Science and Engineering: A*, 772 (2020) 138646. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138646
- [7] Logunov A.V., Shmotin Y.N., Zavodov S.A., et al. Development of SLZhS32 BR economically doped heat-resistant alloy with single-crystal structure. *Inorganic Materials: Applied Research*, 7(4) (2016) 531–535. DOI: 10.1134/S2075113316040183
- [8] Wahl J.B., Harris K. New single crystal superalloys, CMSX®-7 and CMSX®-8. *Superalloys 2012* (2012) DOI: 10.1002/9781118516430.ch20.
- [9] 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
- [10] Коваль А.Д., Андриенко А.Г., Гайдук С.В., Кононов В.В. Влияние тантала на структуру и прочностные характеристики литейного жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава ЖСЗЛС // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2011. № 2. С. 42–46.
- [11] Cheng Y., Zhao X., Xia W., Pan Q., Yue Q., Gu Y., Zhang Z. Effects of Mo addition on microstructure of a 4th generation Ni-based single crystal superalloy. *Progress in Natural Science: Materials International*, 32(6) (2022) 745–751. DOI: 10.1016/j.pnsc.2022.10.001

- [12] Cheng Y., Zhao X., Xia W., Yue Q., Gu Y., Wei X., Bei H., Dang Y., Zhang Z. Effect of Mo on microstructural stability of a 4th generation Ni-based single crystal superalloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 21 (2022) 2672–2681. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.10.072
- [13] Ai C., Li Q., Zhang J., Su H., Yang W., Liu L., Ru Y., Zhang H., Song Y., Chen Y., Li S., Gong S. Effect of substituting Mo for W on γ/γ' 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
- [14] Ding F., Zhou L., Zhao L., Dou X., Xiao K., Song J., Du J., Jiang G. 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
- [15] Gao S., Song Z.-F., He B., Zhou L.-Zh., Hou J.-S. Effect of Ta addition on solidification microstructure and element segregation of IN617B nickel-base superalloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 32(2) (2022) 559–568. DOI: 10.1016/S1003-6326(22)65815-1

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] C.T. Sims, A history of superalloy metallurgy for superalloy metallurgists. *Superalloys* (1984) 399–419. DOI: 10.7449/1984/Superalloys_1984_399_419
- [2] C.T. Sims, W.C. Hagel, *The Superalloys*. NJ: John Wiley & Sons, Inc. 1972. 614 p.
- [3] M.B. Bronfin, I.A. Drugova, O vliianii legirovaniia na protsessy sublimatsii i diffuzii v γ' -faze nikel'nykh splavov [On the influence of alloying on the processes of sublimation and diffusion in the γ' -phase of nickel alloys] // *Konstruktsionnye i zharoprochnye materialy dlia novoi tekhniki* [Structural and heat-resistant materials for new technology]. Moscow: Nauka. 1978. P. 138–146.
- [4] 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
- [5] G.L. Erickson, The Development and Application of CMSX®-10. *Superalloys* (1996) 35–44.
- [6] W. Song, X.G. Wang, J.G. Li, L.H. Ye, G.C. Hou, Y.H. Yang, J.L. Liu, J.D. Liu, W.L. Pei, Y.Z. Zhou, X.F. Sun, Effect of ruthenium on microstructure and high-temperature creep properties of fourth generation Ni-based single-crystal superalloys. *Materials Science and Engineering: A*, 772 (2020) 138646. DOI: 10.1016/j.msea.2019.138646

- [7] **A.V. Logunov, Y.N. Shmotin, S.A. Zavodov, et al.**, Development of SLZhS32 BR economically doped heat-resistant alloy with single-crystal structure. *Inorganic Materials: Applied Research*, 7(4) (2016) 531–535. DOI: 10.1134/S2075113316040183
- [8] **J.B. Wahl, K. Harris**, New single crystal superalloys, CMSX®-7 and CMSX®-8. *Superalloys 2012* (2012) DOI: 10.1002/9781118516430.ch20.
- [9] **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
- [10] **A. Koval, A. Andrienko, S. Gayduk, V. Kononov**, Influence of tantalum on structure and strength properties of cast corrosion-resistant nickel-base superalloy ЖС3ЛС. *Innovative materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 2 (2011) 42–46
- [11] **Y. Cheng, X. Zhao, W. Xia, Q. Pan, Q. Yue, Y. Gu, Z. Zhang**, Effects of Mo addition on microstructure of a 4th generation Ni-based single crystal superalloy. *Progress in Natural Science: Materials International*, 32(6) (2022) 745–751. DOI: 10.1016/j.pnsc.2022.10.001
- [12] **Y. Cheng, X. Zhao, W. Xia, Q. Yue, Y. Gu, X. Wei, H. Bei, Y. Dang, Z. Zhang**, Effect of Mo on microstructural stability of a 4th generation Ni-based single crystal superalloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 21 (2022) 2672–2681. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.10.072
- [13] **C. Ai, Q. Li, J. Zhang, H. Su, W. Yang, L. Liu, Y. Ru, H. Zhang, Y. Song, Y. Chen, S. Li, S. Gong**, Effect of substituting Mo for W on γ/γ' 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
- [14] **F. Ding, L. Zhou, L. Zhao, X. Dou, K. Xiao, J. Song, J. Du, G. 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
- [15] **S. Gao, Z.-F. Song, B. He, L.-Zh. Zhou, J.-S. Hou**, Effect of Ta addition on solidification microstructure and element segregation of IN617B nickel-base superalloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 32(2) (2022) 559–568. DOI: 10.1016/S1003-6326(22)65815-1

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.