

Металлургия. Материаловедение Metallurgy. Material Science

Научная статья

УДК 621.762

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29404>



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

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

✉ voevodenko.daniil@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ КОМПАКТНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ЭКОНОМНО-ЛЕГИРОВАННОГО ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ В ПРОЦЕССЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ

Аннотация. Легированные сплавы на никелевой основе (ЖНС) нашли широкое применение в качестве жаропрочных при изготовлении газотурбинных двигателей, главным образом в виде рабочих и сопловых лопаток и в меньшей степени в качестве турбинных дисков и колец. Их развитие связано с увеличением объемного содержания γ' -фазы, которая приводит к повышению теплостойкости, за счёт введением новых легирующих элементов, таких как, например, рений (Re) и рутений (Ru). Известно, что данные легирующие элементы значительно влияют на повышение стоимости конечного изделия, по этой причине в настоящее время актуальны разработки экономно-легированных сплавов, не содержащих в первую очередь Re и Ru. Помимо этого, актуальны исследования в области изготовления деталей с помощью аддитивного производства (АП), обладающего своими преимуществами. В данной работе рассмотрена возможность изготовления компактных образцов с направленной структурой из экономно-легированного сплава путем селективного лазерного плавления (СЛП). Были проведены исследования образцов, установлена и проанализирована связь легирующих элементов с выделением ТПУ фаз, карбидов и процента несоответствия периодов кристаллических решеток γ - и γ' -фаз (мисфита) с прочностными характеристиками. В ходе исследования были получены образцы из экономно-легированного сплава с мисфитом больше, чем в рениевых сплавах второго поколения, и определены направления следующих работ.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, селективное лазерное плавление, направленные структуры, мисфит, γ' -фаза.

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No. 23-79-30004, <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>

Для цитирования:

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: <https://doi.org/10.18721/JEST.29404>

Research article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.29404>*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 MICROSTRUCTURE OF COMPACT SAMPLES FROM ECONOMICAL HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOY OBTAINED BY DIRECTED CRYSTALLIZATION IN THE PROCESS OF SELECTIVE LASER MELTING

Abstract. Nickel-based alloys have found widespread use as heat-resistant alloys in the manufacture of gas turbine engines, mainly in the form of working blades and nozzles and, to a lesser extent, as turbine disks and rings. Their development is associated with an increase in the volumetric content of the γ' -phase, which leads to an increase in heat resistance due to the introduction of new alloying elements, such as, for example, rhenium (Re) and ruthenium (Ru). It is known that these alloying elements significantly influence the increase in the cost of the final product; for this reason, the development of economical alloys primarily without Re and Ru is currently relevant. In addition, research is relevant in the field of manufacturing parts using additive manufacturing (AM), which has its own advantages. This paper examines the possibility of producing compact samples with a directional structure by economical alloying using selective laser melting (SLM). Samples were studied and the relationship of alloying elements with the isolation of TCP phases, carbides and the percentage of mismatch between the lattice periods of the γ - and γ' -phases (misfit) with strength characteristics was established and analyzed. During the study, we obtained economically alloyed samples with more misfit than in second-generation rhenium alloys and determined the directions for further work.

Keywords: heat-resistant nickel alloys, selective laser melting, directional structures, misfit, γ' -phase.

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-30004, <https://rscf.ru/project/23-79-30004/>

Citation:

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: <https://doi.org/10.18721/JEST.29404>

Введение. Жаропрочные сплавы на основе никеля (ЖНС) – это особый класс материалов, разработанный специально для работы в условиях экстремальных температур и высоких механических нагрузок. История развития жаропрочных сплавов начинается в 1920-х годах, когда появилась потребность в разработке материалов, способных выдерживать экстремальные условия работы. Прорывом в развитии жаропрочных сплавов стало открытие высокотемпературной фазы γ' , которая обладает уникальными свойствами устойчивости при высоких температурах. Общей тенденцией в их развитии было стремление к непрерывному увеличению объемного содержания γ' -фазы, которая приводит к повышению теплостойкости. Основные улучшения характеристик сплавов связаны с введением новых легирующих элементов, включая такие как Re и Ru. Как известно, данные добавки важны, в первую очередь, за счёт того, что в двойных и тройных диаграммах состояния они образуют широкие области растворимости в твердых растворах. Легирование

сплава данными тугоплавкими элементами позволяет снизить скорость процессов диффузии, имеющих критическую важность во время разупрочнения ЖНС в условиях высокотемпературной ползучести. Помимо этого, за счёт разности атомных радиусов (никель имеет меньший радиус, чем Re и Ru), достигается несоответствие периодов решеток в γ - и γ' -фазах (мисфит), что позволяет увеличить значение длительной прочности при высоких температурах.

