

Научная статья

УДК 621.791

DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-31-40

НОВЫЙ ПРИСАДОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ СВАРКИ ЛИТЕЙНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ВЖЛ718 И ВЖЛ220*М.Д. Пантелеев¹, А.В. Свиридов¹, К.Н. Попов¹, С.Д. Зотов¹*

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

Аннотация. Изложены особенности исследования и изготовления присадочного материала для ремонта дефектов литых заготовок из литейных жаропрочных никелевых сплавов ВЖЛ718 и ВЖЛ220. Приведены результаты исследования механических свойств материала заготовок до и после ремонта. Проведены исследования механических свойств присадочного материала. Определен оптимизированный химический состав присадочного материала. Материалу присвоена марка Св-ВЖ183.

Ключевые слова: литейный никелевый сплав, In718, Rene220, ВЖЛ718, ВЖЛ220, ремонт дефектов, ремонт литейных дефектов, аргоно-дуговая сварка, присадочный материал, Св-ВЖ183, механические свойства

Для цитирования: Пантелеев М.Д., Свиридов А.В., Попов К.Н., Зотов С.Д. Новый присадочный материал для сварки литейных жаропрочных никелевых сплавов ВЖЛ718 и ВЖЛ220 // Труды ВИАМ. 2025. № 8 (150). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-31-40.

Scientific article

NEW FILLER MATERIAL FOR WELDING OF FOUNDRY HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS ВЖЛ718 AND ВЖЛ220*M.D. Panteleev¹, A.V. Sviridov¹, K.N. Popov¹, S.D. Zotov¹*

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 article presents the details of the investigation and of the production of the welding consumable for repairing foundry heat-resistant nickel alloys ВЖЛ718 and ВЖЛ220 cast workpieces. The research of mechanical properties from casting material before and after the repairing is conducted. The results of the research of filler material mechanical properties are discussed. The optimized chemical composition of the filler material is determined and is named Св-ВЖ183.

Keywords: foundry nickel alloy, In718, Rene220, ВЖЛ718, ВЖЛ220, defects' repairing, repairing of foundry defects, tungsten inert gases welding, filler material, Св-ВЖ183, mechanical properties

For citation: Panteleev M.D., Sviridov A.V., Popov K.N., Zotov S.D. New filler material for welding of foundry heat-resistant nickel alloys ВЖЛ718 and ВЖЛ220. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), paper no. 03. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-31-40.

Введение

Один из традиционных методов изготовления деталей – литье жаропрочных сплавов. В рамках литейных процессов разработаны методы вакуумного литья заготовок для получения направленной структуры (монокристаллические лопатки газотурбинных двигателей), селективного лазерного сплавления металлопорошковых композиций и др. [1–3].

Одной из проблем применения литейных жаропрочных сплавов являются технологические нарушения, связанные с наличием дефектов отливок (раковин, засоров и т. д.), исправление которых проводят, как правило, методом сварки плавлением с применением присадочных материалов, полученных по оптимальным составам. Изготовление таких присадочных материалов является актуальной задачей [4–6].

Для устранения дефектов литья при изготовлении деталей газотурбинных двигателей и газотурбинных установок из новых литейных сплавов разрабатываются присадочные материалы и технологии ремонта, которые позволят увеличить выход годного литья и снизить стоимость конечной продукции, при этом отказаться от закупки материалов иностранного производства.

Для ремонта литейных жаропрочных сплавов широко применяют аргонодуговую электросварку (АрДЭС) неплавящимся электродом с использованием присадочных материалов, в том числе из основного материала [7–9].

Присадочные материалы рекомендуется использовать для ремонта литейных деталей и сварки с разделкой кромок, а также при необходимости – для изменения формы и состава шва, технологических, механических свойств и структуры сварных соединений. Свариваемость материалов и сплавов определяется склонностью к образованию трещин при сварке (термической обработке) и степенью разупрочнения сварных соединений. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов зависит от содержания алюминия и титана, а также выделившейся γ' -фазы, которые в наибольшей степени влияют на уровень образующихся остаточных термических напряжений, релаксационную стойкость сплавов и сварных соединений, склонность к образованию горячих трещин и определяют разделение сплавов на группы [10–12].

