

Научная статья

УДК 669.018.44:669.245

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-111-120

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОТНОСТИ МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

С.Ю. Шорстов¹, Н.С. Дмитриев¹, М.Г. Размахов¹, Н.С. Скуридина¹

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

Аннотация. Предложен подход к оценке плотности твердых материалов при повышенных температурах, основанный на измерении температурного коэффициента линейного расширения. Проведены измерения металлопорошковых композиций сплавов ЭП741НП, ВЖ178П и ВЖ159. Установлены температурные зависимости плотности исследуемых порошков в интервале температур от 200 до 1100 °С и проведена оценка корректности полученных результатов. Показаны особенности проведения эксперимента, а также рассмотрены преимущества и недостатки предложенного метода измерения.

Ключевые слова: металлопорошковые композиции, гранулометрический состав, жаропрочные никелевые сплавы, центробежное распыление литых заготовок, температурный коэффициент линейного расширения, теплофизические свойства, насыпная плотность, истинная плотность

Для цитирования: Шорстов С.Ю., Дмитриев Н.С., Размахов М.Г., Скуридина Н.С. Методические особенности исследования плотности металлопорошковых композиций при повышенной температуре // Труды ВИАМ. 2024. № 8 (138). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-111-120.

Scientific article

METHODOLOGICAL FEATURES OF STUDYING THE DENSITY OF METAL POWDER COMPOSITIONS AT HIGH TEMPERATURE

S.Yu. Shorstov¹, N.S. Dmitriev¹, M.G. Razmakhov¹, N.S. Skuridina¹

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 paper proposes an approach to estimating the density of solid materials at elevated temperatures, based on measuring the temperature coefficient of linear expansion. Measurements of metal powder compositions of alloys EP741NP, VZh178P and VZh159 were carried out. The temperature dependences of the density of the powders under study were established in the temperature range from 200 to 1100 °C and the correctness of the results obtained was assessed. The features of the experiment are shown, and the advantages and disadvantages of the proposed measurement method are considered.

Keywords: metal powder compositions, granulometric composition, heat-resistant nickel alloys, centrifugal spraying of cast blanks, temperature coefficient of linear expansion, thermo-physical properties, bulk density, true density

For citation: Shorstov S.Yu., Dmitriev N.S., Razmakhov M.G., Skuridina N.S. Methodological features of studying the density of metal powder compositions at high temperature. *Trudy VIAM*, 2024, no. 8 (138), paper no. 10. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-8-111-120.

Введение

Для повышения эффективности современных летательных аппаратов необходимо непрерывное развитие в области авиационного материаловедения. Одной из главных задач в современном отечественном и мировом авиастроении является повышение экономических показателей производства при сохранении высоких требований к ресурсу и надежности авиационной техники [1–3]. Данная тенденция способствовала распространению методов порошковой металлургии, которые не только повышают экономическую эффективность производства, но и позволяют обеспечивать высокую химическую и структурную однородность по всему объему изделий [4–6].

В отечественной практике металлургия гранул активно используется при изготовлении целого ряда деталей газотурбинных двигателей (ГТД), таких как диски, лабиринты, турбинные валы из жаропрочных никелевых сплавов. Наиболее распространенным способом изготовления данных заготовок в России является технология, включающая производство гранул методом плазменной плавки и центробежного распыления литых быстровращающихся заготовок (PREP), заполнение ими сложноконтурных капсул и последующее горячее изостатическое прессование (ГИП). Не меньшую актуальность в данной области имеют и методы селективного лазерного спекания (СЛС). Производство изделий данными методами с повышенными механическими и жаропрочными характеристиками, а также сопротивлением усталости требует высоких технологических свойств исходных гранул. Наряду с такими характеристиками порошков, как гранулометрический состав, пористость и сферичность частиц, содержание кислорода, степень газонасыщенности, содержание неметаллических включений, одним из ключевых свойств является насыпная и пикнометрическая плотность [7–10].

Показатели плотности порошка напрямую влияют на компактируемость материала в процессе ГИП и его последующие механические характеристики. В ряде работ [11–13] рассмотрено влияние технологических свойств гранул на особенности разработки режимов изготовления деталей и на конечные характеристики изделия. Как правило, при изготовлении деталей вышеприведенным способом во внимание принимаются показатели насыпной и пикнометрической плотности гранул при комнатной температуре. При этом с учетом высоких температур проведения ГИП и важности процесса засыпки и уплотнения гранул в капсулы, большой научный и практический интерес в данной области представляет кинетика изменения плотности порошка в процессе нагрева.