Позднее было разработано целое семейство ЖНС, которые, в зависимости от их длительной прочности, стали условно классифицировать по поколениям. Например, сплавы, включающие рений, относят ко второму и третьему поколениям [1], с его процентным содержанием по массе 2–4% и 5–7% соответственно.

Сплавы 2 поколения с трёхпроцентным содержанием рения, такие как Rene No. 5, CMSX-4®, PWA 1484, в данный момент нашли наибольшую распространённость на рынке и служат эталоном для сравнения при новых разработках. К 4 и 5 поколениям относятся жаропрочные никелевые сплавы, с высоким содержанием рения и дополнительно легированные рутением в объеме 2–6%. Стоит отметить, что различные сплавы внутри одного поколения могут иметь разные комбинации основных легирующих элементов, но каждое новое поколение сплавов повышает их работоспособность при высоких температурах на 20–25 °С. Однако, в настоящее время стоимость Re и Ru составляет более 60% от общей стоимости шихтовых материалов современных никелевых жаропрочных сплавов [1, 2]. Таким образом следует отметить и экономическую составляющую (стоимость/свойства), которая в последних разработанных сплавах имеет отрицательную тенденцию, за счёт того, что незначительный рост свойств, сопровождается резким скачком цены [3]. Исходя из этого, существует значительный интерес к разработке экономно-легированных безрениевых жаропрочных никелевых сплавов или со значительно низким его содержанием по сравнению с сплавами 2 и 3 поколений. Например, компания Cannon-Muskegon® разработала два инновационных сплава: безрениевый CMSX-7 и CMSX-8 с низким содержанием рения, представляющих альтернативу сплавам такого же поколения, таким как CMSX-4 или Rene No. 5. CMSX-7 обладает улучшенными характеристиками по сравнению с существующими безрениевыми сплавами 1 поколения, наподобие CMSX-2/3, и может конкурировать с рений-содержащими сплавами, такими как Rene No. 5 и Rene No. 515 [4]. Первоначальные характеристики циклической усталости при температуре 1038 °С (1900 °F) для CMSX-7 сходны с номинальными показателями сплава CMSX-4. Кроме того, CMSX-7 обладает высокими литейными свойствами и стабильностью фаз. Сплав CMSX-8 (1,5% Re) имеет сравнительные свойства со сплавом CMSX-4 (3% Re), а по свойствам ползучести/разрушения как минимум до 1010 °С (1850 °F), превосходит Rene' No. 5 (3% Re) и Rene No. 515 (1,5% Re).

Из вышеперечисленных методов оптимизации производства лопаток из жаропрочных никелевых сплавов, таких как разработка новых сплавов и снижения стоимости самих деталей, в настоящее время также рассматривается альтернатива в виде другой технологии их изготовления – селективного лазерного плавления (СЛП). Селективное лазерное плавление — это процесс аддитивных технологий, заключающийся в послойной плавке порошкового слоя с помощью сфокусированного лазерного луча высокой плотности, который, согласно трехмерной цифровой модели, избирательно сканирует каждый слой порошка, в результате чего затвердевшие слои накладываются друг на друга, образуя полностью функциональную трехмерную деталь, инструмент или прототип. Например, компания SIEMENS объявила об успешном завершении полномасштабных испытаний промышленной газовой турбины SGT-400, которая оснащена лопатками, полностью изготовленными методом СЛП [5].

