

**МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СТОЙКОСТИ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ К ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ**

Э.Г. Аргинбаева

elargin@mail.ru

SPIN-код: 4728-4138

С.А. Луцкая

solutskaya@gmail.com

SPIN-код: 1832-8547

**ФГУП «ВИАМ», Москва, Российская Федерация****Аннотация**

Выполнен обзор научных публикаций зарубежных и отечественных исследователей, посвященных проблеме высокотемпературной ползучести литейных жаропрочных сплавов на никелевой основе. Приведена информация о механизмах высокотемпературной ползучести для сплавов с монокристаллической и поликристаллической структурой. Рассмотрены основные способы повышения структурной стабильности никелевых сплавов методами рафинирования, легирования, газостатического прессования и термической обработки, приведены данные о влиянии скорости охлаждения на стойкость сплавов к ползучести. Указаны перспективные направления исследований ФГУП «ВИАМ» по повышению стойкости литейных жаропрочных никелевых сплавов к высокотемпературной ползучести.

**Ключевые слова**

Ползучесть, никелевые жаропрочные сплавы, монокристалл, мисфит, рафт-структура, рений, термическая обработка, горячее изостатическое прессование

Поступила в редакцию 08.04.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Литейные жаропрочные никелевые сплавы широко используются во многих отраслях промышленности для изготовления деталей, работающих при высоких температурах. Это детали горячего тракта газотурбинных двигателей, штамповая оснастка, захваты машин для проведения высокотемпературных испытаний [1–4].

Основными требованиями, предъявляемыми к жаропрочным материалам, являются высокий уровень служебных характеристик и стабильность механических свойств в течение всего жизненного цикла детали. Кроме того, важно сохранение геометрических размеров в процессе работы, что возможно при малых значениях ползучести.

Материал оснастки помимо обозначенных выше свойств должен обладать значительной стойкостью к окислению. Для захватов испытательных машин необходимо минимизировать диффузию между оснасткой и исследуемым образцом [5], что возможно либо при наличии на поверхности прочной оксидной пленки, образованной естественным путем и не склонной к скалыванию и раскрекиванию, либо при наличии на поверхности нанесенного покрытия.

Таким образом, повышение стойкости литейных жаропрочных никелевых сплавов к высокотемпературной ползучести представляет значительный интерес. Вопросам повышения сопротивления ползучести и уменьшения диффузии в жаропрочных материалах посвящено множество исследований. Целью данной работы является обзор публикаций за последние годы, посвященных решению проблемы высокотемпературной ползучести для литейных никелевых жаропрочных сплавов.

Работа выполнена в рамках реализации научного направления 9 «Монокристаллические жаропрочные суперсплавы, включая естественные композиты» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].

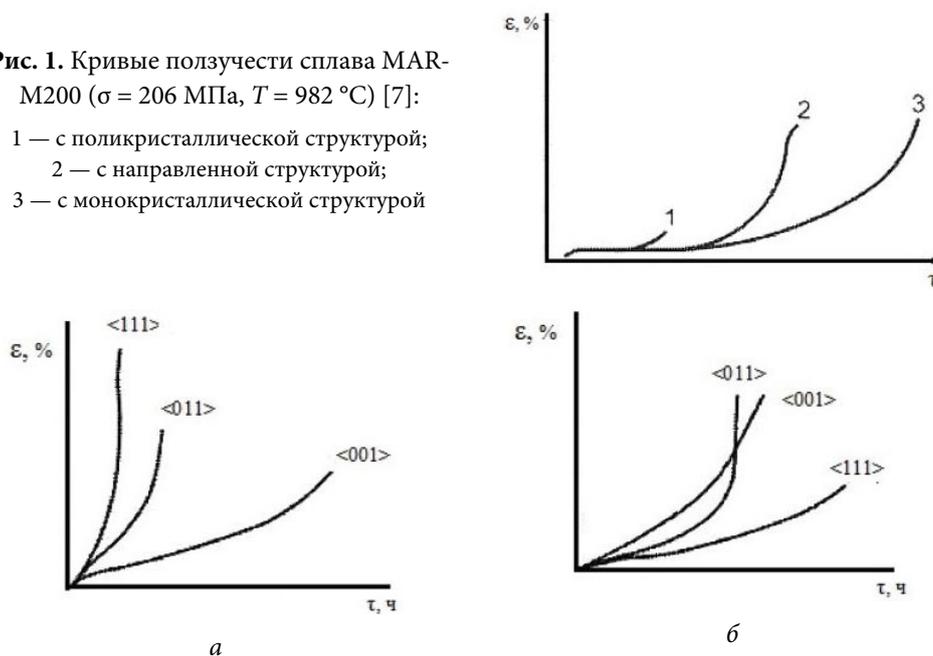
**Основная часть.** Сопротивление высокотемпературной ползучести жаропрочных никелевых сплавов зависит от многих факторов, наиболее важными среди которых являются структурная и фазовая стабильность, степень твердо-растворного упрочнения  $\gamma$ - и  $\gamma'$  фаз и размерное несоответствие периодов кристаллических решеток фаз ( $\gamma/\gamma'$ -мисфит). Эти факторы определяются химическим составом и типом структуры, который, в свою очередь, определяется режимами отливки и термической обработки.

Размер, форма и ориентация зерна оказывают значительное влияние на поведение материала в условиях повышенных температур и нагрузок, что было показано еще на примере никелевых сплавов первого поколения в работах первопроходцев в области материаловедения жаропрочных сплавов [6]. Известно, что время до разрушения при испытании на ползучесть у сплавов с поликристаллической структурой значительно меньше, чем у сплавов с направленной и монокристаллической структурой, причем отличие в кривых ползучести заключается в различной протяженности второй стадии — стадии установившейся ползучести, что можно увидеть на рис. 1. Это объясняется наличием у поликристаллических сплавов механизма межзеренного проскальзывания при высокотемпературной деформации. Характер ползучести в сплавах с монокристаллической структурой зависит от кристаллографической ориентации (КГО) монокристалла. Так, для большинства никелевых жаропрочных сплавов справедливо, что образцы с КГО  $\langle 111 \rangle$  обладают бóльшим сопротивлением ползучести по сравнению с образцами с ориентировками  $\langle 001 \rangle$  и  $\langle 011 \rangle$ , однако в области средних температур может наблюдаться обратная картина, что объясняется формированием барьеров Кира—Вильсдорфа и развитием скольжения в плоскости куба  $\{001\}$ , не характерным для температур выше  $800\text{ }^\circ\text{C}$  [7]. Так, для монокристаллов сплава PWA 1480 при температуре  $T = 760\text{ }^\circ\text{C}$  наблюдается наибольшая деформация у образцов с КГО  $\langle 111 \rangle$ , а при повышении температуры до  $T = 980\text{ }^\circ\text{C}$  образцы с этой ориентацией демонстрируют минимальную деформацию по сравнению с другими образцами (рис. 2). Помимо температуры испытаний на характер анизотропии ползучести оказывает существенное влияние средний размер частиц  $\gamma'$ -фазы, что связано с развитием «кубического» скольжения в плоскости  $\{001\}$  дислокаций в частицах  $\gamma'$ -фазы и различным зна-

