

Научная статья

УДК 669.018.44:669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-16-26

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ГРАНУЛ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДОМ ПЛАЗМЕННОЙ ПЛАВКИ И ЦЕНТРОБЕЖНОГО РАСПЫЛЕНИЯ ЛИТОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЗАГОТОВКИ

А.В. Востриков¹, М.С. Яшин¹, Д.В. Капитаненко¹

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

Аннотация. Проведен анализ современного состояния производства гранул жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) методом плазменной плавки с последующим центробежным распылением литой вращающейся заготовки (метод PREP). Показаны основные теоретические и практические особенности производства гранул ЖНС данным методом. На основе анализа ряда работ по аналогичному направлению сделаны соответствующие выкладки, позволяющие сформировать перечень требований, предъявляемых к производству гранул с применением метода PREP.

Ключевые слова: гранулы, жаропрочные никелевые сплавы, обработка давлением, горячее изостатическое прессование, газотурбинные двигатели, гранульная металлургия, плазменная плавка

For citation: Востриков А.В., Яшин М.С., Капитаненко Д.В. Особенности технологии производства деталей авиационных двигателей из гранул жаропрочных никелевых сплавов методом плазменной плавки и центробежного распыления литой вращающейся заготовки // Труды ВИАМ. 2025. № 10 (152). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-16-26.

Scientific article

PECULIARITIES OF THE TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF AIRCRAFT ENGINE PARTS FROM GRANULES OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS BY THE METHOD OF PLASMA MELTING AND CENTRIFUGAL SPRAYING OF A CAST ROTATING BLANK

A.V. Vostrikov¹, M.S. Yashin¹, D.V. Kapitanenko¹

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

Abstract. The review analyzes the current state of production of HNA (Heat-resistant nickel alloy) granules by the method of plasma melting and centrifugal spraying of a cast rotating blank (PREP method). The main theoretical and practical features of the production of HNA granules by this method are shown. Based on the analysis of a number of works in a similar direction, the corresponding calculations are made, allowing to form a list of requirements for the production of granules using the method of plasma melting and centrifugal spraying of a cast rotating blank.

Keywords: granules, heat-resistant nickel alloys, pressure treatment, hot isostatic pressing, gas turbine engines, granule metallurgy, plasma melting

For citation: Vostrikov A.V., Yashin M.S., Kapitanenko D.V., Peculiarities of the technology of production of aircraft engine parts from granules of heat-resistant nickel alloys by the method of plasma melting and centrifugal spraying of a cast rotating blank. *Trudy VIAM*, 2025, no. 10 (152), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-10-16-26.

Введение

Одно из главных направлений авиастроения – изучение и разработка новых материалов и технологий изготовления продукции из них. Все это определяет перспективы развития современной авиационной промышленности в России [1–10].

Как известно, одним из основных методов получения дисков турбин авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) является технология гранульной металлургии [11], которая заключается в изготовлении заготовок дисков методом прямого горячего изостатического прессования (ГИП) гранул жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) в монолитный материал. В свою очередь, основной технологической операцией в производстве дисков по технологии металлургии гранул является процесс производства гранул, а также требования, предъявляемые к данному процессу, соблюдение которых позволяет сформировать беспористый монолитный материал с высокими механическими свойствами.

Таким образом, для получения дисков и валов авиационных ГТД с высокими механическими свойствами методом металлургии гранул необходимо на каждом технологическом этапе их производства соблюдать определенные требования как по чистоте, так и по качеству всех взаимосвязанных процессов, входящих в технологическую цепочку производства продукции.

Цель данной работы – проведение анализа получения гранул ЖНС методом PREP (плазменная плавка с последующим центробежным распылением литой вращающейся заготовки), обоснование теоретического и практического аспектов их изготовления, а также формирование основных требований к процессу изготовления гранул для достижения необходимых механических свойств в изделиях, полученных этим методом. Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Производство гранул жаропрочных никелевых сплавов методом плазменной плавки с центробежным распылением

В середине XX в. в СССР сначала теоретически [12, 13], а затем и практически разработаны основные процессы производства гранул ЖНС методом плазменной плавки с центробежным распылением. При реализации метода металлургии гранул была получена высококачественная продукция, задействованная в технологической цепочке производства дисков и валов авиационных ГТД и реализованная с применением процесса ГИП.