Сварочные проволоки для АрДЭС по принципу легирования можно разделить на две группы: из гомогенных сплавов, легированные большим количеством кобальта и тугоплавкими металлами (хром, вольфрам, молибден, кобальт, работоспособные до температуры 1100 °С); дисперсионно-твердеющие, при сварке которыми наплавленный металл после старения упрочняется в результате выделения γ' -фазы, температура эксплуатации которых не превышает 1000 °С [13].

Для изготовления нового отечественного двигателя ПД-8, импортозамещающего французский (Sam-146) и украинский (Д-436ТП) двигатели, в России с 2021 по 2022 г. разработаны и паспортизованы литейные жаропрочные никелевые сплавы, в частности ВЖЛ718 и ВЖЛ220, в качестве замены зарубежных сплавов In718, Rene220 для литья некоторых деталей газотурбинных двигателей. Указанные отечественные материалы включены в конструкторскую документацию двигателя ПД-8 и превосходят по уровню свойств импортные аналоги [14–17].

При температуре испытаний от 20 до 700 °С предел прочности и условный предел текучести разработанного литейного сплава ВЖЛ718 по сравнению с зарубежным аналогом (сплав In718, США) больше на 2–7 %, а относительное удлинение – в 1,5–2,1 раза. Сплав рекомендуется для литья корпусных деталей, работоспособных при температурах до 650 °С [5, 18–21].

Литейный жаропрочный никелевый сплав ВЖЛ220 по сравнению с зарубежным аналогом состава NiCr19Co12NbTaMo (сплав Rene220, Франция) имеет следующие преимущества: предел прочности при растяжении при температуре от 20 до 600 °С больше на 6–10 %; относительное удлинение при температуре от 20 до 750 °С – в 1,4–2,2 раза,

при температуре 800 °С – на 12 %; предел ограниченной выносливости при малоцикло-вой усталости при температуре 750 °С на базе 10⁴ циклов («жесткий» цикл) на гладких образцах – на 11 %. Сплав рекомендуется для литья корпусных деталей (в том числе крупногабаритных), работоспособных при температурах до 750 °С [14–21].

Для расширения возможностей использования новых материалов в перспектив-ных изделиях авиационной техники и уменьшения экономических затрат при сохране-нии качества сварного соединения необходимо разработать состав присадочного мате-риала, сочетающего высокие характеристики длительной и кратковременной прочности с рабочей температурой до 1000 °С.

Материалы и методы

Определен химический состав полученных слитков из сплавов ВЖЛ718 и ВЖЛ220. Данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав слитков из сплавов ВЖЛ718 и ВЖЛ220

Элемент	Содержание элементов, % (по массе), в слитке из сплава	
	ВЖЛ220 (патент РФ № 2794497)	ВЖЛ718 (патент РФ № 2655483)
Ni	Основа	Основа
Cr	18,5	18,7
Co	11,9	0,026
Nb	5,16	4,65
Ta	3,35	0,023
Mo	3,01	2,85
Ti	0,94	0,85
Al	0,53	0,58
W	0,041	0,049
Hf	0,03	–
Mn	0,016	–
Si	0,111	0,007
Cu	0,039	–
C	0,004	0,022
S	0,025	0,003
Fe	–	18,7

По результатам анализа научно-технической литературы выбраны составы си-стем Ni–Co–Cr и Ni–Cr–Fe. Проводили выплавку образцов четырех экспериментальных составов для изготовления присадочного материала, предназначенного для ремонта ли-тейных дефектов в литых заготовках из жаропрочных никелевых сплавов ВЖЛ718 и ВЖЛ220 с помощью АрДЭС. Для экспериментальных исследований проведены плавки и получены слитки из присадочных материалов двух систем. В состав первой системы вхо-дят Cr, W, Mo, Ti, Nb, Co, Al, основа – Ni; второй системы – Cr, W, Mo, Ti, Fe, основа – Ni.