В настоящее время стремление к дальнейшему повышению рабочих температур и удешевление сплавов делают для исследователей все более привлекательной технологию послойного синтеза. За счёт СЛП существует возможность снижения процента брака, возможность создания топологически сложных деталей, например с более сложными зонами охлаждения, которые

невозможно получить классическими методами, а также разработка новых сплавов, в которых не требуются элементы, отвечающие за литейные свойства. Например, согласно исследованиям А. Д. Коваль и др. [6], высокое содержание Ta, отвечающего за литейные свойства, приводит к значительному увеличению размеров и числа карбидных частиц. Помимо этого, исследователи продемонстрировали, что тантал изменяет морфологию эвтектических выделений γ - γ' -фаз, а также увеличивает их количество. Исходя из этого, можно сделать вывод, что содержание Ta 9% в CMSX-7 приведет к худшим свойствам. По этим причине актуальны разработки экономно-легированных сплавов с более высокими характеристиками за счёт снижения литейных качеств, не требуемых для метода СЛП.

Говоря о преимуществах аддитивных технологий, следует рассмотреть и недостатки. Например, общими и характерными для всех видов аддитивных технологий, проблемами селективного лазерного спекания является сложность в получении требуемой микроструктуры полученного материала, а также в устранение пор [7]. Различные исследования показывают, что в данной технологии свойства сплавов зависят не только химического состава используемого порошка и его гранулометрических и морфологических свойств, но и от выбранной стратегии сканирования, оказывающей непосредственное влияние на внутреннюю микроструктуру и её дефектность. Стоит отметить, что режим обработки подбирается экспериментально для каждого нового материала.

Как известно, микроструктурная и физическая анизотропия наряду с дефектами оказывают негативное влияние на характеристики и поведение сплавов, полученных методом СЛП. Поэтому для улучшения характеристик материала необходимо уделять особое внимание выявлению и устранению этих отклонений. Поскольку эти процедуры оказывают существенное влияние на микроструктуру и механическое поведение, оценка их влияния и связанных с этим изменений имеет большое значение [8].

В различных исследованиях было предпринято множество попыток контролировать рост зерен/дендритов и текстуру в процессе кристаллизации при СЛП. Регулировка энергетических параметров [9], оптимизация стратегии сканирования [10], использование монокристаллической подложки и ее нагрев [11] и т. д. [12–14]. Однако, во многих источниках не рассматривается проблематика самих составов сплавов.

Таким образом, цель данной работы заключается в анализе особенностей формирования направленной структуры жаропрочных никелевых сплавов при селективном лазерном плавлении, исследовании влияния химического состава порошка на свойства, а также исследование особенностей структурообразования и причин появления различных дефектов в сплаве. Это имеет критическое значение для дальнейшего улучшения производственных процессов и создания изделий с улучшенными характеристиками для требовательных отраслей промышленности.

Материалы и методы исследования

Исследуемые образцы были изготовлены методом селективного лазерного плавления из экономно-легированного порошка жаропрочного никелевого сплава с упрочняющей фазой γ' , не содержащего Re и Ru. Порошок был отсеян для получения оптимального гранулометрического состава, средний размер частиц порошка составил 50,3 мкм.

Предварительно был проведён анализ морфологии порошка, изображения, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), свидетельствуют о сферичности частиц порошка (рис. 1), что, в свою очередь, оказывает положительно влияние на текучесть порошка и благотворно влияет на процесс изготовления образца методом селективного лазерного плавления.

При получении экспериментальных образцов из жаропрочного никелевого сплава методом селективного лазерного плавления использовалось оборудование, дополнительно оснащенное системой индуктивного высокотемпературного подогрева зоны построения и в защитной среде

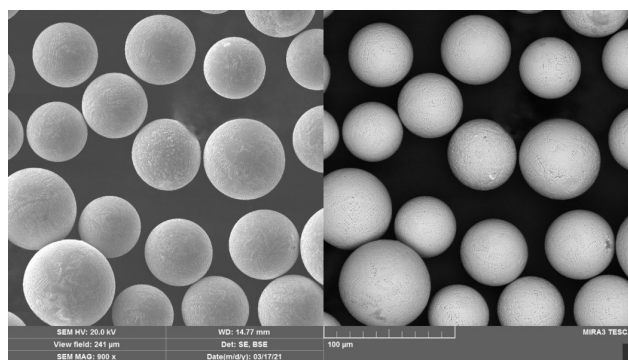


Рис. 1. Снимки СЭМ частиц порошка жаропрочного никелевого сплава
 Fig. 1. SEM images of heat-resistant nickel alloy powder particles

аргона с содержанием кислорода в рабочей камере не выше 20 ppm. Для избежания градиента температур при плавлении слоёв образца, перед началом эксперимента рабочая платформа была предварительно нагрета до 1000 °С.