чением фактора Шмида для образцов с различной КГО. На рис. 3 демонстрируется различие кривых ползучести образцов сплава CMSX-2 для образцов с различными размерами частиц  $\gamma'$ -фазы и КГО.

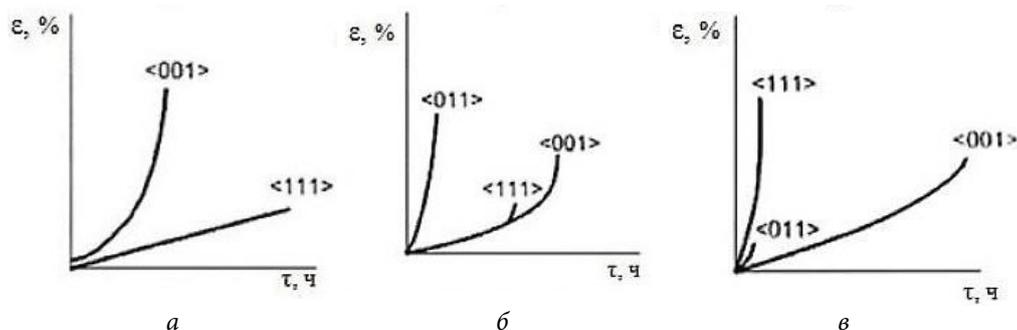
**Рис. 1.** Кривые ползучести сплава MAR-M200 ( $\sigma = 206$  МПа,  $T = 982$  °С) [7]:

- 1 — с поликристаллической структурой;
- 2 — с направленной структурой;
- 3 — с монокристаллической структурой



**Рис. 2.** Анизотропия ползучести сплава PWA 1480 с монокристаллической структурой [7]:

$a - T = 760$  °С;  $b - T = 982$  °С



**Рис. 3.** Кривые ползучести сплава CMSX-2 при  $T = 760$  °С,  $\sigma = 750$  МПа в зависимости от среднего размера частиц  $\gamma'$ -фазы [7]:

$a - 0,23$  мкм;  $b - 0,30$  мкм;  $v - 0,45$  мкм

С учетом изложенного выше, очевидно, что способы повышения стойкости к ползучести зависят в первую очередь от кристаллографической структуры рассматриваемого сплава.

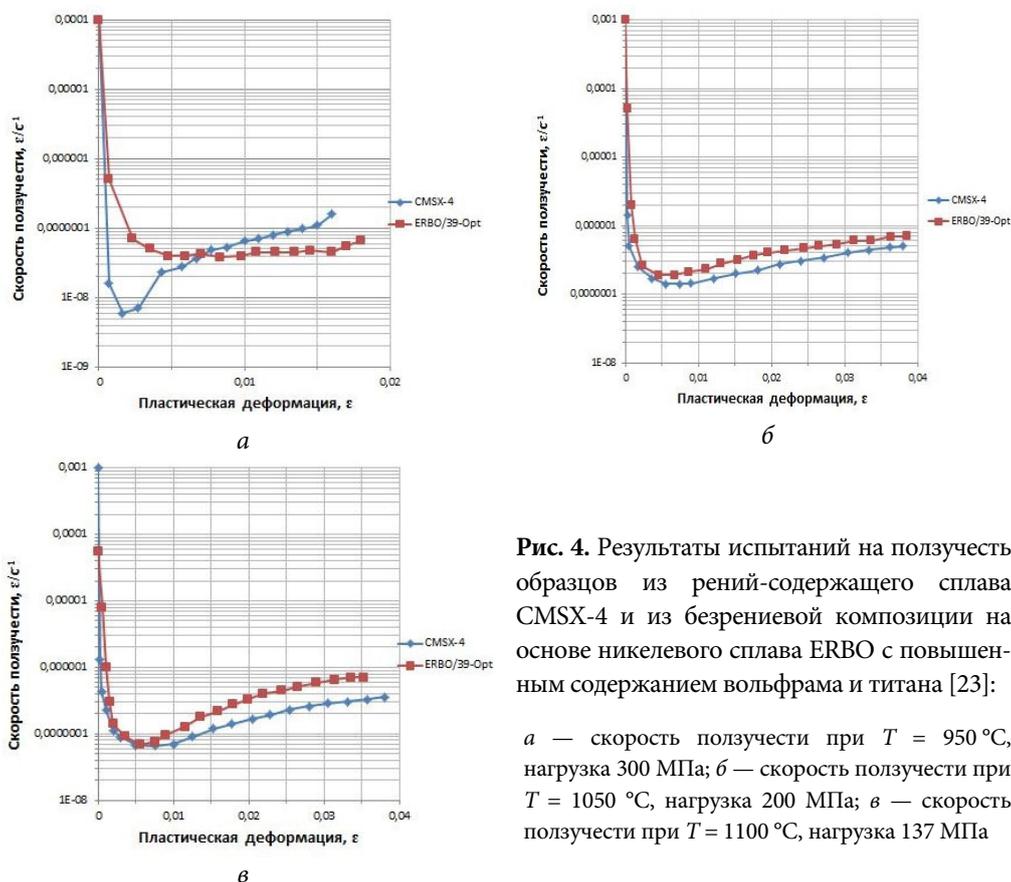
Для повышения стабильности микроструктуры никелевых сплавов с поликристаллической структурой возможно введение в материал карбидообразую-