В ряде работ, посвященных вопросу изготовления дисков ГТД с применением прямого ГИП, изложены основные принципы производства гранул методом PREP. На рис. 1, *а* показано устройство центробежного распыления (УЦР), в котором реализуют данный процесс в промышленных масштабах.

Принцип формирования гранул ЖНС методом PREP заключается в следующем (рис. 1, *б*): заготовке 1 с определенным размером диаметра d , полученной путем вакуумно-индукционной плавки, придают вращательное движение в камере распыления, заполненной смесью инертных газов. Поток плазмы 4, формирующийся под воздействием ионизации газа дугой плазматрона 3, оплавляет литую заготовку 1. В результате на поверхности торца заготовки образуется вогнутая полость 5 с тонкой расплавленной

пленкой, или так называемый «венец», представляющий собой тороид из жидкого металла *б*, вращающийся вместе с заготовкой. От него под воздействием центробежной силы отделяются частицы жидкого металла *7*, затвердевающие в полете, принимая сферическую форму и образуя гранулы [14, 15].

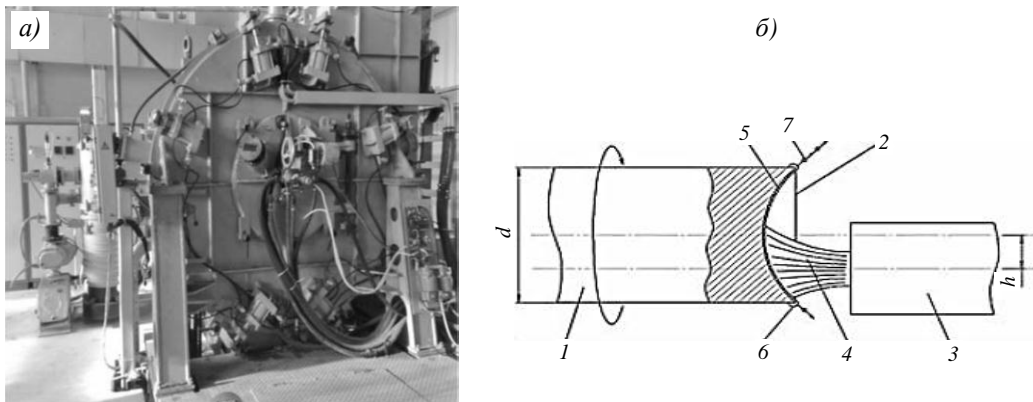


Рис. 1. Установка типа УЦР плазменной плавки с центробежным распылением литой вращающейся заготовки (метод PREP) для получения гранул жаропрочных никелевых сплавов (*а*) и схема формирования гранул (*б*): *1* – литая заготовка с диаметром *d*; *2* – торец заготовки; *3* – плазматрон с эксцентриситетом *h*; *4* – поток плазмы; *5* – пленка расплава; *6* – тороидный венец из расплавленного металла; *7* – капли жидкого металла (гранулы)

Основными особенностями и преимуществами данного метода перед другими возможными способами получения гранул являются практически идеальная сферическая форма получаемых гранул, минимальное содержание газовых примесей, отсутствие поверхностных и внутренних дефектов типа пор, а также обеспечение необходимого узкого интервала гранулометрического состава [16]. На рис. 2 представлены изображения гранул ЖНС, полученных методом PREP.

