
Научная статья

УДК 669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-19-31

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАНУЛИРУЕМЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ПУТЕМ ИХ КОМПЛЕКСНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

М.С. Яшин¹, А.С. Шпагин¹, А.В. Востриков¹

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

Аннотация. Проанализировано влияние легирующих элементов на механические свойства гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов. Показано, что введение в состав сплавов таких легирующих элементов, как Al, Ti, W, Mo, Nb, Ta и Hf, способствует упрочнению материала. Легирование γ -образующими элементами (Co и Cr) приводит к повышению сопротивления ползучести при температуре до 750 °С и жаростойкости. Незначительное содержание таких микролегирующих элементов, как В и Zr, также положительно влияет на технологичность сплавов.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, гранулы, металлургия гранул, обработка давлением, деформация, горячее изостатическое прессование, легирование

Для цитирования: Яшин М.С., Шпагин А.С., Востриков А.В. Повышение механических характеристик гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов путем их комплексного легирования // Труды ВИАМ. 2026. № 6 (160). С. 19–31. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-19-31.

Scientific article

IMPROVEMENT OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF GRANULATED HEAT-RESISTANT NICKEL-BASED ALLOYS BY THEIR COMPLEX ALLOYING

M.S. Yashin¹, A.S. Shpagin¹, A.V. Vostrikov¹

¹Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

Abstract. This review analyzes the influence of alloying elements on the mechanical properties of granulated high-temperature nickel alloys. It is shown that the introduction of alloying elements such as Al, Ti, W, Mo, Nb, Ta, and Hf into the alloys contributes to material strengthening. Alloying with γ -forming elements such as Co and Cr leads to an increased creep resistance at temperatures up to 750 °C and heat resistance. A small content of microalloying elements such as B and Zr also has a positive effect on ductility.

Keywords: nickel-based heat-resistant alloy, granules, granule metallurgy, pressure treatment, deformation, hot isostatic pressing, alloying

For citation: Yashin M.S., Shpagin A.S., Vostrikov A.V. Improvement of the mechanical properties of granulated heat-resistant nickel-based alloys by their complex alloying. *Trudy VIAM*, 2026, no. 6 (160), pp. 19–31. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-6-19-31.

Введение

Начиная с 1970-х гг. ведутся разработки, направленные на повышение комплекса механических характеристик жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС), используемых при изготовлении дисков авиационных газотурбинных двигателей. Одно из приоритетных направлений исследований – повышение прочностных и жаропрочных характеристик во всем интервале рабочих температур [1–3].

С целью улучшения характеристик прочности и жаропрочности в состав сплавов вводят все большее количество различных легирующих элементов [4]. Однако при традиционном способе производства заготовок и деталей, заключающемся в отливке и горячей деформации получаемого слитка, имеются лишь ограниченные возможности легирования сплавов из-за усиления ликвационной неоднородности, огрубления структуры и появления различных дефектов. Следствием этих процессов являются резкое ухудшение деформируемости используемых слитков, многократное увеличение расхода металла и трудоемкости производства изделия.

Перечисленных недостатков удалось избежать с применением метода металлургии гранул. Этот метод включает несколько этапов. Вначале методом вакуумно-индукционной плавки осуществляется выплавка литых заготовок (электродов), из которых получают гранулы с помощью различных технологий, основанных на распылении расплавленного металла. Затем из этих гранул методом горячего изостатического прессования (ГИП) изготавливают полуфабрикат, который имеет плотную и беспористую структуру [5].

В настоящее время существуют несколько наиболее распространенных промышленных технологий изготовления полуфабрикатов из гранулируемых ЖНС. За рубежом, в частности в США, значительный объем производства дисков методом металлургии гранул осуществляют с помощью ГИП с последующей изотермической штамповкой либо с использованием технологии «гаторайзинг» (или газовой атомизации) (рис. 1). Основная суть технологий заключается в том, что гранулы получают распылением струи расплавленного в керамическом тигле индукционной печи жидкого металла потоком нейтрального газа (аргон, гелий и др.), после чего в вакууме их засыпают в капсулу, которую затем заваривают и обрабатывают методом ГИП. Далее обточенную заготовку подвергают экструзии на прессе, а полученный пруток нарезают на шайбы, из которых на прессах для изотермической штамповки получают в условиях сверхпластичности заготовки дисков [6].

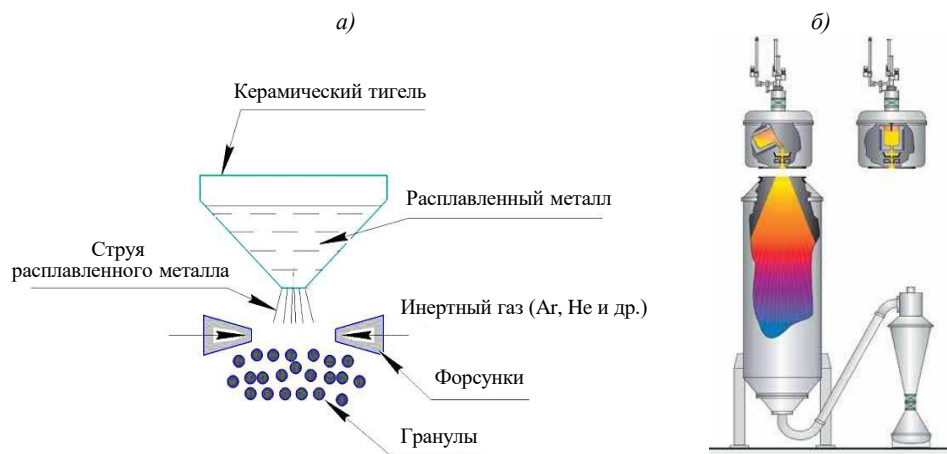


Рис. 1. Принципиальная схема процесса (а) и схема установки (б) для производства металлических гранул по технологии газовой атомизации