Выплавку образцов из опытного сплава проводили в вакуумной индукционной пе-чи УППФ-3. В процессе выплавки металл несколько раз перемешивали для предотвраще-ния ликвации по плотности составляющих. После литья проводили операции механиче-ской обработки полученных слитков для удаления прибыльных и донных участков.

Горячую деформацию (осадку) на сутунку слитков из присадочного материала экспериментальных составов проводили на прессе «Блисс» с усилием до 10⁷ Н. Перед деформацией слитки нагревали в камерной электропечи в течение нескольких часов. Допустимая разовая степень деформации составляла 30–40 %. Осуществляли горячую прокатку для получения листовых заготовок.

С использованием полученных листов изготовлен присадочный материал экспериментальных составов. Для проведения испытаний по определению геометрических параметров присадочного материала и испытаний на стойкость к образованию горячих трещин из полученных листов изготовлен присадочный материал экспериментальных составов в виде «лапши». Резка полученных заготовок проведена на гильотине.

Присадочный материал экспериментальных составов изготавливали в виде «лапши» длиной не менее 250 мм с квадратным сечением (длина стороны $1,5 \pm 0,1$ мм). Результаты визуального анализа качества присадочного материала показали, что поверхность чистая, гладкая, без трещин, расслоений, закатов, забоин, рисок, вмятин (рис. 1).

Испытания на трещиностойкость проводили по ГОСТ 26389–84. Для испытаний применяли образцы размером 50×50 мм, последовательно сваренные с помощью АрДЭС. Скорость растяжения полученного сварного соединения изменяется дискретно. Главный критерий для определения склонности сварного соединения к образованию горячих трещин – критическая скорость растяжения $V_{кр}$. В процессе испытания увеличивали относительное перемещение сварных кромок, что при достижении критического значения приводило к трещинообразованию. Критическая скорость растяжения рассчитывается как среднее арифметическое трех значений. Оценку трещиностойкости проводили с применением присадочной проволоки и без нее.

Наклепанные в результате горячей прокатки листы из сплавов отжигали при температуре нагрева под прокатку с охлаждением на воздухе. Листы с окисленной в процессе предыдущей обработки поверхностью подвергали щелочно-кислотному травлению, а затем прокатывали до толщины 1,5 мм. Изготовлено восемь листов (по 2 шт. на каждый экспериментальный состав). Полученные листы представлены на рис. 2.



Рис. 1. Присадочный материал экспериментальных составов в виде «лапши»



Рис. 2. Присадочные материалы экспериментальных составов в виде листов

Для проведения исследований технологических параметров ремонта дефектов литья проведена выплавка и изготовлены литые заготовки из сплавов ВЖЛ718 и ВЖЛ220. Выплавка сплавов ВЖЛ220 и ВЖЛ718 осуществлена в промышленной вакуумной индукционной печи ИСВ. Из слитков из сплавов ВЖЛ718 и ВЖЛ220 отлиты заготовки с равноосной структурой в печи УППФ-У (рис. 3).

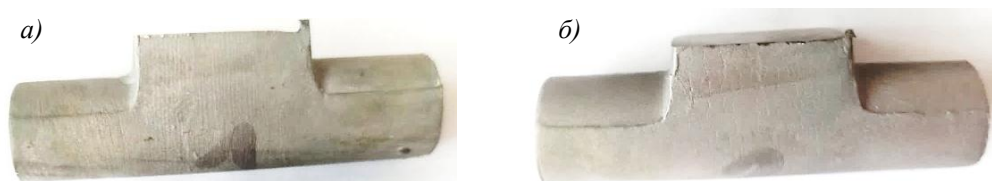


Рис. 3. Литые заготовки из сплавов ВЖЛ220 (а) и ВЖЛ718 (б)

На литых заготовках из сплавов ВЖЛ220 и ВЖЛ718 без имитации дефектов и после ремонта по выбранному оптимальному технологическому режиму с присадочным материалом проведена упрочняющая термическая обработка, и изготовлены образцы для дальнейших механических испытаний. Качество поверхности материала после ремонта дефектов литья контролировали визуально.