Методы определения плотности при комнатной температуре материалов различного класса, в том числе и порошковых композиций, достаточно хорошо изучены и отработаны [14–17]. Однако экспериментальные исследования плотности твердых веществ при повышенных температурах и описание методологии подобных измерений не имеют широкого распространения в научно-технической литературе.

В данной работе предложен метод оценки зависимости плотности металлических порошков от температуры за счет изменения объема при тепловом расширении.

Материалы и методы

В качестве объектов исследований использовали образцы порошков жаропрочных никелевых сплавов, изготовленные методом центробежного распыления литых заготовок:

- порошок сплава ЭП741НП системы Ni–Co–Cr–W–Al–Mo–Nb–Ti–C; фракция – 100÷+50 мкм [18];
- порошок сплава ВЖ178П системы Ni–Co–Cr–W–Al–Mo–Nb–Ti–Ta–Hf–C; фракция – 100÷+50 мкм [9];
- порошок сплава ВЖ159 системы Ni–Cr–Mo–Nb–Al; фракция – 150÷+40 мкм [19].

Исследование температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) осуществляли на горизонтальном dilatометре с использованием специального корундового приспособления для измерения порошков. Предварительно прибор откалиброван с применением приспособления для измерения порошков для получения наиболее корректных результатов. Измерения выполняли в интервале температур от 200 до 1100 °С со скоростью нагрева 5 К/мин, в атмосфере аргона с динамическим потоком 50 мл/мин.

Термогравиметрический анализ образцов осуществляли на приборе синхронного термического анализа. Измерения выполняли в интервале температур от 50 до 1200 °С со скоростью нагрева 5 К/мин, в атмосфере аргона с динамическим потоком 50 мл/мин. Образцы отбирали в виде навески 10 мг и размещали в корундовом тигле.

Измерения истинной плотности образцов осуществляли на газовом пикнометре в среде гелия. Прибор калибровали для ячейки объемом 10,8 см³ с использованием малой калибровочной сферы объемом 7,0699 см³.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.2. «Квалификация и исследования материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [20].

Результаты и обсуждение

Оценка изменения плотности твердого материала с изменением объема при нагревании (охлаждении) основана на использовании ТКЛР материала.

Исходя из определения среднего значения ТКЛР при известных значениях относительного удлинения $\Delta L/L_0$, установить объем образца V_{T_i} при температуре T_i можно из выражения

$$V_{T_i} = \{L_0 [1 + \bar{\alpha} (T_i - T_0)]\}^3, \quad (1)$$

где $\bar{\alpha}$ – среднее значение ТКЛР в диапазоне температур от T_0 до T_i , К⁻¹; L_0 – длина образца при начальной температуре, м.

Физическая связь между зависимостью плотности от температуры материала и ТКЛР может быть описана математическим выражением (2), из которого по измеренной плотности при начальной температуре T_0 и измеренным (или известным) средним значениям ТКЛР в диапазоне температур от T_0 до T_i рассчитывают значение плотности при температуре T_i :

$$\rho_{T_i} = \frac{\rho_0 (L_0)^3}{\{L_0 [1 + \bar{\alpha}(T_i - T_0)]\}^3} = \frac{\rho_0}{[1 + \bar{\alpha}(T_i - T_0)]^3}, \quad (2)$$

где ρ_0 и ρ_{T_i} – исходная плотность образца материала при температуре T_0 и плотность при температуре T_i , кг/м³.

При расчете плотности данным способом следует считать, что изменение объема тела при нагревании (охлаждении) происходит только путем теплового расширения, а не за счет изменения структуры в результате усадки, снятия внутренних напряжений или деструкции вследствие теплового воздействия. Однако в данной работе предполагается оценка изменения плотности в условиях, косвенно имитирующих температурные процессы ГИП порошков в сложноконтурных капсулах, и именно в температурных интервалах усадки данные показатели могут представлять наибольший интерес.

Поэтому расчет плотности будет осуществляться, в том числе, и в температурных диапазонах усадки образцов. О наличии процессов усадки и снятия тепловых напряжений в исследуемых образцах можно судить из анализа температурных зависимостей ТКЛР. В свою очередь, для контроля стабильности массы образцов в исследуемом интервале температур применялся термогравиметрический анализ. Из анализа полученных результатов термогравиметрии установлено, что масса образцов порошков жаропрочных никелевых сплавов ЭП741НП, ВЖ178П и ВЖ159 является стабильной во всем исследуемом интервале температур – от 50 до 1200 °С.