Несмотря на относительно низкую стоимость реализации метода газовой атомизации и его высокую производительность, получаемые гранулы по качеству заметно уступают отечественным гранулам, полученным методом плазменной плавки и центробежного распыления электродов (Plasma Rotating Electrode Process – PREP). Из-за особенностей распыления на поверхности таких гранул образуется сетка оксикарбонитридных включений, а сами гранулы могут содержать газовые поры. Поэтому для изготовления полуфабрикатов из гранул, полученных по зарубежным технологиям, необходимо осуществлять прессование заготовки с последующей пластической деформацией. Дополнительная обработка давлением обеспечивает более полную проработку структуры, что особенно важно для труднодеформируемых ЖНС. Методом ГИП с последующей изотермической штамповкой и гаторайзинга получают диски такие фирмы, как Ladish Co, Wyman-Gordon Co, Pratt and Whitney Aircraft, General Electric Co и др.

В отличие от зарубежных технологий, в отечественном двигателестроении широко применяется разработанный в начале 1970-х гг. технологический процесс, называемый as-HIP (as-Hot Isostatic Pressing – прямое ГИП) [7]. Эта технология производства полуфабрикатов из гранул ЖНС состоит из следующих операций: изготовление стальных капсул, геометрически подобных готовому изделию; выплавка слитков и последующее изготовление из них гранул методом PREP, сущность которого заключается в затвердевании расплава в виде микрослитков, т. е. получении гранул с высокой скоростью охлаждения (рис. 2); рассев, электростатическая сепарация; засыпка гранул в стальные капсулы в вакууме, дегазация и последующая герметизация капсул; компактирование капсул с гранулами методом ГИП (рис. 3); термическая и механическая обработка; контроль качества изделий.

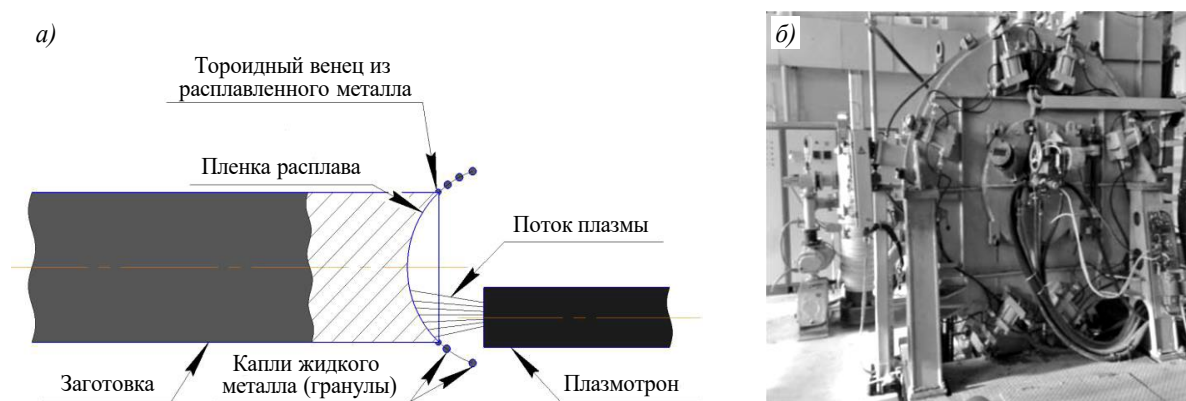


Рис. 2. Принципиальная схема процесса (а) и установка (б) плазменной плавки и центробежного распыления для производства гранул [8]

Такая технология позволяет осуществлять производство крупногабаритных полуфабрикатов из гранул сложнолегированных ЖНС методом прямого ГИП без дополнительной обработки давлением компактированной заготовки [9].

Отсутствие внутригранульной аргонной пористости (которая возможна при использовании метода газовой атомизации) при производстве гранул методом PREP позволяет проводить операции ГИП и закалки сплава при температурах, превышающих температуру полного растворения упрочняющей γ' -фазы (сольвус). Закалка сплава из однофазной области (γ) способствует образованию выделений упрочняющей γ' -фазы более мелкого размера, чем при закалке сплава из двухфазной области ($\gamma + \gamma'$) [10].

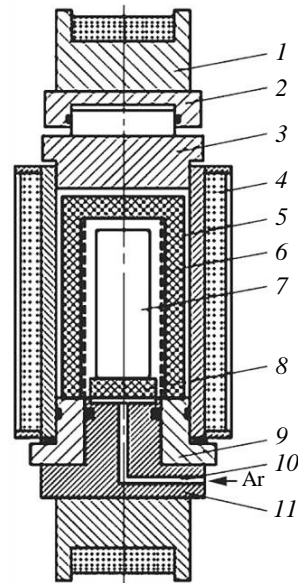


Рис. 3. Принципиальная схема установки горячего изостатического прессования [11]: 1 – рама; 2 – домкрат; 3 – верхняя пробка; 4 – контейнер; 5 – теплоизоляционный кожух; 6 – нагреватель; 7 – прессуемые капсулы с гранулами; 8 – теплоизоляционная подставка; 9 – нижняя промежуточная пробка; 10 – канал для закачки и откачки рабочей среды; 11 – нижняя пробка

При термообработке из двухфазной области может быть обеспечен меньший размер зерна, однако при этом в структуре могут присутствовать крупные частицы образовавшейся и нерастворившейся упрочняющей γ' -фазы, некогерентной с матрицей сплава (γ), которая практически не участвует в упрочнении материала [12].

В настоящее время за рубежом ЖНС используют фирмы Pratt and Whitney Aircraft, General Electric Co, MTU, Snecma, International Aerospace Ltd, Allied Signal и др. Из гранул получают как легкие (~1,4 кг) охлаждающие покрывные диски двигателя T700, так и тяжелые диски компрессора GE90 [13].