Схемы выборки имитации дефектов литья, внешний вид заготовок исходной и с нанесенной на поверхности разделкой, имитирующей дефекты литья до ремонта, а также технологические схемы выборки и разделки образцов для ремонта с использованием присадочного материала представлены на рис. 4.

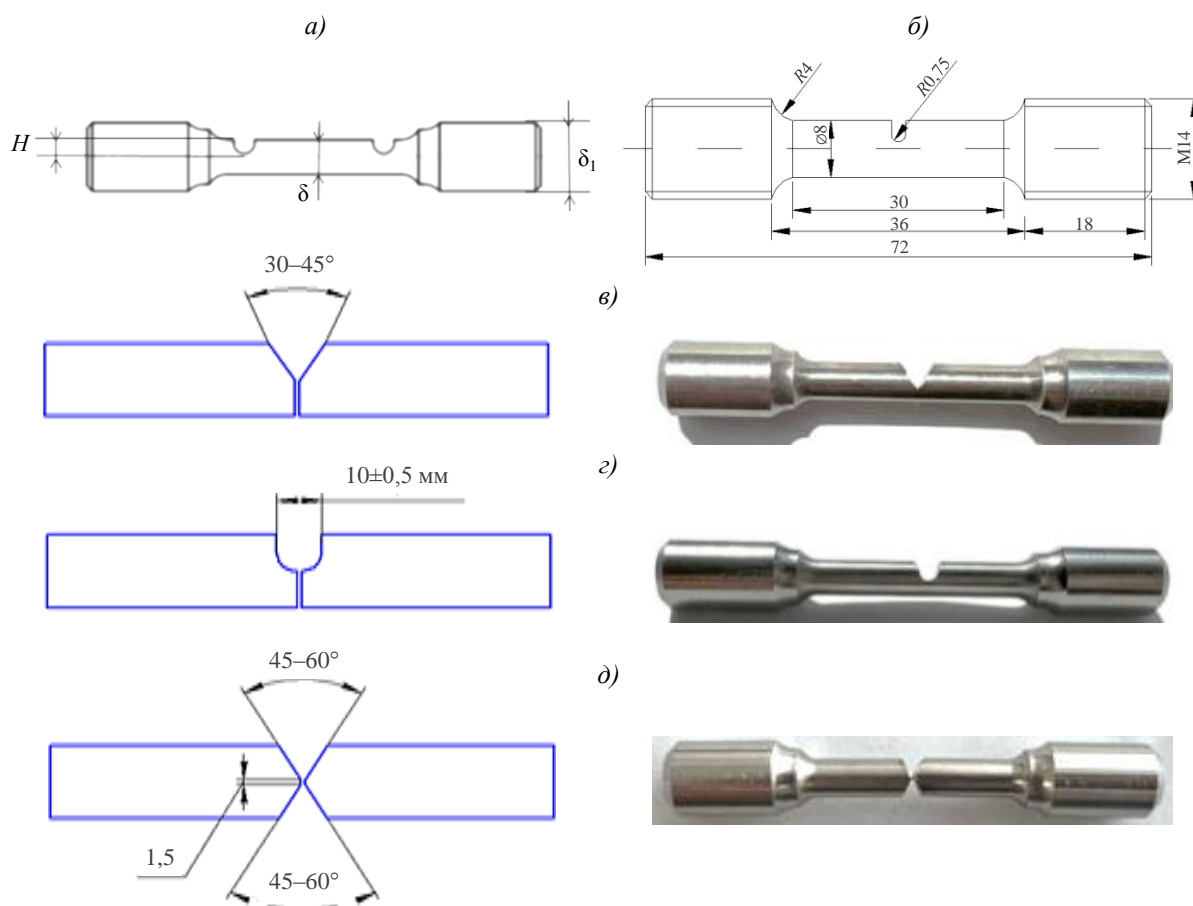


Рис. 4. Схемы выборки: а – эскиз образца (H – размер выборки; δ – ширина рабочей части заготовки; δ_1 – высота головки заготовки); б – эскиз заготовки образца с разделкой применительно к технологии ремонта; в–д – заготовки с V-образной, U-образной и двухсторонней разделкой

Проведены испытания на стойкость к образованию горячих трещин присадочных материалов экспериментальных составов на изготовленных образцах по методике МГТУ им. Н.Э. Баумана (ГОСТ Р ИСО 17641-1-2011) и ГОСТ 26389-84.

Испытания образцов из сплавов ВЖЛ718 и ВЖЛ220 (основного материала и после ремонта с присадочным материалом на основе системы Ni-Co-Cr) на кратковременную прочность проведены при температурах 20, 650 и 750 °С, на длительную прочность – при 650 и 750 °С.

Испытания на растяжение проводили по ГОСТ 1497-2023, на кратковременную прочность – по ГОСТ 9651-84, на длительную прочность – по ГОСТ 10145-81.

Атомно-эмиссионный анализ проводили по методикам измерения МИ 1.2.036–2011, МИ 1.2.037–2011 и МИ 1.2.038–2011, а также по ГОСТ 12344–2003, ГОСТ 12345–2001 и ГОСТ 17745–90.

Проведены исследования технологических параметров ремонта дефектов литья на литых заготовках из сплавов ВЖЛ718 и ВЖЛ220 с помощью АрДЭС с присадочным материалом экспериментальных составов. В процессе ремонта дефектов литья варьировали основные технологические параметры – ток сварки, напряжение на дуге, скорость сварки, расход защитного газа и количество присадочного материала, подаваемого в зону имитации дефекта. Количество подаваемого присадочного материала контролировали визуально.