Измерение значений ТКЛР осуществляли с использованием специального приспособления для измерения порошковых материалов – в виде контейнера с подвижными цилиндрическими заглушками (рис. 1).

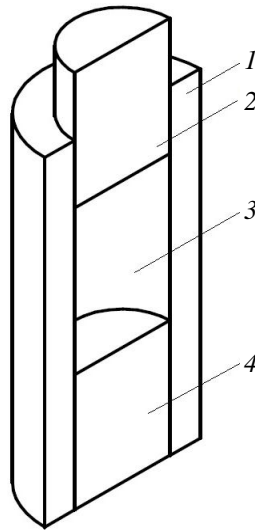


Рис. 1. Специальное приспособление для измерения ТКЛР порошковых материалов: 1 – втулка; 2 – верхняя заглушка; 3 – место размещения образца; 4 – нижняя заглушка

Образцы порошка помещали в измерительную ячейку и уплотняли с помощью верхней заглушки. Перед началом измерения фиксировали массу исследуемых образцов и занимаемый ими объем для дальнейшего расчета исходной плотности. Сила воздействия толкателя дилатометра на верхнюю заглушку специального приспособления в процессе эксперимента составляла 0,2 Н. Результаты измерений ТКЛР образцов из порошков жаропрочных никелевых сплавов ЭП741НП, ВЖ178П и ВЖ159 в интервале температур от 200 до 1100 °С представлены на рис. 2.

Из анализа полученных результатов установлено, что средний ТКЛР всех порошков исследуемых сплавов имеет схожие значения и варьируется в диапазоне от $\sim 16,6 \cdot 10^{-6}$ до $\sim 23,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Несколько бóльшие показатели среднего ТКЛР можно отметить для образцов порошка из сплава ВЖ159, что объясняется существенным отличием его химического состава от химического состава сплавов ЭП741НП и ВЖ178П. Однако отклонения показателей среднего ТКЛР не столь значительны и составляют порядка 7–10 %. Следует также отметить высокую сходимость полученных температурных зависимостей ТКЛР в рамках выборки измерений для каждого сплава. При этом для каждого порошка установлены различные температурные интервалы процессов усадки:

- для сплава ЭП741НП – от ~ 490 до ~ 690 °С;
- для сплава ВЖ178П – от ~ 500 до ~ 800 °С;
- для сплава ВЖ159 – от ~ 490 до ~ 600 °С и от ~ 890 до ~ 1100 °С.