Параметры процесса селективного лазерного плавления для данной работы определяются по соотношению: $E = P / (S \cdot H \cdot L)$ (Дж/мм³), где плотность энергии (E), которая составляет 150 Дж/мм³, мощность лазера (P) – 90 Вт и скорость сканирования (S) – 1200 мм/с. Расстояние между проходами (H) составляло 100 мкм, а толщина наносимого слоя (L) – 50 мкм.

После изготовления образцы были удалены с подложки и подвергнуты полировке вдоль направления выращивания для последующего травления в растворе HCl, CuSO₄ и H₂SO₄. Для анализа микроструктуры, поверхности микродефектов и оценки их количества использовались сканирующий электронный микроскоп «Carl Zeiss Supra 55VP» с приставкой энергодисперсионной спектроскопии.

Результаты и обсуждение

Исходя из полученных снимков микроструктуры образцов после травления (рис. 2), можно сделать вывод о небольшом количестве микропор, которые присущи различным методам аддитивного производства и образуются в следствии термической усадки у фронта кристаллизации в зонах, изолированных от общего объема жидкой фазы из-за невозможности компенсации усадки. Как известно, для высоких скоростей кристаллизации характерно меньшее значение ширины ячеек γ/γ' и большая протяженность границ, что в свою очередь увеличивает вероятность образования дефектов усадочного происхождения в образце. Исходя из полученных данных следует, что количество макро- и микродефектов напрямую зависит от ширины ячеек γ/γ' .

Методом растровой электронной микроскопии было проведено исследование поверхности шлифов, что в свою очередь, позволило установить, наличие гетерофазной структуры в исследуемом образце, состоящей из преимущественно столбчатых ячеек γ -твердого раствора, которые вытянуты вдоль направления выращивания. Внутри γ -твердого раствора рассеяны выделения γ' -фазы, имеющие квазикубоидную формы. Из снимка видно, что образцы имеют ячейки γ -твердого раствора, максимальное значение средней ширины ячеек (13,5 мкм). Исходя из анализа направления кристаллитов, можно сделать вывод о том, что преимущественное направление роста сохраняется и на последующих слоях, а сохранение преимущественной ориентации возможно, по причине того, что внезапно проявляющиеся флуктуации направленности быстро подавляются.

На изображениях образцов, полученных с помощью энергодисперсионной спектроскопии отчетливо видна значительная концентрация топологически плотноупакованных (ТПУ) фаз (рис. 3).

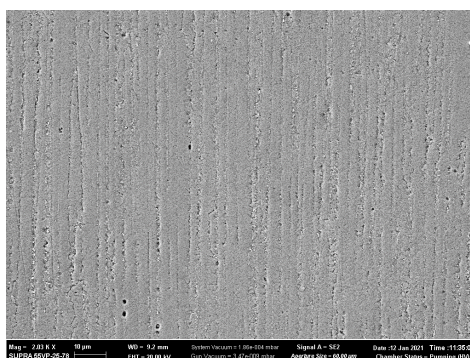


Рис. 2. Микроструктура образцов из жаропрочного никелевого сплава, полученных методом СЛП
 Fig. 2. Microstructure of samples from a heat-resistant nickel alloy obtained by the SLM