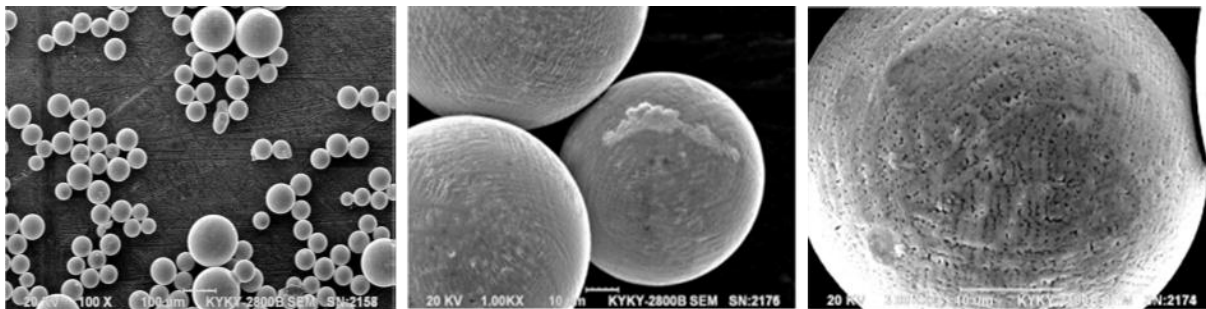


Рис. 2. Увеличенные изображения гранул жаропрочных никелевых сплавов, полученных методом плазменной плавки с центробежным распылением литой вращающейся заготовки

Видно, что структура гранул ЖНС, изготовленных данным методом, является дендритной с соответствующим дендритным параметром, изменяющимся в прямой корреляции от скорости охлаждения. Для более полного понимания процессов гранулирования следует сформулировать основной теоретический принцип, на основе которого строится практическая реализация данного процесса [12, 17, 18]: «Основной причиной измельчения дендритного параметра при гранулировании является возрастающее несоответствие скорости теплопереноса и скорости массопереноса, т. е. чем больше скорость охлаждения, тем больше степень переохлаждения расплава и тем большее

число имеющихся в расплаве частиц может стать центрами кристаллизации до того, как они будут захвачены растущими дендритами, в соответствии с этим у более мелких гранул размеры зерен (дендритного параметра) будут меньше, чем у более крупных». Данный принцип сформулирован в результате проведения целого комплекса работ по изучению процессов гранулирования.

Применительно к производству дисков ГТД методом металлургии гранул с использованием прямого ГИП имеется ряд важных теоретических положений касательно процесса получения гранул ЖНС, влияющих на весь цикл изготовления заготовок основных деталей ГТД. Эти положения, сформулированные в ряде работ [19–21], заключаются в следующем.

1. «Повышение скорости охлаждения во время кристаллизации гранул ЖНС при практически неизменных коэффициентах дендритной ликвации легирующих элементов приводит к диспергированию структурных составляющих (ветвей дендритов, карбидов и интерметаллидов), а размеры элементов структуры в гранулах, таких как дендритные ветви и карбиды, меняются в прямой зависимости от размера гранул».

Данное положение показывает, что при получении микрослитков (гранул определенного химического состава сплава) ЖНС и последующего их объединения в компактный материал можно достигнуть изотропии в структуре и свойствах конечного материала.

2. «При получении гранул ЖНС методом PREP имеет место переход первичных карбидов из литой заготовки в гранулы без значительного изменения их размеров».

На основе этого положения установлено требование к размеру заготовок, подвергаемых распылению. Их размеры не должны быть >90 мм, иначе, как было установлено, есть вероятность возникновения неравномерного распределения карбидов в итоговом материале, что приведет к анизотропии свойств.

3. «Гранулы сложнолегированных ЖНС являются метастабильными системами, в которых при нагреве происходит распад пересыщенного твердого раствора, что создает предпосылки для выделения карбидов по границам гранул и обуславливает необходимость регламентирования химического состава сплавов для образования карбидных сеток по границам гранул, а также требует разработки специальных режимов ГИП и термической обработки».

На основе последнего положения найдены подходы к разработке специальных химических составов гранулируемых сплавов, полученных с применением прямого ГИП.

Основная структурная проблема, которую необходимо решать при получении монолитного материала из гранул, – проявление границ исходных гранул при компактировании, препятствующих формированию полностью рекристаллизованной структуры. В работе [22] показано, что одной из причин таких структурных аномалий являлись частицы карбидов, которые, образуясь на поверхности гранул при их распылении, в дальнейшем препятствовали полной консолидации материала. С учетом этого, при разработке сплава ЭП741НП содержание карбидообразующих элементов увеличили в еще большей степени, массовую долю углерода снизили до 0,04 %, а принципиальным нововведением стала добавка гафния, образующего стабильные карбиды типа MeC. Данный комплекс мер позволил устранить карбидные сетки по границам исходных гранул в микроструктуре, а также гранулы в изломе образцов после их испытаний.