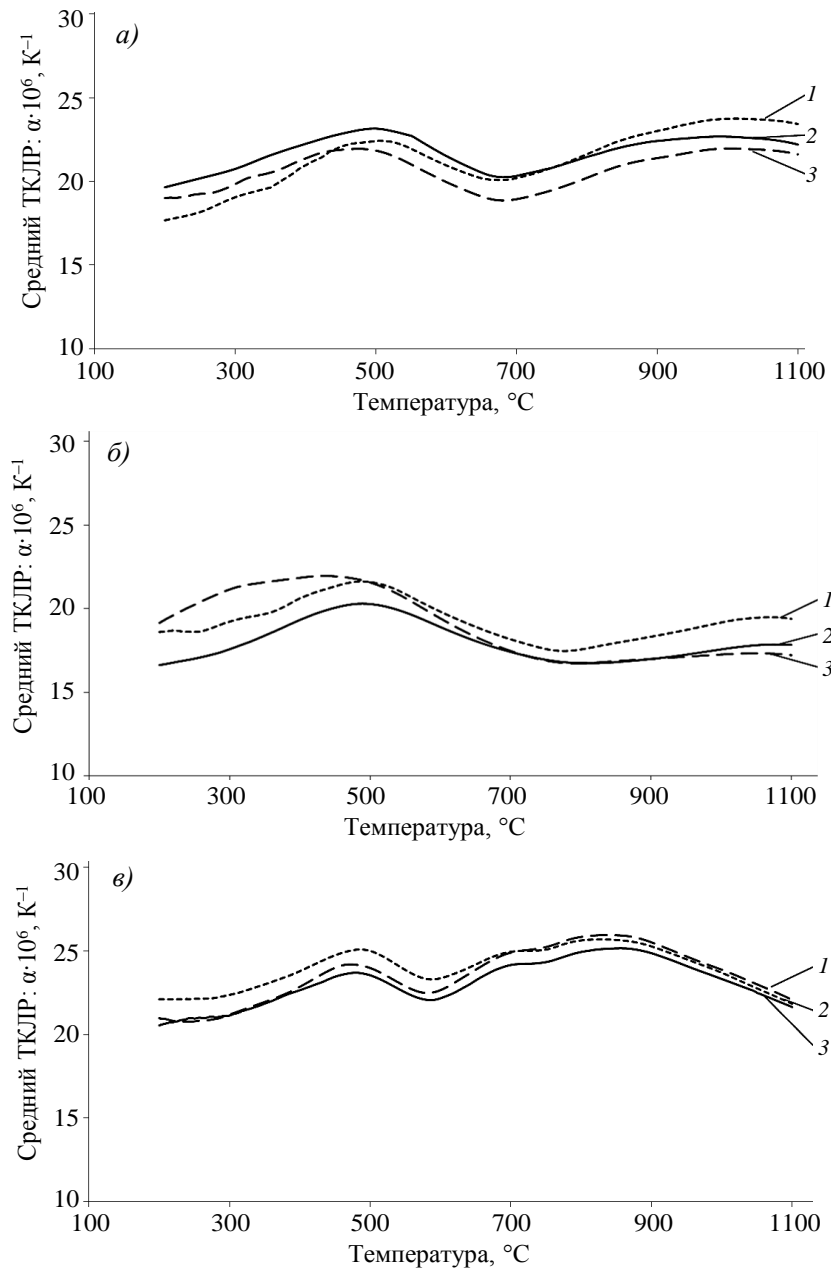


Рис. 2. Зависимость средних значений температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) для образцов (1–3) из порошков жаропрочных никелевых сплавов ЭП741НП (а), ВЖ178П (б) и ВЖ159 (в)

Для дальнейших расчетов плотности образцов при повышенной температуре необходимы значения исходной плотности. Применение данного метода расчета подразумевает использование значений именно кажущейся (объемной) плотности, зафиксированной на момент начала нагрева. В связи с этим измерение массы и объема образца осуществляли после помещения порошка в специальное приспособление для измерения ТКЛР порошковых материалов и его уплотнения. Значения исходной плотности образцов порошков жаропрочных никелевых сплавов представлены в табл. 1.

Для сравнительного анализа полученных результатов проведены измерения насыпной и истинной плотности исследуемых порошков сплавов ЭП741НП, ВЖ178П и ВЖ159. Полученные результаты измерений приведены в табл. 2.

Таблица 1

**Исходная плотность образцов порошков
жаропрочных никелевых сплавов ЭП741НП, ВЖ178П и ВЖ159**

Сплав	Условный номер образца	Масса, г	Объем, см ³	Исходная плотность, г/см ³
ЭП741НП	1	1,4217	0,260	5,48
	2	1,5375	0,278	5,52
	3	1,4590	0,264	5,53
ВЖ178П	1	1,4408	0,267	5,40
	2	1,3598	0,253	5,37
	3	1,4025	0,260	5,39
ВЖ159	1	1,4087	0,254	5,54
	2	1,4014	0,257	5,45
	3	1,4545	0,267	5,45

Таблица 2

**Истинная и насыпная плотность образцов порошков
жаропрочных никелевых сплавов ЭП741НП, ВЖ178П и ВЖ159**

Сплав	Условный номер образца	Насыпная плотность, г/см ³	Истинная плотность, г/см ³
ЭП741НП	1	5,26	8,26
	2	5,27	8,26
	3	5,23	8,25
ВЖ178П	1	5,01	8,23
	2	4,99	8,23
	3	5,14	8,23
ВЖ159	1	5,18	8,27
	2	5,18	8,27
	3	5,15	8,27

Измерения среднего ТКЛР металлопорошковых композиций осуществляли с использованием специального приспособления, изменение объема в котором происходит только путем перемещения заглушки в одном направлении и линейно зависит от фиксируемого перемещения. В таком случае выражение (2) для расчета плотности исследуемых образцов должно быть скорректировано:

$$\rho_{T_i} = \frac{\rho_0}{1 + \bar{\alpha}(T_i - T_0)} \quad (3)$$

Дальнейший расчет плотности исследуемых образцов в зависимости от температуры осуществляли исходя из выражения (3). Полученные результаты расчетов представлены в табл. 3.