щих элементов: хрома, вольфрама, молибдена и других, образующих карбиды типа  $Me_7C_3$  и  $Me_{23}C_6$  [8]. Однако при увеличении рабочей температуры свыше  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  карбиды перечисленных элементов растворяются и не оказывают положительного влияния на структуру. В работе [9] авторы отмечают, что карбиды тантала в кобальтовых сплавах являются более стабильными при высокой температуре, однако проведенные исследования для никелевых сплавов [10] показали, что наличие TaC не приносит ожидаемого результата, поскольку в микроструктуре исследуемых сплавов при температурах выше  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  карбиды тантала еще менее стабильны, чем карбиды хрома. Карбиды типа MeC, образованные такими элементами, как титан, ниобий, гафний и другие, являются более стабильными при высоких температурах [11] и, как следствие, более перспективными для стабилизации микроструктуры жаропрочных сплавов. В работе [12] авторы показывают положительное влияние карбидов гафния на стойкость сплава с поликристаллической структурой к высокотемпературной ползучести.

Негативное влияние на стабильность структуры как поликристаллических сплавов, так и монокристаллов оказывает перераспределение легирующих элементов, протекающее вследствие диффузии в процессе эксплуатации. Так, в работе [13] отмечено, что после испытаний на ползучесть никелевых жаропрочных сплавов в исследуемых образцах наблюдается перераспределение Co и Cr с образованием областей с повышенной и пониженной концентрацией этих легирующих элементов, что облегчает процесс двойникования [14] и ускоряет деформацию. Замедлить процессы диффузии (и для сплавов с монокристаллической структурой, и для поликристаллов) возможно путем легирования элементами с большим атомным радиусом, вносящими значительные искажения в кристаллическую решетку.

Как отмечают авторы многих работ [15–20], эффективным способом снижения скорости диффузии в никелевых сплавах является легирование рением. Отличительной особенностью этого элемента является большой атомный радиус ( $r_R/r = 1,103$ ), благодаря чему рений обладает одним из самых низких коэффициентов диффузии в никеле, а также его добавление увеличивает период решетки гамма фазы, что, в свою очередь, увеличивает значение мисфита [16, 18, 21]. Атомы рения формируют кластеры с ближним порядком, препятствующие движению дислокаций [19], что благоприятно влияет на стойкость материала к ползучести. Однако существенными недостатками рения являются его высокая стоимость и негативное влияние на стойкость никелевых сплавов к окислению [22], поэтому в настоящее время ведутся работы по созданию экономно легированных жаропрочных никелевых сплавов, не содержащих рения. Низким коэффициентом диффузии в никеле помимо рения обладают такие элементы, как вольфрам, иридий и осмий, однако применение последних двух в качестве легирующих для промышленных сплавов не представляется перспективным. Вольфрам оказывает не такое значительное влияние на структурную стабильность и стойкость к ползучести, как рений, поэтому в качестве альтернативы может быть использован только в комплексе с другими элементами. В работе [23] авторами было проведе-

но сравнение скоростей ползучести рений-содержащего сплава CMSX-4 с композицией на основе сплава ERBO с различным содержанием вольфрама и титана при температурах 950, 1050 и 1100 °С при одинаковой нагрузке. Как показано на рис. 4, при температуре 950 °С скорость ползучести у рениевого сплава при малых значениях деформации ниже, однако безрениевый сплав демонстрирует стабильное постоянство скорости ползучести (рис. 4, а). При температуре 1050 и 1100 °С скорость ползучести безрениевой композиции приближается к значениям скорости ползучести сплава CMSX-4, особенно при малых значениях деформации (рис. 4, б, в). Достоинством сплавов, легированных вместо рения вольфрамом и титаном, помимо низкой стоимости является меньшая склонность к образованию топологически плотноупакованных (ТПУ) фаз, оказывающих негативное влияние на прочностные свойства никелевых сплавов, что также отмечено в работе [23].



**Рис. 4.** Результаты испытаний на ползучесть образцов из рений-содержащего сплава CMSX-4 и из безрениевой композиции на основе никелевого сплава ERBO с повышенным содержанием вольфрама и титана [23]:

*а* — скорость ползучести при  $T = 950$  °С, нагрузка 300 МПа; *б* — скорость ползучести при  $T = 1050$  °С, нагрузка 200 МПа; *в* — скорость ползучести при  $T = 1100$  °С, нагрузка 137 МПа

В работе [24] рассмотрено влияние рутения на стойкость сплавов к ползучести: при температуре не более 750 °С, влияние рутения на поведение материала значительно, но при повышении температуры положительный эффект от легирования рутением не проявляется. Однако, согласно результатам исследований

ФГУП «ВИАМ» [20, 25], добавление рутения вместе с рением позволяет минимизировать возможность возникновения ТПУ-фаз, что положительно влияет на характеристики сплавов.

Добавление тугоплавких элементов, уменьшающих внутреннюю диффузию, повышает склонность сплавов к междендритной ликвации при литье, поскольку легирующие элементы, увеличивающие температуру солидус, концентрируются в осях дендритов, тогда как в междендритных областях увеличивается концентрация легкоплавких элементов [26]. Ликвация легирующих элементов может оказать негативное влияние не только на стойкость материала к ползучести, но и на все прочностные и пластические свойства, поэтому для выравнивания химического состава сплавы с повышенным содержанием тугоплавких легирующих элементов подвергают высокотемпературной гомогенизации, причем с увеличением содержания тугоплавких элементов увеличиваются температурно-временные параметры термической обработки.