Для того чтобы обосновать практические аспекты изготовления гранул ЖНС методом плазменной плавки с центробежным распылением следует сформулировать главные критерии к физико-механическим и технологическим свойствам гранул, получаемых при помощи метода PREP. К ним относят:

- узкий гранулометрический состав, который позволяет судить о стабильности разработанного режима изготовления гранул методом PREP;
- сферичность изготовленных частиц, влияющая на текучесть гранул и отражающаяся в итоге на процессе их засыпки в специальные формообразующие стальные капсулы перед операцией компактирования (ГИП);
- дендритный параметр, который позволяет судить о скорости охлаждения гранул, а также о размерах структурных составляющих в них;
- пористость в гранулах, наличие которой негативно влияет на механические свойства в конечном материале.

В работе [17] проведены исследования по определению технологических характеристик гранул высокопрочного никелевого сплава и показаны основные методы их определения. Указано, что для определения фракционного состава, формы и дендритного параметра гранул используют метод ситового анализа или прямого счета с применением растрового электронного микроскопа.

Одним из наиболее важных параметров является наличие пор в гранулах. Последние практически нерастворимы в материале матрицы и, расширяясь при повышенных температурах [17, 23], являются источниками зарождения трещин и преждевременного разрушения материала из ЖНС. Для их определения обычно проводят исследования, направленные на определение пикнометрической плотности, а также металлографические исследования микроструктуры шлифов гранул. Если пикнометрическая плотность практически полностью совпадает с плотностью компактного сплава, то это свидетельствует о стабильности разработанного режима плазменной плавки и центробежного распыления.

Однако, помимо технологических характеристик гранул, необходимо следовать соответствующим нормам их чистоты по кислороду, регламентированному количеству неметаллических включений в их массе, отсутствию окисленных частиц, частиц инородных металлов и т. д. Все эти требования необходимо учитывать в связи с тем, что несоблюдение хотя бы одного из них может отрицательно повлиять на свойства конечного изделия.

Следует также добавить, что еще одной актуальной задачей для достижения высоких механических свойств в итоговой детали, полученной по технологии металлургии гранул, является уменьшение размера получаемой фракции гранул. Известно, что чем меньше крупность фракции товарных гранул, тем больше прочностные показатели при комнатной температуре, а также сопротивление малоциклового усталости (МЦУ). Следует также учитывать, что МЦУ зависит не только от количества неметаллических включений, присутствующих в массе гранул, но и от их размера. Все это способствовало постепенному снижению крупности гранул ЖНС, используемых в технологии, – с 400 и 315 мкм до 70 мкм и менее.

Уменьшения размера используемой фракции гранул, получаемых методом PREP, возможно добиться путем варьирования следующих технологических параметров [14]:

- повышение частоты вращения заготовки. Размер производимых гранул прямо пропорционально зависит от данного параметра – с его повышением измельчается размер получаемой фракции;
- повышение мощности плазмотрона. С увеличением мощности плазмотрона возможно уменьшить диаметр изготовленных гранул, а также повысить технологичность и производительность устройства центробежного распыления;
- уменьшение вибрации устройства во время распыления. Обеспечение необходимой чистоты поверхности распыляемой заготовки по шероховатости ее поверхности

способствует отсутствию биения, дестабилизирующего фракционный состав получаемых гранул и снижающего выход годной фракции.

В таблице приведены данные, характеризующие динамику улучшения характеристик заготовок дисков из гранул на примере сплава ЭП741НП, с начала развития технологии металлургии гранул по настоящее время.

Динамика улучшения характеристик заготовок дисков из гранул сплава ЭП741НП с 1981 г. по настоящее время (н.в.) [24]