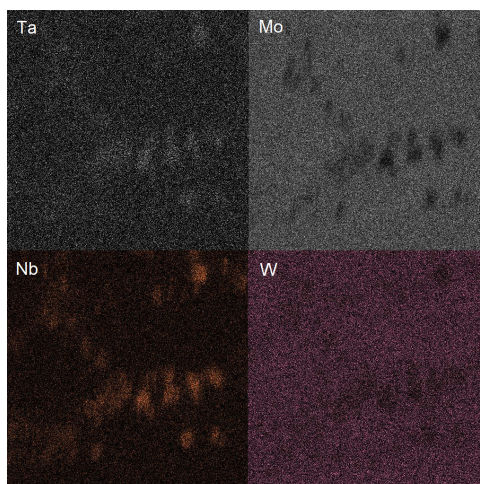


Рис. 3. Карты распределения элементов
 Fig. 3. Maps of elemental composition

Детальный ЭДС-анализ позволил выявить элементный состав этих фаз, который в первую очередь характеризуется присутствием Nb, Ta, W и Mo. Интересно, что при изучении распределения посредством элементного картирования становится очевидным, что Mo и W демонстрирует более равномерную дисперсию по объему, за исключением зон, в которых, напротив, Ta и Nb демонстрируют повышенную локализацию внутри областей ТПУ фаз, что согласуется с другими исследованиями [6,15–19].

Исходя из результатов рентгенофазового анализа полученного образца (рис. 4), выполненного в поперечном и продольном сечениях образца, можно сделать вывод, что структура образца характеризуется направленной текстурой, в которой ориентировка кристаллитов вдоль направления перпендикулярного плоскости (001) в поперечном сечении и (110) в продольном, а коэффициент Марча-Далласа составляет 0,35.

Согласно полученной дифрактограмме образца, разделение пиков γ и γ' – фазы наблюдается в районе значения угла дифракции 75° , а параметры кристаллической решетки γ и γ' – фаз равняются $3,589 \text{ \AA}$ и $3,579 \text{ \AA}$ соответственно. Исходя из этих данных, по формуле $\Delta a = (a\gamma - a\gamma') / a\gamma'$ можно подсчитать, что величина мисфита составляет 0,28%. Стоит отметить, что типичные значения несоответствия периодов решеток при температуре 20°C для известных монокристал-

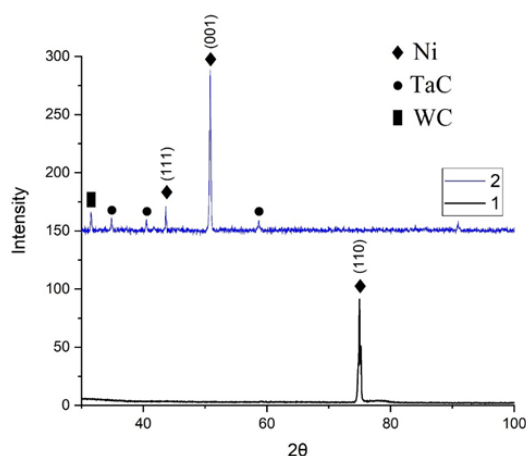


Рис. 4. Дифрактограмма полученного образца
 Fig. 4. X-ray diffraction pattern of the obtained sample

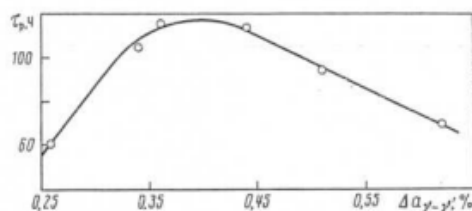


Рис. 5. Зависимость времени до разрушения при температуре 1000°C и напряжении 250 МПа ЖНС от мисфита [21]
 Fig. 5. Dependence of time to destruction at a temperature of 1000°C and a stress of 250 MPa of liquid nanostructure on misfit [21]

лических жаропрочных никелевых сплавов, относящихся к первому, второму и третьему поколениям, лежат в интервале 0,1–0,2%, а у сплавов четвертого поколения – 0,4–0,6% [20]. Исходя из известных литературных данных, максимум длительной прочности достигается при мисфите 0,4% (рис. 5) [21].

Помимо прочего, согласно диаграмме в образце наблюдается наличие карбидов – TaC и WC, которые выделяются по граничным зонам ячеек γ -твердого раствора, что может приводить к дефектообразованию при их большом количестве, но учитывая полученные данные растровой электронной микроскопии, а именно отсутствие видимых карбидов, можно сделать вывод, что их содержание незначительно.

Стоит отметить, что увеличение содержания Cг и W приводит к уменьшению абсолютного значения несоответствия периодов решеток фаз в отрицательной ($a_\gamma - a_{\gamma'} < 0$) и к увеличению этой величины в положительной области значений ($a_\gamma - a_{\gamma'} > 0$), а Co и Nb, в свою очередь, существенного влияния на размерное несоответствие не оказывают [22]. По этой причине, из полученных в ходе данной работы результатов, следует обратить особое внимание на содержание данных легирующих элементов в жаропрочных никелевых сплавах, используемых в селективном лазерном плавлении.