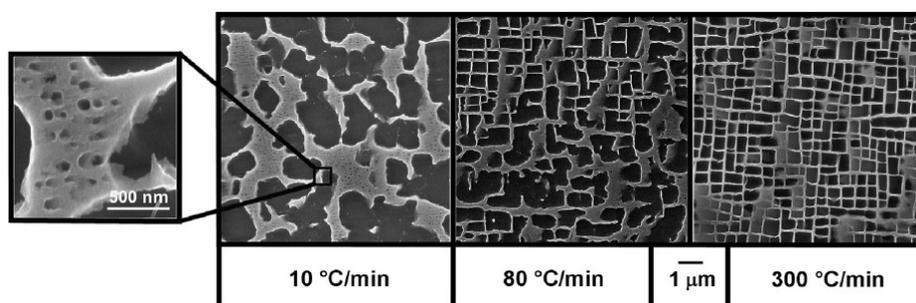
Другим фактором, оказывающим негативное влияние на стойкость никелевых сплавов (как с поликристаллической, так и с монокристаллической структурой) к ползучести, являются вредные примеси, в первую очередь сера и фосфор. Рафинирование никелевых сплавов в процессе выплавки позволяет понизить скорость накопления деформации ползучести — так, при уменьшении концентрации серы с 0,0072 до 0,0007 % (масс.) в монокристаллическом сплаве ЖС36-ВИ время до разрушения при испытании на ползучесть увеличилось вдвое [27].

Известно, что при длительном нагружении деталей из литейных жаропрочных никелевых сплавов в условиях повышенных температур (выше  $0,6 T_n$ ) происходит формирование рафт-структуры, представляющей собой вытянутые пластины или стержни  $\gamma'$  фазы, образующиеся из кубоидов этой же фазы. Различают два типа рафт-структур в зависимости от направления образованных пластин: структура *n*-типа, с ориентированными перпендикулярно направлению нагружения пластинами и стержнями и структура *p*-типа, в которой структурные элементы ориентированы параллельно прикладываемому напряжению. Формирование того или иного типа структуры происходит в зависимости от значения мисфита и знака прикладываемого напряжения [28]. По данным [29], структура *n*-типа является нежелательной, тогда как образцы с рафт-структурой *p*-типа демонстрируют сопротивление ползучести выше, чем у образцов с исходной кубической структурой. Таким образом, регулированием мисфита можно добиться получения выгодной рафт-структуры, что позволит повысить сопротивление ползучести. Однако стоит иметь в виду, что в процессе ползучести происходит неравномерное увеличение параметров решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз, из-за чего возрастает несоответствие между решетками этих фаз [30].

В отливках из никелевых жаропрочных сплавов как с поликристаллической, так и с монокристаллической структурой присутствуют микропоры, которые в процессе эксплуатации начинают расти, что ускоряет процесс деформации [31]. У заготовок, полученных перспективным методом — селективным ла-

зерным сплавлением, — в микроструктуре присутствует значительное количество несплошностей, поэтому для таких материалов вопрос «залечивания» пор еще более актуален, чем для заготовок, получаемых традиционными способами [32]. Метод горячего изостатического прессования (ГИП) позволяет эффективно «залечивать» микропоры и микротрещины [33], благодаря чему возрастает стабильность структуры. Особенно заметно положительное влияние ГИП на стойкость к ползучести материалов, полученных селективным лазерным сплавлением и методом равноосного литья [32, 34, 35], тогда как в работе [36] по исследованию влияния горячего изостатического прессования на стойкость монокристаллического сплава ВЖМ4 к высокотемпературной ползучести, полученные результаты показывают отсутствие влияния ГИП на ползучесть при высокой температуре (1150 °С). Аналогичные результаты были получены иностранными коллегами для монокристаллического сплава CMSX-4.

Для сплавов с поликристаллической структурой, легированных карбидообразующими элементами, значительную роль играет термическая обработка, направленная на выделение карбидов оптимального размера по границам зерен [37]. Как показано в работе [38] на примере сплава АМ3, помимо режима нагрева и выдержки важную роль играет скорость охлаждения: с увеличением скорости охлаждения растет сопротивление ползучести, за счет выделения  $\gamma'$ -фазы кубоидной формы (рис. 5).



**Рис. 5.** Изменение микроструктуры сплава АМ3 в зависимости от скорости охлаждения после термической обработки [38]

Сотрудниками ФГУП «ВИАМ» разработаны жаропрочные сплавы с поликристаллической и монокристаллической структурой серий ЖС, ВЖЛ, ВЖМ, в которых реализованы перечисленные механизмы стабилизации структуры, в том числе легирование рением и рутением. Проводятся исследовательские работы по оптимизации технологических параметров отливки и термической обработки полуфабрикатов из упомянутых сплавов. Отметим, что для изготовления оснастки испытательных машин для высокотемпературных испытаний во ФГУП «ВИАМ» разработан и запатентован экономно легированный жаропрочный никелевый сплав [39], обладающий значительным сопротивлением высокотемпературной ползучести. В качестве альтернативы высоколегированным жаропрочным сплавам ФГУП «ВИАМ» предлагает сплавы на интерметаллидной

основе серий ВКНА и ВИН, отличающиеся малым количеством легирующих элементов, более высокой рабочей температурой и низкой плотностью по сравнению с традиционными сплавами [40, 41]. Совокупность характеристик сплавов на интерметаллидной основе делает перспективным их использование как в качестве материала для высокотемпературных деталей ГТД, так и в качестве материала оснастки. В Испытательном центре ФГУП «ВИАМ» в настоящее время применяются захваты из интерметаллидного сплава ВКНА-1ВР с равноосной структурой, обладающего более высокой рабочей температурой, чем классический жаропрочный сплав ЖС6У, широко используемый в том числе и для изготовления оснастки [42].

**Выводы.** Несмотря на то что стойкость к ползучести выше у сплавов с монокристаллической структурой, значительная часть исследований направлена на создание и усовершенствование сплавов с поликристаллической структурой, что объясняется меньшей трудоемкостью технологии получения отливок с равноосной структурой. Основными направлениями развития поликристаллических сплавов является легирование карбидообразующими элементами, применение баротермической обработки и усовершенствование режимов термической обработки.

Как для сплавов с поликристаллической структурой, так и для монокристаллов наблюдается тенденция к снижению количества дефицитных легирующих элементов в составе. Особый интерес представляет работа, направленная на изучение потенциала безрениевого сплава, комплексно легированного вольфрамом и титаном.

С точки зрения термической и баротермической обработки отмечается роль ГИП для сплавов с поликристаллической структурой, а также для сплавов, полученных методами селективного лазерного сплавления, тогда как для сплавов с монокристаллической структурой ГИП не дает значительных результатов с точки зрения стойкости к ползучести.