Характеристика	Значения характеристик по годам		
	1981	1982	1986
Размер гранул, мкм	70–315	70–200	50–140
Содержание кислорода, % (по массе)	≤0,010	≤0,007	≤0,005
Содержание неметаллических частиц в пробе, шт./кг	Не ограничено	До 100	До 50
Ультразвуковой контроль: – диаметр детали, мм – объем контроля чистой детали, %	Ручной		Автоматизированный
	1,2–1,5 До 50	1,2–1,5 До 50	0,8–1,2 До 95
Гарантируемые характеристики заготовок дисков и валов	$\sigma_b \geq 1250$ МПа $\sigma_{0,2} \geq 800$ МПа $\delta \geq 13$ % $\psi \geq 15$ % $KCU \geq 40$ Дж/см ² $\sigma_{100}^{750^\circ} = 600$ МПа	$\sigma_b \geq 1250$ МПа $\sigma_{0,2} \geq 800$ МПа $\delta \geq 13$ % $\psi \geq 15$ % $KCU \geq 40$ Дж/см ² $\sigma_{100}^{750^\circ} = 600$ МПа	$\sigma_b \geq 1300$ МПа $\sigma_{0,2} \geq 900$ МПа $\delta \geq 15$ % $\psi \geq 17$ % $KCU \geq 40$ Дж/см ² $\sigma_{100}^{650^\circ} = 1000$ МПа $N_{1000}^{650^\circ} = 3500$ цикл

Продолжение таблицы

Характеристика	Значения характеристик по годам		
	1998	2003	с 2005 по н.в.
Размер гранул, мкм	50–140	50–100	70
Содержание кислорода, % (по массе)	≤0,005	≤0,007	≤0,007
Содержание неметаллических частиц в пробе, шт./кг	До 10	До 6	До 6
Ультразвуковой контроль: – диаметр детали, мм – объем контроля чистой детали, %	Автоматизированный		
	0,8–1,2 До 100	0,8 До 100	0,4–0,8 100
Гарантируемые характеристики заготовок дисков и валов	$\sigma_b \geq 1300$ МПа $\sigma_{0,2} \geq 900$ МПа $\delta \geq 15$ % $\psi \geq 17$ % $KCU \geq 40$ Дж/см ² $\sigma_{100}^{650^\circ} = 1000$ МПа $N_{1000}^{650^\circ} = 5000$ цикл	$\sigma_b \geq 1450$ МПа $\sigma_{0,2} \geq 1020$ МПа $\delta \geq 18$ % $\psi \geq 18$ % $KCU \geq 40$ Дж/см ² $\sigma_{100}^{650^\circ} = 1020$ МПа $N_{1000}^{650^\circ} = 5000$ цикл	$\sigma_b \geq 1450$ МПа $\sigma_{0,2} \geq 1020$ МПа $\delta \geq 18$ % $\psi \geq 18$ % $KCU \geq 40$ Дж/см ² $\sigma_{100}^{650^\circ} = 1020$ МПа $N_{1000}^{650^\circ} = 20000$ цикл

Видно, что чем мельче используемая при изготовлении заготовок дисков фракция гранул, тем больше значения прочности и пластичности при комнатной температуре, а также выше требования по сопротивлению МЦУ и наличию неметаллических включений в массе используемых гранул. На современных предприятиях при изготовлении

элементов авиационных ГТД методом металлургии гранул предусмотрен стандарт на допустимое количество неметаллических включений в массе гранул [25]: до 10 шт. на 1 кг гранул для фракции 100 мкм и 6 шт. на 1 кг гранул для фракции 70 мкм и менее, что составляет приблизительно одно включение на 10^6 гранул.

Однако, возвращаясь к требованиям по чистоте гранул, необходимо учитывать в комплексе всю технологическую цепочку производства гранул, их физико-механическую обработку и подготовку к компактированию с целью достижения необходимого комплекса механических характеристик в конечном изделии.

Известно, что причинами преждевременного разрушения образцов, полученных по технологии металлургии гранул, при испытаниях могут образовываться границы исходных гранул в результате значительного окисления их поверхности перед процессом компактирования. Для исключения этой возможности следует тщательно контролировать перед проведением процесса плазменной плавки и центробежного распыления заготовок чистоту инертного газа в камере распыления и соответствие его установленной норме по кислороду и парам воды. Как показано в работах [25, 26], существует также возможность загрязнения гранул ЖНС цеховой пылью в случае их хранения и обработки в атмосфере воздуха, в котором содержится достаточное количество пыли. Вредное влияние пылевидных частиц заключается в том, что вследствие их значительной поверхности, они обладают высокой сорбционной емкостью, что может вызывать поглощение значительного количества химически активных газов и паров воды, которые не могут быть полностью удалены во время вакуумной термической дегазации гранул в процессе засыпки и герметизации в капсулы. По этой причине хранение, транспортировку и физико-механическую обработку гранул ЖНС проводят в полностью инертной среде [27]. Для регламентированного количества металлических и неметаллических частиц в массе гранул, проводят их физико-механическую обработку, которая заключается в рассеве по фракциям, магнитном и электростатическом разделении от инородных включений – как металлических, так и неметаллических [27].