Исходя из сравнительного анализа (табл. 1), можно сделать вывод, что в процессе селективного лазерного плавления не характерно выделение крупных карбидов, а также то, что при СЛП первичное расстояние между плечами дендрита значительно меньше, таким образом, можно сде-

лать вывод, что скорость кристаллизации процесса СЛП была выше, чем при литье. В целом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что процесс селективного лазерного плавления предоставляет возможность получать средний размер γ' -фазы 0,01 мкм, но так как в нижних слоях образцы пребывают в температуре подогрева при 1000 °С, то размер этих частиц в нижних слоях может вырастать и таким образом наблюдается градиент размеров γ' -фазы. Исходя из этого, следует обратить внимание на возможность подогрева рабочей зоны не только снизу, но и сверху. В таком случае, и при дополнительной термообработке можно будет получать γ' -фазы от 0,01 мкм без значительного роста градиента её размеров.

Таблица 1

Сравнение литой структуры [23] и полученной в ходе работ методом СЛП

Table 1

Comparison of the cast structure [23] and that obtained during the work using the SLM method

V, мм/мин	Расстояние между осями дендритов, мкм		Максимальный размер карбидов, мкм	Средний размер γ' -фазы, мкм
	I порядок	II порядок		
Литьё				
4	445	50	37	0,5–0,9
20	150	30	16	0,3–0,5
80	45	19	7	0,06–0,15
Селективное лазерное плавление				
200	13,5	–	0,Х	0,01–0,2

Заключение

В данной работе были получены компактные образцы из экономно-легированного сплава с мисфитом больше, чем в рениевых сплавах второго поколения с помощью селективного лазерного плавления. Установлена и проанализирована связь легирующих элементов с выделением ТПУ фаз, карбидов и процента несоответствия периодов кристаллических решеток γ - и γ' -фаз с прочностными характеристиками. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что разработки оптимального химического состава порошка ЖНС для СЛП являются актуальной задачей, по причине того, что, например Nb и Ta, которые выделяется преимущественно в ТПУ фазах, либо образуют карбиды (W и Ta), могут влиять на вероятность дефектообразования, следовательно уменьшение их содержания может снизить эту вероятность, и улучшить экономическую составляющую сплава (стоимость/свойства). Так же установлено, что селективное лазерное сплавление за счёт более высоких скоростей кристаллизации позволяет получать сравнительно небольшое расстояние между осями дендритов и значительно меньший средний размер γ' -фазы, что в перспективе может положительно влиять на теплостойкость и длительную прочность конечной детали.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Erickson G.L. The Development and Application of CMSX-10. 2012. Vol. 47. P. 35–44.
 [2] Koizumi Y. et al. Development of next-generation Ni-base single crystal superalloys // Proceedings of the International Symposium on Superalloys. 2004. Vol. 9. P. 35–43.