Для дисков компрессора и турбины силовых установок самолетов применяют сплавы Waspaloy, принятые в эксплуатацию в 1967–1978 гг., а также сплав Udimet (фирма Special Metals Corporation). Сплав Udimet и его модификации реализованы в двигателях BR700 (фирмы BMW, Rolls-Royce), AE2100, AE3007, T406, T800 (фирма Alisson), серии TRENT [14]. На Западе ведут активные исследования и разрабатывают новые сплавы, дополнительно легированные Ta (или совместно Ta, W, Re) в количестве 6–8 % (по массе) и предназначенные для работы при температурах ≥ 815 °C [15].

При производстве новых конструкционных материалов наблюдается динамика увеличения содержания и видового разнообразия тугоплавких элементов, которые приводят к снижению диффузионной подвижности атомов при работе в горячих средах [16]. Реализация данного направления позволяет увеличить термодинамическую устойчивость и высокотемпературную структурную стабильность сплавов.

Указанные факторы при выборе и оптимизации легирования имеют особое значение, хотя введение в сплавы таких элементов, как W, Ta, Re и др., приводит к повышению плотности и стоимости сплава [17].

Следует обратить внимание на важное направление работ, которые ведут за рубежом: обеспечение более высокого уровня механических свойств ранее созданных сплавов, широко используемых в эксплуатируемой технике. При этом как совершенствуют составы и технологии уже разработанных сплавов, так и создаются новые материалы на базе существующих, хорошо зарекомендовавших себя [18].

Цель работы – анализ влияния легирующих элементов на механические характеристики гранулируемых ЖНС.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Влияние легирующих элементов на свойства жаропрочных никелевых сплавов

Анализ химического состава и свойств отечественных и зарубежных гранулируемых ЖНС показывает, что их высокая работоспособность обеспечивается за счет возрастания не только доли γ' -образующих элементов, таких как Al и Ti, но и концентрации легирующих элементов, которые имеют высокую температуру плавления и низкие диффузионные характеристики, например W, Mo, Ta, Nb, Hf, Re, Co. В основном они входят в состав γ' -фазы (Nb, Ta, Hf) и γ -матрицы (Re, W, Mo, Co). При этом W и Mo в значительных количествах входят как в γ -, так и в γ' -фазу. В результате при легировании этими элементами в достаточных количествах обеспечиваются значительное упрочнение и структурная термостабильность, а также появляются возможности для достижения оптимальных значений параметров несоответствия кристаллических решеток γ - и γ' -фазы (мисфита) и достигается улучшение эксплуатационных характеристик сплавов [19].

Увеличение суммарных долей Al и Ti более необходимого уровня может привести не только к выделению нежелательной эвтектической γ' -фазы на основе $Ni_3(Al, Ti)$, но и к увеличению температуры полного растворения γ' -фазы (сольвус), что уменьшает область гомогенности сплава. Это ограничивает возможности последующей термообработки сплава [20].

Необходимо отметить, что для достижения оптимального уровня механических свойств дисковых ЖНС важным является не только суммарное содержание Al и Ti, но и отношение их долей. В работе [21] показано, что повышенные значения кратковременной прочности и предела текучести ЖНС обеспечиваются при отношении массовых долей $Ti/Al = 1$.

Титан, в отличие от алюминия, в большей степени способствует эффекту упрочнения, который проявляется с увеличением объемной доли упрочняющей γ' -фазы. Кроме того, он снижает скорость коагуляции γ' -частиц. Однако увеличение концентрации титана в ЖНС, содержащих большое количество Nb, приводит к формированию пластинчатых фазовых образований η (Ni_3Ti) и δ (Ni_3Nb, Ta), что уменьшает фазовую стабильность материала [22].

В работе [23] показано, что, во-первых, пластинчатая η -фаза (Ni_3Ti) начинает выделяться, когда отношение содержаний $Ti/Al > 1,45$; во-вторых, даже при наличии соотношения Ti/Al , близкого к 1, может возникнуть локальное выделение пластинчатых фаз η (Ni_3Ti) и δ (Ni_3Nb, Ta). В сплаве RR1000 (фирма Rolls-Royce) [24] отношение содержаний $Al/(Ti + Ta)$ составляет 0,60–0,75.

Установлено [25], что в некоторых зарубежных сверхпрочных никелевых сплавах пластинчатая η -фаза на основе Ni_3Ti появляется при увеличении концентрации титана, когда значения отношения содержаний Ti/Al превышают 2,8. Температура ее растворения выше, чем температура полного растворения упрочняющей γ' -фазы (сольвус). На основе данных результатов сделан вывод, что если в сплаве одновременно увеличить содержание титана и кобальта, но при этом снизить концентрацию хрома, то процесс образования топологически плотноупакованной (ТПУ) фазы (σ -фазы) замедляется, а вероятность появления η -фазы (Ni_3Ti) заметно снижается.

Кобальт и хром [23] обеспечивают значительную стойкость сплавов в условиях высокотемпературной газовой коррозии при температурах до 800 °С, повышают

работоспособность сплавов при воздействии сульфидных и других вредных соединений. Установлено, что хром и кобальт снижают температуру сольвус [22], что улучшает технологичность дисковых сплавов.

Вместе с тем, учитывая, что хром присутствует в основном в γ -фазе, при усложнении легирования, связанном с увеличением объемной доли упрочняющей γ' -фазы и, соответственно, относительным уменьшением объемной доли γ -матрицы, то же самое количество хрома может привести к заметному увеличению его концентрации в γ -фазе, что, в свою очередь, вызовет возможное образование нежелательных фаз на основе α -Cr, σ - и μ -фаз, карбидов типа $M_{23}C_6$ определенной нежелательной морфологии и др. и, как следствие, снижение механических характеристик сплавов [25].