Заключения

Таким образом, краткий анализ технологии производства гранул ЖНС методом PREP дает возможность сформулировать основные требования к процессу изготовления гранул ЖНС, которые позволяют получить высокие свойства в конечном материале, произведенном по технологии металлургии гранул.

Основным требованием к производству гранул ЖНС следует считать их чистоту по содержанию кислорода. Для поддержания этого параметра на высоком уровне следует проводить все технологические операции производства, транспортировку и физико-механические воздействия на гранулы в инертной среде [27], а также проводить контроль баллонов инертных газов по нормам кислорода и паров воды.

Регламентирование количества неметаллических включений в массе гранул следует проводить с целью повышения механических свойств в конечном материале, изготовленном из гранул, а именно – сопротивление МЦУ, так как в гранулируемых материалах развитие трещины, как правило, инициируется в местах слабины – по неметаллическим включениям [28]. Для снижения их влияния на конечный материал, следует уменьшать размер используемой фракции гранул, так как размер неметаллических включений напрямую коррелирует с размером гранул, используемых при производстве дисков и валов из ЖНС. Следует отметить, что для снижения влияния неметаллических включений на конечные свойства в производстве дисков и валов ГТД предусмотрен стандарт предприятия, в котором указано количество неметаллических включений на 1 кг в массе гранул соответствующей фракции.

Для снижения вероятности попадания неметаллических включений в конечный материал предусмотрены операции физико-механической обработки гранул ЖНС – рассев по фракциям требуемого состава, электростатическое и магнитное разделение гранул от разного рода инородных включений. Данные операции способствуют, во-первых, сужению фракционного состава используемых в производстве дисков и валов гранул, а также эффективному удалению неметаллических включений из массы гранул.

Еще одним немаловажным требованием является отсутствие пористости в гранулах, полученных плазменной плавкой с центробежным распылением литой вращающейся заготовки. Устранение данного дефекта структуры гранул достигается за счет правильно выбранных параметров распыления, а именно – частоты вращения распыляемой заготовки и соотношения инертных газов в камере распыления.

Список источников

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. *Авиакосмическое материаловедение // Все материалы. Энциклопедический справочник*. 2008. № 3. С. 2–14.
3. Каблов Е.Н. Контроль качества материалов – гарантия безопасности эксплуатации авиационной техники // *Авиационные материалы и технологии*. 2001. № 1. С. 3–8.
4. Каблов Е.Н. Наука как отрасль экономики // *Наука и жизнь*. 2009. № 10. С. 7–8.
5. Летников М.Н., Ломберг Б.С., Оспенникова О.Г., Бакрадзе М.М. Влияние скорости охлаждения при закалке на микроструктуру и свойства жаропрочного деформируемого никелевого сплава ВЖ175-ИД // *Авиационные материалы и технологии*. 2019. № 2 (55). С. 21–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-21-30.
6. Ломберг Б.С., Шестакова А.А., Бакрадзе М.М., Карачевцев Ф.Н. Исследование стабильности γ' -фазы размером менее 100 нм в жаропрочном никелевом сплаве ВЖ175-ИД // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 4 (53). С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-3-10.
7. 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). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
8. 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). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-3-16.
9. 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). Ст. 01. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.
10. 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). Ст. 02. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 10.12.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
11. Востриков А.В., Волков А.М., Бакрадзе М.М. Разработка и исследование нового гранулируемого дискового сплава ВЖ178П для перспективных авиационных ГТД // *Цветные металлы*. 2018. № 8. С. 80–84.