- [3] **Logunov A.V. et al.** Development of SLZHS32 BR economically doped heat-resistant alloy with single-crystal structure // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2016. Vol. 7, № 4. P. 531–535.
- [4] **Wahl J.B., Harris K.** New Single Crystal Superalloys, CMSX®-7 and CMSX®-8 // *Superalloys 2012*. 2012. P. 177–188.
- [5] **Navrotsky V., Graichen A., Brodin H.** Industrialisation of 3D printing (additive manufacturing) for gas turbine components repair and manufacturing // *VGB PowerTech Journal*. 2015. Vol. 12. P. 48–52.
- [6] **Коваль А.Д. и др.** Влияние тантала на структуру и прочностные характеристики литейного жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава ЖСЗЛС // *Новые материалы и технологии в металлургии и машинном оборудовании*. 2011. № 2. P. 42–46.
- [7] **Li Y. et al.** High temperature VHCF of a 3rd generation Ni-based single crystal superalloy with different casting pore sizes // *Int J Fatigue*. 2023. Vol. 175. P. 107804.
- [8] **Korkmaz M.E. et al.** A short review on thermal treatments of Titanium & Nickel based alloys processed by selective laser melting // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 16. P. 1090–1101.
- [9] **Sun S.H. et al.** Excellent mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel with a unique crystallographic lamellar microstructure via selective laser melting // *Scr Mater*. 2019. Vol. 159. P. 89–93.
- [10] **Jóźwik B. et al.** Influence of SLM printing parameters and hot isostatic pressure treatment on the structure and properties of CuNi3Si1 alloy // *J Alloys Compd*. 2023. Vol. 947. P. 169531.
- [11] **Wang Y., Choi J., Mazumder J.** Erratum to: Laser-Aided Direct Writing of Nickel-Based Single-Crystal Super Alloy (N5) // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2017. Vol. 48, № 7. P. 5685–5690.
- [12] **Fox J.C. et al.** Surface Feature Characteristics of Laser Powder Bed Fusion of Nickel Super Alloy 625 Bulk Regions // *Procedia CIRP*. 2022. Vol. 108. P. 531–536.
- [13] **Dwivedi A., Khurana M.K., Bala Y.G.** Heat-treated Nickel Alloys Produced Using Laser Powder Bed Fusion-based Additive Manufacturing Methods: A Review // *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*. 2023. Vol. 2, № 3. P. 100087.
- [14] **Dwivedi A. et al.** Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties for laser powder bed fusion of nickel-based superalloy: A review // *Mater Today Proc*. 2023.
- [15] **Cheng Y. et al.** Effects of Mo addition on microstructure of a 4th generation Ni-based single crystal superalloy // *Progress in Natural Science: Materials International*. 2022. Vol. 32, № 6. P. 745–751.
- [16] **Cheng Y. et al.** Effect of Mo on microstructural stability of a 4th generation Ni-based single crystal superalloy // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 21. P. 2672–2681.
- [17] **Ai C. et al.** 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 (Barking)*. 2021. Vol. 134. P. 107198.
- [18] **Ding F. et al.** Theoretical study on the influence of Cr, Mo, and W alloying additions on the helium behavior in nickel // *Journal of Nuclear Materials*. 2022. Vol. 565. P. 153720.
- [19] **GAO S. et al.** Effect of Ta addition on solidification microstructure and element segregation of IN617B nickel-base superalloy // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022. Vol. 32, № 2. P. 559–568.
- [20] **Самойлов А.И. и др.** Мисфит как характеристика уровня межфазных напряжений в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах // *Металлы*. 2011. № 3. P. 71.
- [21] **Светлов И.Л. и др.** Концентрационная зависимость периодов решеток γ -и γ' -фаз никелевых жаропрочных сплавов // *Металлы*. 1991. № 6. P. 150–157.
- [22] **Петрушин Н.В. и др.** Исследование влияния размерного несоответствия периодов кристаллических решеток γ -и γ' -фаз на характеристики жаропрочности дисперсионно-твердеющих никелевых сплавов // *Металлы*. 1981. № 6. P. 153–159.
- [23] **Логунов А.В. и др.** Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин // *Газотурбинные технологии*. 2017. Vol. 12. P. 854.