Исследования системы легирования зарубежного сплава марки Alloy 10 показали [26], что при содержании хрома $>12,5\%$ (по массе) появляются игольчатые или пластинчатые выделения, типичные для ТПУ-фаз, а также пленки фазы α -Cr на границах зерен, что может снижать работоспособность сплава при температуре $760\text{ }^\circ\text{C}$.

Вольфрам и молибден положительно влияют на характеристики длительной прочности ЖНС. Вольфрам при содержании $2\text{--}4\%$ (по массе) входит в состав γ -матрицы (как упрочняющий элемент) и γ' -фазы. Снижение концентрации вольфрама $<2\%$ (по массе) приводит, с одной стороны, к уменьшению скорости роста усталостной трещины, а с другой – к повышению скорости ползучести [27].

Влияние молибдена на свойства сплава во многом схоже с воздействием вольфрама. Однако как твердорастворный упрочнитель молибден менее эффективен. При этом снижение его содержания $<3\%$ (по массе) приводит к существенному уменьшению сопротивления ползучести [27].

В патенте [28] показано, что одним из важных требований к химическому составу сплава Alloy 10 (фирма Honeywell) является обеспечение следующего отношения массовых долей элементов: $0,25 \leq Mo/W$ (или $Mo/(W + Re) \leq 0,50$). В более позднем патенте фирмы General Electric [29] для реально отобранной композиции сплава Me3 отношение содержаний $Mo/(Mo + W) = 0,51\text{--}0,56$. Преимуществом Mo и W является то, что они входят в состав как упрочняющей γ' -фазы (вольфрам – в большей степени), так и γ -твердого раствора. Таким образом, они упрочняют одновременно обе фазы, способствуя повышению термостабильности структуры и прочностных характеристик сплавов. Вольфрам по сравнению с молибденом оказывает большее упрочняющее влияние и с этой точки зрения более предпочтителен. Тем не менее молибден является желательным элементом в дисковых сплавах при содержании в пределах $2\text{--}6\%$ (по массе). Установлено, что сплавы, содержащие молибден в небольших количествах, более стойки к сульфидной коррозии по сравнению со сплавами, в которых молибден отсутствует [30]. В частности, при оптимизации состава дискового сплава RR1000 в качестве основного элемента – упрочнителя выбран молибден. Аналогичный подход реализован при создании сплава N18, в котором Mo присутствует в количестве $6,5\%$ (по массе), в то время как W в его составе отсутствует.

Ниобий является одним из желательных элементов при легировании ЖНС. Это γ' -образующий элемент, который входит в состав γ -твердого раствора и первичных карбидов типа MC. В работе [23] показано, что ниобий обладает более сильным упрочняющим эффектом по сравнению с титаном, однако его избыточное содержание отрицательно влияет на сопротивление развитию трещины и пластичность.

Гафний является сильным карбидообразующим элементом и упрочняет границы зерен. Как правило, при увеличении прочности уменьшается пластичность, и наоборот. Уникальность гафния состоит в том, что он повышает как прочность, так и пластичность ЖНС [30].

Установлен еще один важный аспект влияния гафния на структуру дисковых ЖНС, получаемых по технологии металлургии гранул. При консолидации гранул в процессе ГИП карбиды остаются на их поверхности, декорируя их границы и определяя отрицательную наследственность сплавов. Связано это с тем, что даже после происходящей в результате термообработки рекристаллизации границы гранул, на которых расположены карбиды, сохраняются. Карбиды заметно ослабляют материал и являются причиной его преждевременного разрушения при высокотемпературном нагружении. Введение определенного количества гафния в состав гранулируемых сплавов полностью решает проблему карбидных сеток на наследственных границах гранул, что, в свою очередь, способствует взаимному прорастанию зерен [31].

Цирконий при содержании 0,04–0,06 % (по массе) повышает пластичность сплавов, а также снижает скорость роста трещины. Цирконий присутствует в ЖНС в малых количествах (~0,05 % (по массе)). Зависимость пластичности от содержания циркония в пределах 0,005–0,05 % (по массе) сложная: максимальное значение показателя наблюдается при содержании циркония 0,01 % (по массе), при большем или меньшем его количестве показатель снижается. При одновременном легировании цирконием и бором наблюдается увеличение в несколько раз времени до разрушения образцов при испытании на ползучесть [32].

Наличие углерода ограничивает увеличение размера зерна при термообработке. Углерод образует карбиды, которые вносят дополнительный вклад в упрочнение сплава. Они эффективно тормозят диффузионные процессы по границам зерен, выделяясь в виде разрозненных включений типа $M_{23}C_6$ или M_6C . Поэтому углерод специально добавляют во все ЖНС, используемые для изготовления дисков газотурбинных двигателей. Повышение содержания углерода >0,1 % (по массе) может вызвать увеличение скорости роста усталостной трещины [20].

Однако при разработке сплава ВВ752П получены положительные результаты при увеличении содержания углерода до 0,08–0,10 % (по массе) [33].

Увеличение содержания углерода и, соответственно, карбидов в сплаве обеспечило повышение прочности за счет дополнительного дисперсного карбидного упрочнения и предотвращения образования охрупчивающих ТПУ-фаз. Это объясняется тем, что при формировании карбидов типа $M_{23}C_6$ и M_6C из матрицы сплава уходят элементы Cr, W и Mo, которые активно участвуют в образовании охрупчивающих ТПУ-фаз типа σ или μ . С учетом этого суммарная концентрация указанных элементов в сплаве увеличена на 0,8 % (по массе) [34].

Бор – особый элемент в ЖНС. При введении в сплавы в незначительном количестве он образует бориды, располагающиеся на границах зерен, что ограничивает их рост. Кроме того, бор присутствует и на межфазных (γ/γ') границах, повышая их прочность и тем самым положительно влияя на сопротивление ползучести [34]. Увеличение содержания бора более определенного значения может приводить к образованию легкоплавких боридных фаз, а также к термической пористости. Кроме того, это способствует снижению сопротивления ползучести [35].