12. Эскин Г.И. К условиям формирования недендритной структуры в слитках и гранулах легких и жаропрочных никелевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2013. № 4. С. 147–159.
13. Гарибов Г.С., Гриц Н.М. В.И. Добаткин и металлургия гранул жаропрочных никелевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2015. № 2. С. 34–39.
14. Востриков А.В., Сухов Д.И. Производство гранул методом PREP для аддитивных технологий – текущий статус и перспективы развития // *Труды ВИАМ*. 2016. № 8 (44). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-3-3.
15. Способ производства гранул жаропрочных никелевых сплавов: пат. 2468891 С1 Рос. Федерация; заявл. 18.11.11; опубл. 10.12.12.
16. Волков А.М., Шестакова А.А., Бакрадзе М.М. Сравнение гранул, полученных методами газовой атомизации и центробежного распыления литых заготовок, с точки зрения применения их для изготовления дисков ГТД из жаропрочных никелевых сплавов // *Труды ВИАМ*. 2018. № 11 (71). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-12-19.
17. Востриков А.В., Гарибов Г.С., Бер Л.Б., Шляпин С.Д. Исследование физико-механических свойств и структуры гранул из нового высокопрочного никелевого сплава, изготовленных методом PREP // *Технология легких сплавов*. 2013. № 2. С. 69–75.
18. Мусиенко В.Т. Некоторые итоги разработки технологии производства гранул жаропрочных никелевых сплавов для изготовления изделий авиакосмической техники // *Технология легких сплавов*. 2000. № 6. С. 72–78.
19. Добаткин В.И. Роль кинетических и термодинамических факторов при кристаллизации гранул // *Металлургия гранул*. 1983. Вып. 1. С. 23–33.
20. Добаткин В.И. Закономерности быстрой кристаллизации как основа выбора составов гранулируемых сплавов // *Металлургия гранул*. 1988. Вып. 4. С. 11–23.
21. Гарибов Г.С. Теория кристаллизации и технология гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2016. № 1. С. 107–118.
22. Белов А.Ф., Аношкин Н.Ф., Фаткуллин О.Х. и др. Особенности легирования жаропрочных сплавов, получаемых методом металлургии гранул // *Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы на никелевой основе*. М.: Наука, 1984. С. 31–40.
23. Бакрадзе М.М., Волков А.М., Шестакова А.А., Летников М.Н., Бубнов М.В. Особенности изменения размера зерен в дисковом гранулируемом жаропрочном никелевом сплаве, произведенном по различным технологиям // *Труды ВИАМ*. 2018. № 2 (62). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-1-1.
24. Гарибов Г.С. Развитие идей академика А.Ф. Белова по радикальному повышению эксплуатационных характеристик дисков перспективных ГТД // *Перспективные технологии легких и специальных сплавов: к 100-летию со дня рождения академика А.Ф. Белова*. М.: Физматлит, 2006. С. 107–117.
25. Кошелев В.Я., Гарибов Г.С., Сухов Д.И. Основные закономерности процесса получения гранул жаропрочных сплавов методом плазменного распыления вращающейся заготовки // *Технология легких сплавов*. 2015. № 3. С. 97–103.
26. Кошелев В.Я., Егоров Д.А. Влияние атмосферы хранения на адсорбционную способность гранул жаропрочных никелевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2010. № 4. С. 41–45.
27. Шестаков А.В., Карашаев М.М., Дмитриев Н.С. Технологические пути создания композиционных материалов на основе жаропрочных тугоплавких соединений (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2021. № 8 (102). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.12.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-12-20.
28. Волков А.М., Востриков А.В. Сопrotивление гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов разрушению при малоциклового усталости (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № S1 (43). С. 74–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-74-79.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Kablov E.N. Aerospace Materials Science. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2008, no. 3, pp. 2–14.
3. Kablov E.N. Materials Quality Control – a Guarantee of Aviation Equipment Operation Safety. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2001, no. 1, pp. 3–8.
4. Kablov E.N. Science as a Branch of the Economy. *Nauka i zhizn*, 2009, no. 10, pp. 7–8.
5. Letnikov M.N., Lomberg B.S., Ospennikova O.G., Bakradze M.M. The influence of quench rate on microstructure and mechanical properties of nickel-based wrought superalloy VZh175-ID. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2019, no. 2 (55), pp. 21–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-21-30.
6. Lomberg B.S., Shestakova A.A., Bakradze M.M., Karachevtsev F.N. The investigation of the stability of γ' -phase with size below 100 nm in Ni-base superalloy VZh175-ID. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 4 (53), pp. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-3-10.
7. 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), paper no. 03. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
8. 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), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-3-16.
9. 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), paper no. 01. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.
10. 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), paper no. 02. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: December 10, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-2-15-24.
11. Vostrikov A.V., Volkov A.M., Bakradze M.M. Development and study of a new granulated disk alloy VZh178P for promising aircraft gas turbine engines. *Tsvetnye metally*, 2018, no. 8, pp. 80–84.
12. Eskin G.I. On the conditions for the formation of a non-dendritic structure in ingots and granules of light and heat-resistant nickel alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2013, no. 4, pp. 147–159.
13. 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.
14. 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, paper no. 3. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 10, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-3-3.
15. *Method for producing granules of heat-resistant nickel alloys*: pat. 2468891 C1 Rus. Federation; appl. 18.11.11; publ. 10.12.12.
16. Volkov A.M., Shestakova A.A., Bakradze M.M. The comparison of powder produced by gas atomization and by plasma rotate electrode process in the point of production disk billets from Ni-base superalloys. *Trudy VIAM*, 2018, no. 11 (71), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 10, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-12-19.
17. Vostrikov A.V., Garibov G.S., Ber L.B., Shlyapin S.D. Study of physical and mechanical properties and structure of granules from a new high-strength nickel alloy produced by the PREP method. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2013, no. 2, pp. 69–75.