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

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] **G.L. Erickson**, The Development and Application of CMSX-10. 2012. Vol. 47. P. 35–44.
- [2] **Y. Koizumi et al.**, Development of next-generation Ni-base single crystal superalloys // Proceedings of the International Symposium on Superalloys. 2004. Vol. 9. P. 35–43.
- [3] **A.V. Logunov et al.**, Development of SLZhS32 BR economically doped heat-resistant alloy with single-crystal structure // Inorganic Materials: Applied Research. 2016. Vol. 7, № 4. P. 531–535.
- [4] **J.B. Wahl, K. Harris**, New Single Crystal Superalloys, CMSX®-7 and CMSX®-8 // Superalloys 2012. 2012. P. 177–188.
- [5] **V. Navrotsky, A. Graichen, H. Brodin**, Industrialisation of 3D printing (additive manufacturing) for gas turbine components repair and manufacturing // VGB PowerTech Journal. 2015. Vol. 12. P. 48–52.
- [6] **A.D. Koval i dr.**, Vliyaniye tantala na strukturu i prochnostnyye kharakteristiki liteynogo zharoprochnogo korrozionnostoykogo nikellevogo splava ZhS3LS // Novyye materialy i tekhnologii v metallurgii i mashinnom oborudovanii. 2011. № 2. P. 42–46.
- [7] **Y. Li et al.**, High temperature VHCF of a 3rd generation Ni-based single crystal superalloy with different casting pore sizes // Int J Fatigue. 2023. Vol. 175. P. 107804.
- [8] **M.E. Korkmaz et al.**, A short review on thermal treatments of Titanium & Nickel based alloys processed by selective laser melting // Journal of Materials Research and Technology. 2022. Vol. 16. P. 1090–1101.
- [9] **S.H. Sun et al.**, Excellent mechanical and corrosion properties of austenitic stainless steel with a unique crystallographic lamellar microstructure via selective laser melting // Scr Mater. 2019. Vol. 159. P. 89–93.
- [10] **B. Jóźwik et al.**, Influence of SLM printing parameters and hot isostatic pressure treatment on the structure and properties of CuNi3Si1 alloy // J Alloys Compd. 2023. Vol. 947. P. 169531.
- [11] **Y. Wang, J. Choi, J. Mazumder**, Erratum to: Laser-Aided Direct Writing of Nickel-Based Single-Crystal Super Alloy (N5) // Metallurgical and Materials Transactions A. 2017. Vol. 48, № 7. P. 5685–5690.
- [12] **J.C. Fox et al.**, Surface Feature Characteristics of Laser Powder Bed Fusion of Nickel Super Alloy 625 Bulk Regions // Procedia CIRP. 2022. Vol. 108. P. 531–536.
- [13] **A. Dwivedi, M.K. Khurana, Y.G. Bala**, Heat-treated Nickel Alloys Produced Using Laser Powder Bed Fusion-based Additive Manufacturing Methods: A Review // Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers. 2023. Vol. 2, № 3. P. 100087.
- [14] **A. Dwivedi et al.**, Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties for laser powder bed fusion of nickel-based superalloy: A review // Mater Today Proc. 2023.
- [15] **Y. Cheng et al.**, Effects of Mo addition on microstructure of a 4th generation Ni-based single crystal superalloy // Progress in Natural Science: Materials International. 2022. Vol. 32, № 6. P. 745–751.

- [16] **Y. Cheng et al.**, Effect of Mo on microstructural stability of a 4th generation Ni-based single crystal superalloy // *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 21. P. 2672–2681.
- [17] **C. Ai et al.**, 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 (Barking)*. 2021. Vol. 134. P. 107198.
- [18] **F. Ding et al.**, Theoretical study on the influence of Cr, Mo, and W alloying additions on the helium behavior in nickel // *Journal of Nuclear Materials*. 2022. Vol. 565. P. 153720.
- [19] **S. GAO et al.**, Effect of Ta addition on solidification microstructure and element segregation of IN617B nickel-base superalloy // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2022. Vol. 32, № 2. P. 559–568.
- [20] **A.I. Samoylov i dr.**, Misfit kak kharakteristika urovnya mezhfaznykh napryazheniy v monokristallicheskikh zharoprochnykh nikelovykh splavakh // *Metally*. 2011. № 3. P. 71.
- [21] **I.L. Svetlov i dr.**, Kонтсentratsionnaya zavisimost periodov reshetok γ -i γ' -faz nikelovykh zharoprochnykh splavov // *Metally*. 1991. № 6. P. 150–157.
- [22] **N.V. Petrushin i dr.**, Issledovaniye vliyaniya razmernogo nesootvetstviya periodov kristallicheskikh reshetok γ -i γ' -faz na kharakteristiki zharoprochnosti dispersionno-tverdeyushchikh nikelovykh splavov // *Metally*. 1981. № 6. P. 153–159.
- [23] **A.V. Logunov i dr.**, Zharoprochnyye nikelovyye splavy dlya lopatok i diskov gazovykh turbin // *Gazoturbinnyye tekhnologii*. 2017. Vol. 12. P. 854.

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

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

E-mail: popovicha@mail.ru

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

Поступила: 26.09.2023; Одобрена: 25.10.2023; Принята: 26.10.2023.

Submitted: 26.09.2023; Approved: 25.10.2023; Accepted: 26.10.2023.