Результаты расчета плотности образцов порошков сплавов ЭП741НП, ВЖ178П и ВЖ159 характеризуются схожими (монотонно снижающимися) температурными зависимостями и варьируются в интервале температур от 200 до 1100 °С в следующих диапазонах:

- для сплава ЭП741НП – от 5,51 до ~5,34 г/см³;
- для сплава ВЖ178П – от ~5,38 до ~5,27 г/см³;
- для сплава ВЖ159 – от ~5,52 до ~5,32 г/см³.

**Плотность образцов порошков жаропрочных никелевых сплавов
ЭП741НП, ВЖ178П и ВЖ159 в интервале температур от 200 до 1100 °С**

Температура, °С	Плотность, г/см ³ , порошка сплава								
	ЭП741НП			ВЖ178П			ВЖ159		
200	5,46	5,50	5,51	5,38	5,35	5,37	5,52	5,43	5,43
300	5,45	5,49	5,50	5,37	5,34	5,36	5,51	5,42	5,42
400	5,44	5,47	5,49	5,36	5,33	5,35	5,49	5,40	5,40
500	5,42	5,46	5,47	5,34	5,32	5,33	5,48	5,39	5,39
600	5,41	5,45	5,47	5,34	5,31	5,33	5,47	5,38	5,38
700	5,41	5,44	5,46	5,33	5,31	5,33	5,45	5,36	5,36
800	5,39	5,43	5,44	5,33	5,30	5,32	5,43	5,34	5,35
900	5,37	5,41	5,43	5,31	5,29	5,31	5,42	5,33	5,33
1000	5,36	5,40	5,41	5,30	5,28	5,30	5,41	5,33	5,33
1100	5,34	5,39	5,40	5,29	5,27	5,29	5,41	5,32	5,33

Следует отметить, что полученные данные носят оценочный характер и могут претерпевать значительные изменения в зависимости от степени первоначального уплотнения порошков при измерении ТКЛР и, соответственно, их исходной плотности после размещения в специальном приспособлении. Так, при проведении экспериментов в данной работе исходные значения плотности порошков после уплотнения в специальном приспособлении для измерения ТКЛР значительно отличаются от показателей насыпной плотности, которая является одной из основных характеристик для данного вида материалов при проведении процессов спекания. Такое отклонение значений исходной плотности оказывает существенное влияние на корректность дальнейших расчетов плотности данным методом во всем интервале температур. Однако применение такого подхода вполне позволяет оценить кинетику изменения плотности порошков в процессе термического воздействия и спрогнозировать характер их спекания.

Заключения

Предложен подход к проведению экспериментальных исследований плотности твердых материалов при повышенных температурах. Методика измерения основана на использовании значений ТКЛР материала в исследуемом интервале температур. Выявлены основные недостатки данного подхода при исследовании порошковых материалов в виде контроля степени уплотнения порошков перед началом измерения и, как следствие, сложности корректного определения исходной плотности образца. Тем не менее метод позволяет оценить динамику изменения плотности образцов в процессе нагрева, что является немаловажным фактором при разработке режимов спекания или термообработки порошковых материалов. При этом следует отметить, что недостатки предложенного метода в виде неконтролируемой усадки порошков нивелируются при исследованиях цельнометаллических образцов, имеющих стабильные геометрические размеры.

В данной работе проведены экспериментальные исследования ТКЛР, насыпной и истинной плотности порошков из сплавов ЭП741НП, ВЖ178П и ВЖ159. Установлено, что средние значения ТКЛР порошков сплавов в интервале температур от 200 до 1100 °С варьируются в следующих диапазонах:

- для сплава ЭП741НП – от $\sim 18,8 \cdot 10^{-6}$ до $\sim 22,8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$;
- для сплава ВЖ178П – от $\sim 18,1 \cdot 10^{-6}$ до $\sim 21,1 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$;
- для сплава ВЖ159 – от $\sim 21,2 \cdot 10^{-6}$ до $\sim 25,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$.

Установлены следующие показатели насыпной и истинной плотности исследуемых порошков:

- для сплава ЭП741НП – насыпная плотность $\sim 5,25 \text{ г/см}^3$, истинная плотность $\sim 8,26 \text{ г/см}^3$;

– для сплава ВЖ178П – насыпная плотность $\sim 5,05$ г/см³, истинная плотность $\sim 8,23$ г/см³;

– для сплава ВЖ159 – насыпная плотность $\sim 5,17$ г/см³, истинная плотность $\sim 8,27$ г/см³.