## Литература

- [1] Каблов Е.Н. Тенденции и ориентиры инновационного развития России. М., ВИАМ, 2015.
- [2] Каблов Е.Н. Основные итоги и направления развития материалов для перспективной авиационной техники. *Авиационные материалы. 75 лет. Избранные труды.* М., ВИАМ, 2007, с. 20–26.
- [3] Герасимов В.В. От монокристаллических неохлаждаемых лопаток к лопаткам турбин с проникающим (транспирационным) охлаждением, изготовленным по аддитивным технологиям (обзор по технологии литья монокристаллических лопаток ГТД). *Труды ВИАМ*, 2016, № 10. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-1-1 URL: [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=1014](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1014)
- [4] Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций. *Крылья Родины*, 2016, № 5, с. 8–18.
- [5] Луценко А.Н., Славин А.В., Ерасов В.С. и др. Прочностные испытания и исследования авиационных материалов. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № S, с. 527–546.

- [6] Каблов Е.Н., Толорайя В.Н., Демонис И.М. и др. Направленная кристаллизация жаропрочных никелевых сплавов. *Технология легких сплавов*, 2007, № 2, с. 60–70.
- [7] Кузнецов В.П., Лесников В.П., Попов Н.А. Структура и свойства монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов. Екатеринбург, УрФУ, 2016.
- [8] Strondl A., Milenkovic S., Schneider A., et al. Effect of processing on microstructure and physical properties of three nickel-based superalloys with different hardening mechanisms. *Adv. Eng. Mater.*, 2012, vol. 14, no. 7, pp. 427–438. DOI: 10.1002/adem.201100349 URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adem.201100349>
- [9] Walter J.L., Harvey E.C. Structures and properties of cobalt-base tantalum carbide eutectic alloys. *MT*, 1973, vol. 4, no. 8, pp. 1775–1784. DOI: 10.1007/BF02665403 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02665403>
- [10] Berthod P., Aranda L., Vebert C., et al. Experimental and thermodynamic study of the high temperature microstructure of tantalum containing nickel-based alloys. *Calphad*, 2004, vol. 28, no. 2, pp. 159–166. DOI: 10.1016/j.calphad.2004.07.005 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0364591604000586>
- [11] Sun W., Qin X., Guo J., et al. Thermal stability of primary MC carbide and its influence on the performance of cast Ni-base superalloys. *Mater. Des.*, 2015, no. 69, pp. 81–88. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.12.038 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026130691401022X>
- [12] Berthod P., Conrath E. Creep and oxidation kinetics at 1100°C of nickel-base alloys reinforced by hafnium carbides. *Mater. Des.*, 2016, vol. 104, pp. 27–36. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.04.079 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127516305597>
- [13] Smith T.M., Esser B.D., Antolin N., et al. Segregation and  $\eta$  phase formation along stacking faults during creep at intermediate temperatures in a Ni-based superalloy. *Acta Mater.*, 2015, vol. 100, pp. 19–31. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.08.053 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359645415006308>
- [14] Smith T.M., Rao Y., Wang Y., et al. Diffusion processes during creep at intermediate temperatures in a Ni-based superalloy. *Acta Mater.*, 2017, no. 141, pp. 261–272. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.09.027 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359645417307607>
- [15] Tian S., Zhang B., Delong S., et al. Creep properties and deformation mechanism of the containing 4.5Re/3.0Ru single crystal nickel-based superalloy at high temperatures. *Mater. Sci. Eng. A*, 2015, no. 643, pp. 119–126. DOI: 10.1016/j.msea.2015.06.091 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509315301453>
- [16] Tian S., Zhu B., Wu J., et al. Influence of temperature on stacking fault energy and creep mechanism of a single crystal nickel-based superalloy. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2016, vol. 32, no. 8, pp. 790–798. DOI: 10.1016/j.jmst.2016.01.020 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1005030216300512>
- [17] Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Елютин Е.С. Рений в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах для лопаток газотурбинных двигателей. *Авиационные материалы и технологии*, 2014, № 5, с. 5–16.
- [18] Giamei A.F., Anton D.L. Rhenium additions to a Ni-base superalloy: effects on microstructure. *MTA*, 1985, vol. 16, no. 11, pp. 1997–2005. DOI: 10.1007/BF02662400 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02662400>
- [19] Huang M., Cheng Zh., Xiong J., et al. Coupling between Re segregation and  $\gamma/\gamma'$  interfacial dislocations during high-temperature, low-stress creep of a nickel-based single-crystal superal-