В современном зарубежном авиационном двигателестроении в качестве легирующего элемента часто используют тантал. Он входит в состав большинства новых ЖНС, разработанных для эксплуатации при высоких температурах. В работе [36] показано, что легирование танталом приводит к упрочнению и увеличению количества γ' -фазы. Кроме того, наличие Ta вызывает упрочнение γ -матрицы и материала (за счет образованных карбидов) [37].

Достижение удовлетворительных механических свойств современных гранулируемых ЖНС также зависит от структурных факторов. На механические свойства

вливают средний размер зерна, количество и дисперсность упрочняющей γ' -фазы, тип карбидной фазы и состояние границ зерен [38]. Четкое представление о воздействии каждого из перечисленных факторов отдельно и при их взаимном влиянии на показатели механических свойств позволяет правильно выбрать технологию и назначить требуемые технологические режимы.

Так, например, в работе [38] применительно к гранулируемому дисковому сплаву ВВ751П показано, что при проведении компактирования в двухфазной ($\gamma + \gamma'$)-области наблюдается дендритно-ориентированная структура, унаследованная от гранул. Такой материал имеет низкие пластические характеристики и проявляет чувствительность к надрезу, так как большинство границ зерен совпадает с границами гранул и наблюдается сильная разнотерность. При компактировании в однофазной γ -области формируется однородное зерно, полностью устраняется литая структура. При незначительном повышении температуры солидус в структуре наблюдается эвтектика (оплавление, материал становится хрупким).

Следовательно, как было сказано во введении, приближение температуры ГИП к температуре полного растворения упрочняющей γ' -фазы позволяет получить более мелкое зерно. Поэтому для увеличения прочности материала и его способности работать при высоких температурах необходимо проводить ГИП и закалку из однофазной области с нагревом до температуры, превышающей температуру сольвус на 5–20 °С. Данный режим позволяет получить мелкое однородное рекристаллизованное зерно, размер которого составляет ~ (20–35) мкм. Скорость охлаждения с температуры закалки ≥ 60 °С/мин в совокупности с двумя степенями старения приводит к равномерному распределению частиц упрочняющей γ' -фазы оптимального размера (0,20–0,35 мкм), что обеспечивает устойчивость к высоким температурам. Кроме того, это вызывает выделение мелких упрочняющих частиц γ' -фазы размером 0,05–0,08 мкм, которые приводят к упрочнению материала [39].

Выделения некогерентных крупных упрочняющих частиц γ' -фазы размером > 1 мкм, которые получаются при остывании из двухфазной области, вызывают ухудшение механических свойств, поскольку γ' -фаза не полностью участвует в упрочнении ЖНС. Максимального уровня механических свойств можно добиться, если осуществлять охлаждение из однофазной области, поскольку вся выделившаяся γ' -фаза участвует в упрочнении сплава. Охлаждение с температур солидус или выше ведет к образованию эвтектики [38].

Предел прочности при растяжении европейских сплавов Me3 (Rene 104), RR1000, Alloy 10, LSHR, FGH95, TMW-4 составляет 1650–1742 МПа. Китайский сплав FGH95 имеет $\sigma_b = 1742$ МПа при комнатной температуре и $\sigma_{0,2} = 1469$ МПа [7].

Отечественные сплавы по уровню свойств соответствуют зарубежным аналогам. Так, величина длительной прочности при температуре 650 °С может достигать 1140 МПа [40], в то время как значения этого показателя для зарубежных сплавов LSHR и Me3 составляют 1115 и 1156 МПа соответственно [7].

Российские сплавы имеют преимущество перед зарубежными при работе при более высоких температурах (≥ 750 °С) [7]. Так, длительная прочность при температуре 750 °С отечественного сплава ВВ750П достигает 750 МПа, в то время как для зарубежных сплавов третьего поколения (Me3, Alloy 10 и др.) этот показатель составляет ~680 МПа [5].

Особое внимание следует обратить на сплав типа ВЖ178П, разработанный в НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ. Он в наибольшей степени легирован тугоплавкими элементами, обеспечивающими высокий уровень работоспособности при температурах до 750 °С [41]. Это делает его весьма перспективным для современного двигателестроения.

Заключения

Рассмотрено влияние различных легирующих элементов на свойства гранулируемых ЖНС. Например, легирование Al и Ti способствует упрочнению и структурной термостабильности сплава. Однако для предотвращения снижения уровня свойств суммарное содержание Al и Ti не должно превышать предельного значения.

Значительную стойкость ЖНС при высоких температурах и в агрессивных средах обеспечивают Co и Cr. Однако содержание хрома не должно превышать 12,5 % (по массе), иначе это приведет к снижению работоспособности сплава при повышенной температуре. Вольфрам и молибден способствуют упрочнению сплава. Молибден является менее эффективным легирующим элементом с точки зрения прочности.

Легирование ниобием вызывает более сильное упрочнение сплава по сравнению с титаном, однако его избыточное содержание отрицательно влияет на сопротивление развитию трещины и пластичность. Добавление гафния приводит к упрочнению границ зерен. В то же время гафний повышает пластичность ЖНС.

Низкое содержание циркония (~0,05 % (по массе)) приводит к повышению пластичности и снижению скорости роста трещин. При содержании углерода <0,1 % (по массе) тормозятся диффузионные потоки на границах зерен и происходит упрочнение ЖНС. Однако повышенное содержание углерода может приводить к увеличению скорости роста трещин.

Бор в незначительных количествах в ЖНС ограничивает рост зерен и повышает сопротивление ползучести. В современных сплавах широкое распространение получило легирование танталом, которое приводит к упрочнению материала.

Кроме легирующих элементов, на свойства сплавов влияют структурные факторы. Получение мелкого однородного зерна позволяет повысить прочность и жаростойкость. Равномерное распределение мелких частиц γ' -фазы также обеспечивает высокий уровень прочности.