С использованием полученных данных проведены расчеты плотности порошков в диапазоне температур от 200 до 1100 °С. Установлено, что изменение плотности образцов в исследуемом интервале температур характеризуется схожими (монотонно снижающимися) температурными зависимостями и варьируются в следующих диапазонах:

– для сплава ЭП741НП – от 5,51 до $\sim 5,34$ г/см³;

– для сплава ВЖ178П – от $\sim 5,38$ до $\sim 5,27$ г/см³;

– для сплава ВЖ159 – от $\sim 5,52$ до $\sim 5,32$ г/см³.

Полученные в данной работе значения свойств могут использоваться при проектировании и моделировании технологических процессов спекания металлопорошковых композиций и оценке их характеристик.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В. Роль материалов нового поколения в обеспечении технологического суверенитета Российской Федерации // Вестник Российской академии наук. 2023. Т. 93. № 10. С. 907–916.
2. Каблов Е.Н. Без новых материалов – нет будущего // Metallurg. 2013. № 12. С. 4–8.
3. Каблов Е.Н., Бакрадзе М.М., Громов В.И., Вознесенская Н.М., Якушева Н.А. Новые высокопрочные конструкционные и коррозионностойкие стали для аэрокосмической техники разработки ФГУП «ВИАМ» (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
4. 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. 34–44.
5. Гарибов Г.С., Гриц Н.М. В.И. Добаткин и металлургия гранул жаропрочных никелевых сплавов // Технология легких сплавов. 2015. № 2. С. 34–39.
6. Лошинин Ю.В., Пахомкин С.И., Размахов М.Г. Температуры фазовых превращений и калориметрический анализ порошковых композиций жаропрочных никелевых сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 1 (58). С. 79–85. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-79-85.
7. Востриков А.В., Ломберг Б.С., Летников М.Н., Овсепян С.В. Современные жаропрочные деформируемые никелевые сплавы ВИАМ для деталей ГТД // Мат. Всерос. науч.-технич. конф. «Современные жаропрочные никелевые деформируемые сплавы и технологии их производства». М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2021. С. 5–14.
8. Волков А.М., Востриков А.В., Бакрадзе М.М. Принципы создания и особенности легирования гранулируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД // Труды ВИАМ. 2016. № 8 (44). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 06.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-2-2.
9. Сухов Д.И., Неруш С.В., Ефимочкин И.Ю., Карачевцев Ф.Н., Богачев И.А. Получение металло-матричных композитов на основе сплава ВЖ159 методом селективного лазерного сплавления // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 2 (63). Ст. 07. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-62-72.
10. Мовенко Д.А., Шуртаков С.В. Причины образования микротрещин и снижение плотности их распределения в изделиях из никелевых жаропрочных сплавов, изготовленных методом СЛС (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2022. № 2 (67). Ст. 04. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 06.03.2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-43-51.
11. 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: 06.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-12-19.

12. Бакрадзе М.М., Волков А.М., Шестакова А.А., Летников М.Н., Бубнов М.В. Особенности измерения 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: 06.03.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-1-1.
13. 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.
14. Соколовский С.С., Астапович О.С. Выбор метода и средств измерений плотности пористых композиционных материалов с открытыми порами // 12-я Междунар. науч.-техн. конф. «Приборостроение–2019». Минск: Белорусск. нац. техн. ун-т, 2019. С. 228–229.
15. Гайнуллин Рен.Х., Гайнуллин Риш. Х., Цветкова Е.М. и др. Математическое обоснование технологических параметров устройства для измерения кажущейся плотности пористых материалов // Лесной вестник. 2022. Т. 26. № 4. С. 128–134. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-128-134.
16. Гайнуллин Рен.Х., Гайнуллин Риш. Х., Цветкова Е.М. и др. Способ измерения объема и определения плотности пористых материалов // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 2 (50). С. 106–110. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-2-106-110.
17. Чаплыгин В.Ю. Методология исследования металлических порошков, полученных электроэрозионным диспергированием // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 1 (4). С. 225–231.
18. ГОСТ Р 52802–2007. Сплавы никелевые жаропрочные гранулируемые. Марки. М.: Стандартинформ, 2008. 10 с.
19. ГОСТ 5632–2014. Нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. М.: Стандартинформ, 2015. 57 с.
20. 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.