Результаты и обсуждение

Определен химический состав слитков из полученных экспериментальных составов присадочных материалов. Установлено, что составы выплавленных слитков соответствуют расчетным составам по содержанию химических элементов.

Проведены испытания по определению химического состава и геометрических параметров присадочного материала экспериментальных составов. Все экспериментальные составы присадочных материалов соответствуют расчетным составам по содержанию химических элементов, как и полученные слитки.

При ремонте с присадочным материалом экспериментального состава системы Ni–Co–Cr на поверхности заготовок не обнаружено окисления металла, усадочных раковин, поверхностных пор, трещин. Металл присадочного материала экспериментального состава при сварке плавился равномерно, без выплесков и закипания. При ремонте литых заготовок из сплавов ВЖЛ220 и ВЖЛ718 основной материал заготовок находился в закаленном состоянии. Для ремонта литых заготовок из сплавов ВЖЛ220 и ВЖЛ718 выбран оптимальный технологический режим, который обеспечивает высокое качество поверхности материала в зоне ремонта и отсутствие дефектов сварного соединения.

В качестве критерия склонности к образованию горячих трещин использовали максимальную (критическую) скорость деформации $V_{кр}$, при которой в образце не образуется трещина. По результатам испытаний установлено, что для присадочного материала системы Ni–Co–Cr $V_{кр} \geq 5,2$ мм/мин. Для остальных экспериментальных составов получили низкую стойкость к образованию горячих трещин ($V_{кр} \leq 3,2$ мм/мин).