18. Musienko V.T. Some results of the development of the technology for the production of granules of heat-resistant nickel alloys for the manufacture of aerospace products. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2000, no. 6, pp. 72–78.
19. Dobatkin V.I. The role of kinetic and thermodynamic factors in the crystallization of granules. *Metallurgiya granul*, 1983, is. 1, pp. 23–33.
20. Dobatkin V.I. Regularities of rapid crystallization as a basis for selecting the compositions of granulated alloys. *Metallurgiya granul*, 1988, is. 4, pp. 11–23.
21. Garibov G.S. Crystallization theory and technology of granulated heat-resistant nickel alloys. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2016, no. 1, pp. 107–118.
22. Belov A.F., Anoshkin N.F., Fatkullin O.Kh. et al. Features of alloying heat-resistant alloys obtained by granule metallurgy. *Heat-resistant and heat-resistant steels and nickel-based alloys*. Moscow: Nauka, 1984, pp. 31–40.
23. Bakradze M.M., Volkov A.M., Shestakova A.A., Letnikov M.N., Bubnov M.V. The features of the grains size changing in the p/m Ni-base superalloy for disks application produced via different technologies. *Trudy VIAM*, 2018, no. 2 (62), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 10, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-1-1.
24. Garibov G.S. Development of the ideas of academician A.F. Belov on a radical increase in the operational characteristics of promising gas turbine engine disks. *Promising technologies of light and special alloys: on the 100th anniversary of the birth of academician A.F. Belov*. Moscow: Fizmatlit, 2006, pp. 107–117.
25. Koshelev V.Ya., Garibov G.S., Sukhov D.I. Basic patterns of the process of producing heat-resistant alloy granules by plasma spraying of a rotating workpiece. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2015, no. 3, pp. 97–103.
26. Koshelev V.Ya., Egorov D.A. Influence of storage atmosphere on the adsorption capacity of heat-resistant nickel alloy granules. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2010, no. 4, pp. 41–45.
27. Shestakov A.V., Karashaev M.M., Dmitriev N.S. Technological ways to create composite materials based on heat-resistant refractory compounds (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 8 (102), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: December 10, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-8-12-20.
28. Volkov A.M., Vostrikov A.V. Low-cycle fatigue resistance of PM Ni-base superalloys (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. S1, pp. 74–79. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-74-79.

Информация об авторах

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

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

Капитаненко Денис Владимирович, начальник лаборатории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

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

Denis V. Kapitanenko, Head of Laboratory, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 04.02.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 19.02.2025.

The article was submitted 04.02.2025; approved and accepted for publication after reviewing 19.02.2025.