- loy. *Acta Materialia*, 2014, vol. 76, pp. 294–305. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.05.033  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359645414003814>
- [20] Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы, легированные рутением. *Авиационные материалы и технологии*, 2004, № 1, с. 80–90.
- [21] Karunaratne M.S.A., Carter P., Reed R.C. Interdiffusion in the face-centred cubic phase of the Ni–Re, Ni–Ta and Ni–W systems between 900 and 1300 C. *Mater. Sci. Eng. A*, 2000, vol. 281, no. 1-2, pp. 229–233. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00705-4  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509399007054>
- [22] Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Луцкая С.А. Методы повышения коррозионной стойкости жаропрочных никелевых сплавов (обзор). *Труды ВИАМ*, 2018, № 4.  
DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-3-8 URL: [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=1235](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1235)
- [23] Pröbstle M., Neumeier S., Feldner P., et al. Improved creep strength of nickel-base superalloys by optimized  $\gamma/\gamma'$  partitioning behavior of solid solution strengthening elements. *Mater. Sci. Eng. A*, 2016, no. 676, pp. 411–420. DOI: 10.1016/j.msea.2016.08.121  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509316310565>
- [24] Shimabayashi Sh., Kakehi K. Effect of ruthenium on compressive creep of Ni-based single-crystal superalloy. *Scripta Materialia*, 2010, vol. 63, no. 9, pp. 909–912.  
DOI: 10.1016/j.scriptamat.2010.06.048  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646210004562>
- [25] Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Елютин Е.С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, № S2, с. 38–52.
- [26] Guo J.T., Sheng L.Y., Xie Y., et al. Microstructure and mechanical properties of Ni<sub>3</sub>Al and Ni<sub>3</sub>Al-1B base alloys fabricated by SHS/HE. *Intermetallics*, 2011, vol. 19, no. 2, pp. 137–142.  
DOI: 10.1016/j.intermet.2010.08.027  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966979510003663>
- [27] Каблов Д.Е., Сидоров В.В., Мин П.Г. и др. Влияние примесей серы и фосфора на свойства монокристаллов жаропрочного сплава ЖС36-ВИ и разработка эффективных способов его рафинирования. *Авиационные материалы и технологии*, 2015, № 3, с. 3–9.
- [28] Епишин А.Е., Светлов И.Л., Вруескнер У. и др. Высокотемпературная ползучесть монокристаллов никелевых жаропрочных сплавов с ориентацией [001]. *Материаловедение*, 1999, № 5, с. 32–42.
- [29] Giraud R., Hervier Z., Cormier J., et al. Effect of the prior microstructure degradation on the high temperature/low stress non-isothermal creep behavior of cmsx-4® Ni-based single crystal superalloy. *Superalloys*, 2012, pp. 265–274. DOI: 10.1002/9781118516430.ch29  
URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118516430.ch29>
- [30] Tian S., Zhang B., Yu H., et al. Microstructure evolution and creep behaviors of a directionally solidified nickel-base alloy under long-life service condition. *Mater. Sci. Eng. A*, 2016, vol. 673, pp. 391–399. DOI: 10.1016/j.msea.2016.07.041  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509316307936>
- [31] Buck H., Wollgramm P., Parsa A.B., et al. A quantitative metallographic assessment of the evolution of porosity during processing and creep in single crystal superalloys. *Materwiss. Werksttech.*, 2015, vol. 46, no. 6, pp. 577–590. DOI: 10.1002/mawe.201500379  
URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mawe.201500379>
- [32] Kaplanskiia Yu.Yu., Zaitseva A.A., Levashova E.A., et al. NiAl based alloy produced by HIP and SLM of pre-alloyed spherical powders. Evolution of the structure and mechanical behavior at high temperatures. *Mater. Sci. Eng. A*, 2018, vol. 717, pp. 48–59.

- DOI: 10.1016/j.msea.2018.01.057  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509318300753>
- [33] Stevens R.A., Flewitt P.E.J. Hot isostatic pressing to remove porosity & creep damage. *Mater. Des.*, 1982, vol. 3, no. 3, pp. 461–469. DOI: 10.1016/0261-3069(82)90112-1  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0261306982901121>
- [34] Qiu C., Wu X., Mei J., et al. Influence of heat treatment on microstructure and tensile behavior of a hot isostatically pressed nickel-based superalloy. *J. Alloys Compd.*, 2013, no. 578, pp. 454–464. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.06.045  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838813014436>
- [35] Zhou Y., Zhang Z., Zhao Z.H., et al. Effects of HIP temperature on the microstructural evolution and property restoration of a Ni-based superalloy. *J. Mater. Eng. Perform.*, 2013, vol. 22, no. 1, pp. 215–222. DOI: 10.1007/s11665-012-0246-8  
URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-012-0246-8>
- [36] Светлов И.Л., Хвацкий К.К., Горбовец М.А. и др. Влияние горячего изостатического прессования на механические свойства литейных никелевых жаропрочных сплавов. *Авиационные материалы и технологии*, 2015, № 3, с. 10–14.
- [37] Chomette S., Gentzmittel J.M., Viguier B. Creep behaviour of as received, aged and cold worked INCONEL 617 at 850 °C and 950 °C. *J. Nucl. Mater.*, 2010, no. 399, no. 2-3, pp. 266–274. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2010.01.019  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311510000334>
- [38] Steuer S., Hervier Z., Thabart S., et al. Creep behavior under isothermal and non-isothermal conditions of AM3 single crystal superalloy for different solutioning cooling rates. *Mater. Sci. Eng. A*, 2014, no. 601, pp. 145–152. DOI: 10.1016/j.msea.2014.02.046  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509314001981>
- [39] Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Базылева О.А. и др. Сплав на основе никеля и изделие, выполненное из него. Патент 2215054 РФ. Заявл. 03.06.2002, опубл. 27.10.2003.
- [40] Аргинбаева Э.Г., Базылева О.А., Оспенникова О.Г. и др. Интерметаллидные никелевые сплавы для авиационных газотурбинных двигателей. *Вестник РФФИ*, 2017, № 4(96), с. 107–114.
- [41] Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотемпературных деталей газотурбинных двигателей. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2011, № S2, с. 13–19.
- [42] Базылева О.А., Оспенникова О.Г., Аргинбаева Э.Г. и др. Тенденции развития интерметаллидных сплавов на основе никеля. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № S, с. 104–115.

**Аргинбаева Эльвира Гайсаевна** — кандидат технических наук, начальник сектора лаборатории «Жаропрочные сплавы на никелевой основе», ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва, Российская Федерация.

**Луцкая София Алексеевна** — техник сектора лаборатории, «Жаропрочные сплавы на никелевой основе», ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Базылева Ольга Анатольевна, кандидат технических наук, заместитель начальника лаборатории «Жаропрочные сплавы на никелевой основе» по науке, ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ, Москва, Российская Федерация.

---

## Methods To Improve The Resistance Of Nickel Heat-Resisting Alloys To High-Temperature Creep

E.G. Arginbaeva

elargin@mail.ru

SPIN-code: 4728-4138

S.A. Lutsкая

solutsкая@gmail.com

SPIN-code: 1832-8547

Federal State Unitary Enterprise all-Russian Scientific Research, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

*A review of the scientific publications of foreign and domestic researchers on the problem of high-temperature creep of nickel-based foundry heat-resisting alloys has been performed. Information is given on the mechanisms of high-temperature creep for alloys with a monocrystal and polycrystalline structure. The main methods for improving the structural stability of nickel alloys by refining, doping, gas-static pressing and heat treatment are considered, and data are presented on the effect of the cooling rate on the creep resistance of alloys. Promising areas of research by Federal State Unitary Enterprise all-Russian Scientific Research State Research Center Of The Russian Federation to increase the resistance of foundry heat-resistant nickel alloys to high-temperature creep are indicated.*

### Keywords

*Creep, nickel heat-resisting alloy, monocrystal, misfit, raft structure, rhenium, heat treatment, hot iso-static pressing*