Использование легирующих элементов и формирование равномерной мелкозернистой структуры позволяют изготавливать полуфабрикаты из ЖНС с высокими механическими характеристиками.

Список источников

1. Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А., Колодяжный М.Ю., Сурова В.А. Обзор перспективных высокотемпературных жаропрочных сплавов на основе тугоплавких металлических материалов для производства газотурбинных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). С. 30–41. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
2. Мин П.Г., Вадеев В.Е. Разработка и внедрение в серийное производство нового жаропрочного никелевого сплава ВЖЛ125 для лопаток перспективных авиационных двигателей // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). С. 3–16. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-3-16.
3. Колядов Е.В., Висик Е.М., Герасимов В.В., Битюцкая О.Н. Особенности морфологии структуры жаропрочного никелевого сплава в зависимости от величин осевого и радиального градиентов температуры на фронте кристаллизации // *Авиационные материалы и технологии*. 2024. № 2 (75). С. 15–24. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
4. Нарский А.Р., Дейнега Г.И., Кузьмина И.Г. Получение мелкозернистой структуры отливок из жаропрочных никелевых сплавов при использовании модификатора – алюмината кобальта // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 3 (72). С. 3–14. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 13.10.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.
5. Гарибов Г.С. Перспективы развития отечественных дисковых гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов для новых образцов авиационной техники // *Технология легких сплавов*. 2017. № 1. С. 7–18.

6. Гарибов Г.С. Современный уровень развития порошковой металлургии жаропрочных никелевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2000. № 6. С. 58–69.
7. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Логунов А.В., Данилов Д.В. Перспективные материалы и технологии производства дисков турбин // *Технология легких сплавов*. 2013. № 4. С. 132–134.
8. Востриков А.В., Сухов Д.И. Производство гранул методом PREP для аддитивных технологий – текущий статус и перспективы развития // *Труды ВИАМ*. 2016. № 8 (44). С. 17–23. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.12.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-3-3.
9. Иноземцев А.А., Аношкин Н.Ф., Башкатов И.Г. и др. Применение дисков из гранул жаропрочных никелевых сплавов в серийных ГТД авиационной и наземной техники // *Перспективные технологии легких и специальных сплавов*. М.: Физматлит, 2006. С. 371–376.
10. Dreshfield R.L., Miner R.V. Effects of Thermally Induced Porosity on an as-HIP Powder Metallurgy Superalloy Effects of Thermally Induced Porosity on an as-HIP Powder Metallurgy Superalloy // *International Journal of Powder Metallurgy*. 1980. Vol. 12. P. 83–87.
11. Гарибов Г.С., Тлюстен Т.Ю. Газостаты ВИЛСа // *Заготовительные производства в машиностроении*. 2010. № 7. С. 28–32.
12. Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Волков А.М. др. Металловедческие аспекты производства заготовок дисков из гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов методом ГИП // *Технология легких сплавов*. 2014. № 3. С. 54–58.
13. Eisen W. PM Superalloys: past, present, and future. New jet engine designs and advanced engines may lead to the increased usage of improved PM superalloys in the future // *Materials World*. 1996. No. 4. P. 22–24.
14. Скибин В.А., Солонин В.И., Палкин В.А. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей. М.: ЦИАМ, 2004. 421 с.
15. Superalloy optimized for high-temperature performance in high-pressure turbine disks: pat. 6521175 USA; appl. 09.02.98; publ. 18.02.03.
16. Логунов А.В., Заводов С.А., Данилов Д.В. Разработка и исследование нового никелевого жаропрочного сплава для дисков газовых турбин // *Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева*. 2019. № 1 (48). С. 62–68.
17. Supersolvus processing for tantalum-containing nickel base superalloys: pat. 5662749 USA; appl. 07.06.95; publ. 02.09.97.
18. Cao W.D., Kennedy R.L. New developments in wrought 718-type superalloys // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2005. No. 1. P. 39–46.
19. Самойлов А.И., Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Рощина И.Н. Размерное несоответствие кристаллических решеток γ - и γ' -фаз в никелевых ренийсодержащих жаропрочных сплавах // *Авиационные материалы и технологии*. 2004. № 1. С. 48–57.
20. Хрящев И.И., Данилов Д.В., Логунов А.В. Разработка экономнолегированного никелевого жаропрочного сплава для рабочих лопаток газовых турбин // *Вестник Московского авиационного института*. 2019. № 2 (26). С. 205–208.
21. Reed R.C. *The Superalloys. Fundamentals and Applications*. Cambridge: University Press, 2006. 372 p.
22. Gayada J., Gabb T.P. Fatigue Behavior of a Third Generation PM Disk Superalloy. NASA-TM, 2008. 26 p.
23. Guedou J., Augustins-Lecallier I., Caron P. Development of a New Fatigue and Creep Resistant PM Nickel-Base Superalloy for Disk Applications // *Superalloys 2008*. Pennsylvania: TMS, 2008. P. 21–30.
24. Nickel base superalloy: pat. 7208116 USA; appl. 26.09.01; publ. 24.04.07.
25. Cu Y., Cui C., Harada H. et al. Development of Ni-Co-Base Alloys for High-Temperature Disk Applications // *Superalloys 2008*. Pennsylvania: TMS, 2008. P. 53–62.
26. Rice D., Kantzos P., Hann B. et al. P/M Alloy 10 – A 700°C Capable Nickel-Based Superalloy for Turbine Disk Applications // *Superalloys 2008*. Pennsylvania: TMS, 2008. P. 139–148.
27. Шеин Е.А. Тенденции в области легирования и микролегирования жаропрочных монокристаллических сплавов на основе никеля (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2016. № 3 (39). С. 10–22. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 13.10.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-2-2.