References

1. Kablov E.N., Antipov V.V. The role of new generation materials in ensuring the technological sovereignty of the Russian Federation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2023, vol. 93, no. 10, pp. 907–916.
2. Kablov E.N. No future without new materials. *Metallurg*, 2013, no. 12, pp. 4–8.
3. Kablov E.N., Bakradze M.M., Gromov V.I., Voznesenskaya N.M., Yakusheva N.A. New high strength structural and corrosion-resistant steels for aerospace equipment developed by FSUE «VIAM» (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 3–11. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-3-11.
4. Garibov G.S., Vostrikov A.V., Grits N.M., Fedorenko E.A. Development of new granulated heat-resistant nickel alloys for the production of disks and shafts of aircraft engines. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2010, no. 2, pp. 34–44.
5. 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.
6. Loshchinin Yu.V., Pakhomkin S.I., Razmakhov M.G. Phase transformation temperatures and calorimetric analysis of powder compositions of nickel-based superalloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 1 (58), pp. 79–85. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-79-85.
7. Vostrikov A.V., Lomberg B.S., Letnikov M.N., Ovsepyan S.V. Modern heat-resistant deformable nickel alloys of VIAM for gas turbine engine parts. *All-Rus. Sci. and Tech. Conf. «Modern heat-resistant deformable nickel alloys and technologies for their production»*. Moscow: NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, 2021, pp. 5–14.
8. Volkov A.M., Vostrikov A.V., Bakradze M.M. Development principles and alloying features of p/m Ni-base superalloys for jet-engine disks application. *Trudy VIAM*, 2016, no. 8, paper no. 2. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 06, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-8-2-2.

9. Sukhov D.I., Nerush S.V., Efimochkin I.Yu., Karachevchev F.N., Bogachev I.A. Production of MMC based on VZh159 alloy by selective laser melting. *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 2 (63), paper no. 07. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 06, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-62-72.
10. Movenko D.A., Shurtakov S.V. Microcrack formation and controlling in nickel superalloys processed by selective laser melting (review). *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), paper no. 04. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 06, 2024). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-43-51.
11. 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: March 06, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-11-12-19.
12. 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, paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 06, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-2-1-1.
13. Koshelev V.Ya., Garibov G.S., Sukhov D.I. Basic regularities of the process of producing granules of heat-resistant alloys by plasma spraying of a rotating workpiece. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2015, no. 3, pp. 97–103.
14. Sokolovsky S.S., Astapovich O.S. Selection of the method and means for measuring the density of porous composite materials with open pores. *12th Int. Sci. and Tech. Conf. «Instrument Engineering–2019»*. Minsk: Belarusian National Tech. Univ., 2019, pp. 228–229.
15. Gainullin Ren.Kh., Gainullin Rish.Kh., Tsvetkova E.M. et al. Mathematical justification of the technological parameters of the device for measuring the apparent density of porous materials. *Lesnoy vestnik*, 2022, vol. 26, no. 4, pp. 128–134. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-128-134.
16. Gainullin Ren.Kh., Gainullin Rish. Kh., Tsvetkova E.M. et al. Method for measuring the volume and determining the density of porous materials. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*, 2021, no. 2 (50), pp. 106–110. DOI: 10.18324/2077-5415-2021-2-106-110.
17. Chaplygin V.Yu. Methodology for studying metal powders obtained by electrical discharge dispersion. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*, 2016, no. 1 (4), p. 225–231.
18. State Standard R 52802–2007. *Heat-resistant granulated nickel alloys*. Brands. Moscow: Standartinform, 2008, 10 p.
19. State Standard 5632–2014. *Stainless steels and alloys, corrosion-resistant, heat-resistant and heat-resistant*. Brands. Moscow: Standartinform, 2015, 57 p.
20. 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 tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

Информация об авторах

Шорстов Сергей Юрьевич, начальник сектора, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Дмитриев Никита Сергеевич, инженер 2 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Размахов Максим Геннадьевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Скуридина Наталья Степанова, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Sergey Yu. Shorstov, Head of Sector, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nikita S. Dmitriev, Second Category Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Maxim G. Razmakhov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalya S. Skuridina, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 26.07.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 01.08.2024.
The article was submitted 26.07.2024; approved and accepted for publication after reviewing 01.08.2024.