Результаты проведенных испытаний образцов после ремонта, выполненного методом ручной АрДЭС с экспериментальным присадочным материалом системы Ni–Co–Cr, показывают, что выбранный технологический режим и состав присадочного материала позволяют получить отремонтированную литую заготовку без дефектов и обеспечить прочность после ремонта, равную не менее 0,8 от прочности основного материала, при повышенных температурах; равнопрочность для сплавов ВЖЛ718 и ВЖЛ220 при комнатной температуре (кратковременная прочность). Результаты механических испытаний основного материала и образцов после ремонта с экспериментальным присадочным материалом системы Ni–Co–Cr приведены в табл. 2.

По результатам исследований технологических параметров ремонта дефектов литья на литых заготовках из сплавов ВЖЛ718 и ВЖЛ220 методом АрДЭС и механических испытаний выбран состав присадочного материала системы Ni–Co–Cr.

Состав скорректирован по основным легирующим элементам (Cr, W, Mo, Co) для образования глобулярной структуры. Корректировка позволила получить равнопрочность сварного соединения при комнатной температуре при механических испытаниях сплава ВЖЛ718 после ремонта. Модифицированному составу присвоена марка Св-ВЖ183.

Таблица 2

Результаты испытаний основного материала сплавов ВЖЛ220, ВЖЛ718 и образцов после ремонта на кратковременную и длительную прочность при комнатной и повышенных температурах

Свойства	Значения свойств, МПа, для сплава				Коэффициент ослабления сварного соединения к основному материалу сплава ВЖЛ220/ВЖЛ718
	ВЖЛ220		ВЖЛ718		
	без присадки	с экспериментальным составом	без присадки	с экспериментальным составом	
$\sigma_{\text{в}}^{20^{\circ}}$	1075	1095	1110	1050	1/0,94
$\sigma_{\text{в}}^{650^{\circ}}$	970	1070	825	840	0,9/1
$\sigma_{\text{в}}^{750^{\circ}}$	745	775	–	–	1/–
$\sigma_{\text{в}}^{650^{\circ}}$ на базе 110 ч	710	568	610	488	0,8/0,8
$\sigma_{\text{в}}^{750^{\circ}}$ на базе 110 ч	390	312	–	–	0,8/–

Проведены испытания образцов из сплавов ВЖЛ718 и ВЖЛ220 после ремонта с присадочным материалом марки Св-ВЖ183 на кратковременную прочность при температурах 20, 650 и 750 °С и длительную прочность при температурах 650 и 750 °С (табл. 3).

Таблица 3

Результаты испытаний образцов после ремонта на кратковременную и длительную прочность при комнатной и повышенных температурах

Свойства	Значения свойств, МПа, для сплава				Коэффициент ослабления сварного соединения к основному материалу сплава ВЖЛ220/ВЖЛ718
	ВЖЛ220		ВЖЛ718		
	с присадочным материалом Св-ВЖ183	основной материал	с присадочным материалом Св-ВЖ183	основной материал	
$\sigma_{\text{в}}^{20^{\circ}}$	1250	1250	1041	1040	1/1
$\sigma_{\text{в}}^{650^{\circ}}$	1070	1070	800	800	1/1
$\sigma_{\text{в}}^{750^{\circ}}$	780	780	–	–	1/–
$\sigma_{\text{в}}^{650^{\circ}}$ на базе 110 ч	568	710	610	488	0,8/0,8
$\sigma_{\text{в}}^{750^{\circ}}$ на базе 110 ч	312	390	–	–	0,8/–

По результатам испытаний выявлено достижение необходимых прочностных характеристик литых заготовок из сплавов ВЖЛ718 и ВЖЛ220 с применением доработанного присадочного материала Св-ВЖ183.

Заключения

Разработанный присадочный материал и технологии ремонта литейных дефектов при изготовлении литых заготовок предназначены для производства деталей газотурбинных двигателей из новых сплавов ВЖЛ220 и ВЖЛ718 применительно к перспективному двигателю ПД-8.