28. High strength powder metallurgy nickel base alloy: pat. 6468368 USA; appl. 20.03.00; publ. 22.10.02.
29. Nickel-base superalloys and components formed thereof: pat. 20100329876 USA; appl. 30.06.09; publ. 02.12.10.
30. Гарибов Г.С., Гриц Н.М. В.И. Добаткин и металлургия гранул жаропрочных никелевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2015. № 2. С. 34–39.
31. Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Востриков А.В., Федоренко Е.А. Создание нового высокопрочного сплава ВВ751П для перспективных газотурбинных двигателей // *Технология легких сплавов*. 2009. № 1. С. 34–39.
32. Береснев А.Г., Разумовский В.И., Лозовой А.Ю. и др. Развитие теории легирования для создания нового поколения жаропрочных никелевых сплавов, получаемых методами порошковой металлургии // *Технология легких сплавов*. 2012. № 2. С. 52–61.
33. Гарибов Г.С., Гриц Н.М., Востриков А.В., Федоренко Е.А. Разработка и исследование нового гранулируемого высокопрочного жаропрочного никелевого сплава ВВ752П для перспективных изделий авиационной техники // *Технология легких сплавов*. 2011. № 1. С. 7–11.
34. Елисеев Ю.С., Масленков С.Б., Гейкин В.А., Поклад В.А. Технология создания неразъемных соединений при производстве газотурбинных двигателей. М.: Наука и технологии, 2001. 544 с.
35. Бер Л.Б., Казберович А.М. Влияние легирования и некоторых структурных факторов на комплекс характеристик заготовок дисков из гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов ЭП741НП, ВВ750П, ВВ751П, ВВ752П и ВВ753П // *Технология легких сплавов*. 2019. № 3. С. 16–33.
36. Forde P.T. Tantalum in superalloys // *Advanced Materials and Processes*. 1996. No. 149 (4). P. 39–40.
37. Гарибов Г.С., Гриц Н.М. Пути создания новых высокожаропрочных гранулируемых сплавов для перспективных авиадвигателей // *Технология легких сплавов*. 2012. № 3. С. 35–43.
38. Гарибов Г.С., Востриков А.В., Гриц Н.М., Федоренко Е.А. Разработка новых гранулированных жаропрочных никелевых сплавов для производства дисков и валов авиационных двигателей // *Технология легких сплавов*. 2010. № 2. С. 34–43.
39. Способ получения изделия из сплава типа ВВ751П с высокой прочностью и жаропрочностью: пат. 2453398 Рос. Федерация; заявл. 14.06.11; опубл. 20.06.12.
40. Жаропрочный никелевый сплав: пат. 2697674 Рос. Федерация; заявл. 24.05.19; опубл. 16.08.19.
41. Волков А.М., Востриков А.В., Бакрадзе М.М. Разработка нового гранулируемого жаропрочного никелевого сплава ВЖ178П для перспективных авиационных ГТД // *Перспективные жаропрочные никелевые деформируемые сплавы и технологии их переработки: материалы Всеросс. науч.-техн. конф. М., 2018. С. 25–38.*

References

1. Echin A.B., Bondarenko Yu.A., Kolodyazhny M.Yu., Surova V.A. Review of perspective high-temperature superalloys based on refractory non-metallic materials for production of gas turbine engines. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), pp. 30–41. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 13, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
2. Min P.G., Vadeev V.E. The development and introduction into serial production of the new superalloy VZhL125 for the advanced aviation engines vanes. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), pp. 3–16. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 13, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-3-16.
3. Kolyadov E.V., Visik E.M., Gerasimov V.V., Bityutskaya O.N. Features of the morphology of the structure of nickel superalloy depending on the values of the axial and radial temperature gradients at the crystallization front. *Aviation materials and technologies*, 2024, no. 2 (75), pp. 15–24. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 13, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
4. Narsky A.R., Deynega G.I., Kuzmina I.G. Obtaining a fine-grained structure of castings from nickel superalloys using a cobalt aluminate modifier. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 3 (72), pp. 3–14. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: October 13, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.