Received 08.04.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

---

### References

- [1] Kablov E.N. Tendentsii i orientiry innovatsionnogo razvitiya Rossii [Tendencies and benchmarks of Russian innovation development]. Moscow, VIAM Publ., 2015. (in Russ.).
- [2] Kablov E.N. Osnovnye itogi i napravleniya razvitiya materialov dlya perspektivnoy aviatsionnoy tekhniki [Major results and growth direction of materials for future aircraft technologies]. *Aviatsionnye materialy. 75 let. Izbrannye Trudy* [Aircraft materials. 75 years. Selectas]. Moscow, VIAM Publ., 2007, pp. 20–26 (in Russ.).
- [3] Gerasimov V.V. From single-crystal uncooled blades to turbines blades with penetration (transpiration) cooling made by additive technologies (review on technology of single-crystal GTE blades casting). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2016, no. 10. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-1-1 URL: [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=1014](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1014) (in Russ.).
- [4] Kablov E.N. What to made future of? Materials of new generation, their production and recycling technologies — basis of innovation. *Kryl'ya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18 (in Russ.).
- [5] Lutsenko A.N., Slavina A.V., Erasov V.S., et al. Strength tests and researches of aviation materials. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2017, no. S, pp. 527–546 (in Russ.).
- [6] Kablov E.N., Tolorayya V.N., Demonis I.M., et al. Directed crystallization of heat-resistant nickel-based alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2007, no. 2, pp. 60–70 (in Russ.).

- [7] Kuznetsov V.P., Lesnikov V.P., Popov N.A. *Struktura i svoystva monokristallicheskih zharoprochnykh nikelovykh splavov* [Structure and properties of monocrystal heat-resistant nickel-based alloys]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2016 (in Russ.).
- [8] Strondl A., Milenkovic S., Schneider A., et al. Effect of processing on microstructure and physical properties of three nickel-based superalloys with different hardening mechanisms. *Adv. Eng. Mater.*, 2012, vol. 14, no. 7, pp. 427–438. DOI: 10.1002/adem.201100349 URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adem.201100349>
- [9] Walter J.L., Harvey E.C. Structures and properties of cobalt-base tantalum carbide eutectic alloys. *MT*, 1973, vol. 4, no. 8, pp. 1775–1784. DOI: 10.1007/BF02665403 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02665403>
- [10] Berthod P., Aranda L., Vebert C., et al. Experimental and thermodynamic study of the high temperature microstructure of tantalum containing nickel-based alloys. *Calphad*, 2004, vol. 28, no. 2, pp. 159–166. DOI: 10.1016/j.calphad.2004.07.005 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0364591604000586>
- [11] Sun W., Qin X., Guo J. et al. Thermal stability of primary MC carbide and its influence on the performance of cast Ni-base superalloys. *Mater. Des.*, 2015, no. 69, pp. 81–88. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.12.038 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026130691401022X>
- [12] Berthod P., Conrath E. Creep and oxidation kinetics at 1100°C of nickel-base alloys reinforced by hafnium carbides. *Mater. Des.*, 2016, vol. 104, pp. 27–36. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.04.079 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127516305597>
- [13] Smith T.M., Esser B.D., Antolin N., et al. Segregation and  $\eta$  phase formation along stacking faults during creep at intermediate temperatures in a Ni-based superalloy. *Acta Mater.*, 2015, vol. 100, pp. 19–31. DOI: 10.1016/j.actamat.2015.08.053 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359645415006308>
- [14] Smith T.M., Rao Y., Wang Y., et al. Diffusion processes during creep at intermediate temperatures in a Ni-based superalloy. *Acta Mater.*, 2017, no. 141, pp. 261–272. DOI: 10.1016/j.actamat.2017.09.027 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359645417307607>
- [15] Tian S., Zhang B., Delong S., et al. Creep properties and deformation mechanism of the containing 4.5Re/3.0Ru single crystal nickel-based superalloy at high temperatures. *Mater. Sci. Eng. A*, 2015, no. 643, pp. 119–126. DOI: 10.1016/j.msea.2015.06.091 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509315301453>
- [16] Tian S., Zhu B., Wu J., et al. Influence of temperature on stacking fault energy and creep mechanism of a single crystal nickel-based superalloy. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2016, vol. 32, no. 8, pp. 790–798. DOI: 10.1016/j.jmst.2016.01.020 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1005030216300512>
- [17] Petrushin N.V., Ospennikova O.G., Elyutin E.S. Rhenium in single crystal nickel-based superalloys for gas turbine engine blades. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2014, no. 5, pp. 5–16 (in Russ.).
- [18] Giamei A.F., Anton D.L. Rhenium additions to a Ni-base superalloy: effects on microstructure. *MTA*, 1985, vol. 16, no. 11, pp. 1997–2005. DOI: 10.1007/BF02662400 URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02662400>
- [19] Huang Moscow, Cheng Zh., Xiong J., et al. Coupling between Re segregation and  $\gamma/\gamma'$  interfacial dislocations during high-temperature, low-stress creep of a nickel-based single-crystal superalloy. *Acta Materialia*, 2014, vol. 76, pp. 294–305. DOI: 10.1016/j.actamat.2014.05.033 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359645414003814>

- [20] Kablov E.N., Svetlov I.L., Petrushin N.V. Nickel-based heat-resistant alloys doped by rhenium. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2004, no. 1, pp. 80–90 (in Russ.).
- [21] Karunaratne M.S.A., Carter P., Reed R.C. Interdiffusion in the face-centred cubic phase of the Ni–Re, Ni–Ta and Ni–W systems between 900 and 1300 C. *Mater. Sci. Eng. A*, 2000, vol. 281, no. 1-2, pp. 229–233. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00705-4 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509399007054>
- [22] Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Lutskaya S.A. Ways of increasing corrosion resistance of superalloys (REVIEW). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2018, no. 4. URL: DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-3-8 URL: [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=1235](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1235) (in Russ.).
- [23] Pröbstle Moscow, Neumeier S., Feldner P., et al. Improved creep strength of nickel-base superalloys by optimized  $\gamma/\gamma'$  partitioning behavior of solid solution strengthening elements. *Mater. Sci. Eng. A*, 2016, no. 676, pp. 411–420. DOI: 10.1016/j.msea.2016.08.121 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509316310565>
- [24] Shimabayashi Sh., Kakehi K. Effect of ruthenium on compressive creep of Ni-based single-crystal superalloy. *Scripta Materialia*, 2010, vol. 63, no. 9, pp. 909–912. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2010.06.048 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646210004562>
- [25] Kablov E.N., Petrushin N.V., Elyutin E.S. Single-crystal heatproof alloys for gas-turbine engines. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2011, no. S2, pp. 38–52 (in Russ.).
- [26] Guo J.T., Sheng L.Y., Xie Y., et al. Microstructure and mechanical properties of Ni<sub>3</sub>Al and Ni<sub>3</sub>Al-1B base alloys fabricated by SHS/HE. *Intermetallics*, 2011, vol. 19, no. 2, pp. 137–142. DOI: 10.1016/j.intermet.2010.08.027 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0966979510003663>
- [27] Kablov D.E., Sidorov V.V., Min P.G., et al. The sulfur and phosphorus influence on properties of single crystals GHS36-VI superalloy and design of effective methods their refining. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2015, no. 3, pp. 3–9 (in Russ.).
- [28] Epishin A.E., Svetlov I.L., Brueckner U., et al. high-temperature creep of monocrystals of nickel-based heat-resistant alloys with [001] orientation. *Materialovedenie*, 1999, no. 5, pp. 32–42 (in Russ.).
- [29] Giraud R., Hervier Z., Cormier J., et al. Effect of the prior microstructure degradation on the high temperature/low stress non-isothermal creep behavior of cmsx-4® Ni-based single crystal superalloy. *Superalloys*, 2012, pp. 265–274. DOI: 10.1002/9781118516430.ch29 URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781118516430.ch29>
- [30] Tian S., Zhang B., Yu H., et al. Microstructure evolution and creep behaviors of a directionally solidified nickel-base alloy under long-life service condition. *Mater. Sci. Eng. A*, 2016, vol. 673, pp. 391–399. DOI: 10.1016/j.msea.2016.07.041 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509316307936>
- [31] Buck H., Wollgramm P., Parsa A.B., et al. A quantitative metallographic assessment of the evolution of porosity during processing and creep in single crystal superalloys. *Materwiss. Werksttech.*, 2015, vol. 46, no. 6, pp. 577–590. DOI: 10.1002/mawe.201500379 URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mawe.201500379>
- [32] Kaplanskiia Yu.Yu., Zaitseva A.A., Levashova E.A., et al. NiAl based alloy produced by HIP and SLM of pre-alloyed spherical powders. Evolution of the structure and mechanical behavior at high temperatures. *Mater. Sci. Eng. A*, 2018, vol. 717, pp. 48–59.

- DOI: 10.1016/j.msea.2018.01.057  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509318300753>
- [33] Stevens R.A., Flewitt P.E.J. Hot isostatic pressing to remove porosity & creep damage. *Mater. Des.*, 1982, vol. 3, no. 3, pp. 461–469. DOI: 10.1016/0261-3069(82)90112-1  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0261306982901121>
- [34] Qiu C., Wu X., Mei J., et al. Influence of heat treatment on microstructure and tensile behavior of a hot isostatically pressed nickel-based superalloy. *J. Alloys Compd.*, 2013, no. 578, pp. 454–464. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.06.045  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838813014436>
- [35] Zhou Y., Zhang Z., Zhao Z.H., et al. Effects of HIP temperature on the microstructural evolution and property restoration of a Ni-based superalloy. *J. Mater. Eng. Perform.*, 2013, vol. 22, no. 1, pp. 215–222. DOI: 10.1007/s11665-012-0246-8  
URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-012-0246-8>
- [36] Svetlov I.L., Khvatskiy K.K., Gorbovets M.A., et al. An effect of Hot Isostatic Pressing (HIP) on mechanical properties of casting Ni-based superalloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2015, no. 3, pp. 10–14 (in Russ.).
- [37] Chomette S., Gentzmittel J.M., Viguier B. Creep behaviour of as received, aged and cold worked INCONEL 617 at 850 °C and 950 °C. *J. Nucl. Mater.*, 2010, no. 399, no. 2-3, pp. 266–274. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2010.01.019  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311510000334>
- [38] Steuer S., Hervier Z., Thabart S., et al. Creep behavior under isothermal and non-isothermal conditions of AM3 single crystal superalloy for different solutioning cooling rates. *Mater. Sci. Eng. A*, 2014, no. 601, pp. 145–152. DOI: 10.1016/j.msea.2014.02.046  
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921509314001981>
- [39] Kablov E.N., Buntushkin V.P., Bazyleva O.A., et al. Splav na osnove nikelya i izdelie, vypolnennoe iz nego [Nickel-based alloy and product made of it]. Patent 2215054 RF. Appl. 03.06.2002, publ. 27.10.2003 (in Russ.).
- [40] Arginbaeva E.G., Bazyleva O.A., Ospennikova O.G., et al. Intermetallic nickel alloys for aircraft gas-turbine engines. *Vestnik RFFI*, 2017, no. 4(96), pp. 107–114 (in Russ.).
- [41] Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materials for parts of gas-turbine engines under high heat loads. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2011, no. S2, pp. 13–19 (in Russ.).
- [42] Bazyleva O.A., Ospennikova O.G., Arginbaeva E.G., et al. Development trends of nickel-based intermetallic alloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation materials and technologies], 2017, no. S, pp. 104–115 (in Russ.).

**Arginbaeva E.G.** — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Sector of the Laboratory of Heat-resistant Nickel-Based Alloys, Federal State Unitary Enterprise all-Russian Scientific Research State Research Center Of The Russian Federation, Moscow, Russian Federation.

**Lutskaya S.A.** — Technician of the Sector of the Laboratory of Heat-resistant Nickel-Based Alloys, Federal State Unitary Enterprise all-Russian Scientific Research State Research Center Of The Russian Federation, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Bazyleva O.A., Cand. Sc. (Eng.), Deputy Head for science of the Sector of the Laboratory of Heat-resistant Nickel-Based Alloys по науке, Federal State Unitary Enterprise all-Russian Scientific Research State Research Center Of The Russian Federation, Moscow, Russian Federation.