5. Garibov G.S. Development Prospects of Domestic Disk Granulated Heat-Resistant Nickel Alloys for New Types of Aviation Equipment. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2017, no. 1, pp. 7–18.
6. Garibov G.S. Current Level of Development of Powder Metallurgy of Heat-Resistant Nickel Alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2000, no. 6, pp. 58–69.
7. Shmotin Yu.N., Starkov R.Yu., Logunov A.V., Danilov D.V. Advanced Materials and Manufacturing Technologies for Turbine Disks. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2013, no. 4, pp. 132–134.
8. Vostrikov A.V., Sukhov D.I. The production of powders by PREP method for additive manufacturing – current situation and development prospects. *Trudy VIAM*, 2016, no. 8, pp. 17–23. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-3-3.
9. Inozemtsev A.A., Anoshkin N.F., Bashkatov I.G. et al. Application of disks made of heat-resistant nickel alloy granules in serial gas turbine engines of aviation and ground equipment. *Advanced technologies of light and special alloys*. Moscow: Fizmatlit, 2006, pp. 371–376.
10. Dreshfield R.L., Miner R.V. Effects of Thermally Induced Porosity on an as-HIP Powder Metallurgy Superalloy. *International Journal of Powder Metallurgy*, 1980, vol. 12, pp. 83–87.
11. Garibov G.S., Tlyusten T.Yu. VILS gas stators. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroyenii*, 2010, no. 7, pp. 28–32.
12. Garibov G.S., Grits N.M., Volkov A.M. et al. Metallographic aspects of the production of disk blanks from granulated heat-resistant nickel alloys by the HIP method. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2014, no. 3, pp. 54–58.
13. Eisen W. PM Superalloys: past, present, and future. New jet engine designs and advanced engines may lead to the increased usage of improved PM superalloys in the future. *Materials World*, 1996, no. 4, pp. 22–24.
14. Skibin V.A., Solonin V.I., Palkin V.A. *Works of leading aircraft engine manufacturing companies on the creation of advanced aircraft engines*. Moscow: CIAM, 2004, 421 p.
15. *Superalloy optimized for high-temperature performance in high-pressure turbine disks*: pat. 6521175 USA; appl. 09.02.98; publ. 18.02.03.
16. Logunov A.V., Zavadov S.A., Danilov D.V. Development and study of a new nickel-based heat-resistant alloy for gas turbine disks. *Vestnik RGATA im. P.A. Soloveva*, 2019, no. 1 (48), pp. 62–68.
17. *Supersolvus processing for tantalum-containing nickel base superalloys*: pat. 5662749 USA; appl. 07.06.95; publ. 02.09.97.
18. Cao W.D., Kennedy R.L. New developments in wrought 718-type superalloys. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2005, no. 1, pp. 39–46.
19. Samoilov A.I., Kablov E.N., Petrushin N.V., Roshchina I.N. Dimensional mismatch of the crystal lattices of the γ - and γ' -phases in nickel-rhenium-containing heat-resistant alloys. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2004, no. 1, pp. 48–57.
20. Khryashchev I.I., Danilov D.V., Logunov A.V. Development of an economically alloyed nickel-based heat-resistant alloy for gas turbine blades. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2019, no. 2 (26), pp. 205–208.
21. Reed R.C. *The Superalloys. Fundamentals and Applications*. Cambridge: University Press, 2006, 372 p.
22. Gayada J., Gabb T.P. *Fatigue Behavior of a Third Generation PM Disk Superalloy*. NASA-TM, 2008, 26 p.
23. Guedou J., Augustins-Lecallier I., Caron P. Development of a New Fatigue and Creep Resistant PM Nickel-Base Superalloy for Disk Applications. *Superalloys 2008*. Pennsylvania: TMS, 2008, pp. 21–30.
24. *Nickel base superalloy*: pat. 7208116 USA; appl. 26.09.01; publ. 24.04.07.
25. Cu Y., Cui C., Harada H. et al. Development of Ni–Co-Base Alloys for High-Temperature Disk Applications. *Superalloys 2008*. Pennsylvania: TMS, 2008, pp. 53–62.
26. Rice D., Kantzos P., Hann B. et al. P/M Alloy 10 – A 700°C Capable Nickel-Based Superalloy for Turbine Disk Applications. *Superalloys 2008*. Pennsylvania: TMS, 2008, pp. 139–148.

27. Shein E.A. Tendencies in the field of alloying and microalloying of heat resisting single-crystal alloys on the basis of nickel (review). *Trudy VIAM*, 2016, no. 3, pp 10–22. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: October 13, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-3-2-2.
28. *High strength powder metallurgy nickel base alloy*: pat. 6468368 USA; appl. 20.03.00; publ. 22.10.02.
29. *Nickel-base superalloys and components formed thereof*: pat. 20100329876 USA; appl. 30.06.09; publ. 02.12.10.
30. Garibov G.S., Grits N.M. V.I. Dobatkin and metallurgy of granules of heat-resistant nickel alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2015, no. 2, pp. 34–39.
31. Garibov G.S., Grits N.M., Vostrikov A.V., Fedorenko E.A. Development of a new high-strength alloy VV751P for advanced gas turbine engines. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2009, no. 1, pp. 34–39.
32. Beresnev A.G., Razumovsky V.I., Lozovoy A.Yu. et al. Development of alloying theory for the creation of a new generation of heat-resistant nickel alloys obtained by powder metallurgy methods. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2012, no. 2, pp. 52–61.
33. Garibov G.S., Grits N.M., Vostrikov A.V., Fedorenko E.A. Development and study of a new granulated high-strength heat-resistant nickel alloy VV752P for promising aviation products. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2011, no. 1, pp. 7–11.
34. Eliseev Yu.S., Maslenkov S.B., Geikin V.A., Poklad V.A. *Technology of creating permanent joints in the production of gas turbine engines*. Moscow: Science and Technology, 2001, 544 p.
35. Ber L.B., Kazberovich A.M. The influence of alloying and some structural factors on the set of characteristics of disk blanks made of granulated heat-resistant nickel alloys EP741NP, VV750P, VV751P, VV752P and VV753P. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2019, no. 3, pp. 16–33.
36. Forde P.T. Tantalum in superalloys. *Advanced Materials and Processes*, 1996, no. 149 (4), pp. 39–40.
37. Garibov G.S., Grits N.M. Ways to Create New High-Heat-Resistant Granulated Alloys for Advanced Aircraft Engines. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2012, no. 3, pp. 35–43.
38. Garibov G.S., Vostrikov A.V., Grits N.M., Fedorenko E.A. Development of New Granulated Heat-Resistant Nickel Alloys for the Production of Aircraft Engine Disks and Shafts. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2010, no. 2, pp. 34–43.
39. *Method for Obtaining a Product from VV751P Alloy with High Strength and Heat Resistance*: pat. 2453398 Rus. Federation; appl. 14.06.11; опубли. 20.06.12.
40. *Heat-resistant nickel alloy*: pat. 2697674 Rus. Federation; appl. 24.05.19; опубли. 16.08.19.
41. Volkov A.M., Vostrikov A.V., Bakradze M.M. Development of a new granulated heat-resistant nickel alloy VZh178P for promising aircraft gas turbine engines. *Promising heat-resistant nickel deformable alloys and technologies for their processing*: Proc. All-Rus. sci. and tech. conf. Moscow, 2018, pp. 25–38.

Информация об авторах

Яшин Максим Сергеевич, ведущий инженер, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Шпагин Александр Сергеевич, заместитель начальника лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Востриков Алексей Владимирович, начальник Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Maksim S. Yashin, Leading Engineer, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksandr S. Shpagin, Deputy Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Aleksey V. Vostrikov, Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 28.01.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 03.03.2026.
The article was submitted 28.01.2026; approved and accepted for publication after reviewing 03.03.2026.