По результатам испытаний образцов, выполненных методом ручной АрДЭС, после ремонта установлено, что состав присадочного материала Св-ВЖ183 позволяет получить литую заготовку без дефектов и обеспечить равнопрочность ($K = 1$ для кратковременной прочности) при температурах 20 и 650 °С для сплавов ВЖЛ718 и ВЖЛ220, при 750 °С – для сплава ВЖЛ220, а также длительную прочность не менее 0,8 от прочности основного материала при рабочей температуре 650 °С для сплавов ВЖЛ718 и ВЖЛ220, при 750 °С – для сплава ВЖЛ220.

По результатам испытаний установлено, что образцы, изготовленные из сплавов ВЖЛ718 и ВЖЛ220, достигают необходимых технологических свойств для введения заготовок в эксплуатацию после ремонта с присадочным материалом Св-ВЖ183.

Список источников

1. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М., Неруш С.В., Крупнина О.А. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 1. Материалы и технологии синтеза // *Электromеталлургия*. 2022. № 1. С. 2–12.
2. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Бакрадзе М.М., Неруш С.В., Крупнина О.А. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 2. Компенсация и контроль отклонений, ГИП и термическая обработка // *Электromеталлургия*. 2022. № 2. С. 2–12.
3. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В., Базылева О.А., Мазалов И.С., Дынин Н.В. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 3. Адаптация и создание материалов // *Электromеталлургия*. 2022. № 4. С. 15–25.
4. Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В., Базылева О.А., Мазалов И.С. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 4. Разработка жаропрочных материалов // *Электromеталлургия*. 2022. № 5. С. 8–19.
5. Князев А.Е., Мин П.Г. Сравнение характеристик металлопорошковых композиций сплава ВЖЛ718, изготовленных методами PREP и VEGA, после селективного лазерного сплавления // *Металлург*. 2024. № 4. С. 48–58.
6. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Колесников С.И., Чемов Д.А. Влияние примесей на механические и эксплуатационные свойства литейного жаропрочного никелевого сплава ВЖМ200 // *Труды ВИАМ*. 2024. № 10 (140). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.05.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-13-23.
7. Мин П.Г., Вадеев В.Е., Рогалев А.М., Князев А.Е. Исследование химического состава, структуры и механических свойств сплава ЭП648 на различных этапах аддитивного производства // *Материаловедение*. 2018. № 12. С. 17–22.
8. Mostafa A., Rubio I.P., Brailovski V. et al. Structure, Texture and Phases in 3D Printed IN718 Alloy Subjected to Homogenization and HIP Treatments // *Metals*. 2017. No. 7. P. 196–219. DOI: 10.3390/met7060196.
9. El-Bagoury N., Hessien M.M., Alsawat M. et al. Optimization of Microstructure and Mechanical Properties of Hipped Inconel 718 by Various Heat Treatment Processes // *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2019. Vol. 8. P. 642–655. DOI: 10.1007/s13632-019-00568-7.
10. Лощинин 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.
11. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Монин С.А. Влияние среднего напряжения цикла на характеристики малоциклового усталости жаропрочного никелевого сплава ВЖ175 // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 1 (70). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 15.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-126-136.

12. 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: 15.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.
13. 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: 15.05.2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
14. Присадочный материал на основе никеля: пат. 2373038 Рос. Федерация; заявл. 02.06.08; опубл. 20.11.09.
15. Присадочный материал на основе никеля: пат. 2304499 Рос. Федерация; заявл. 10.11.05; опубл. 20.08.07.
16. Жаропрочный сплав на основе никеля и изделие, выполненное из этого сплава: пат. 2285059 Рос. Федерация; заявл. 24.03.05; опубл. 10.10.06.
17. Жаропрочный свариваемый сплав на основе никеля и изделие, выполненное из этого сплава: пат. 2301277 Рос. Федерация; заявл. 20.12.05; опубл. 20.06.07.
18. Weldable oxidation resistant nickel-iron-chromium-aluminium alloy: pat. 8506883 US; appl. 12.12.07; publ. 18.06.09.
19. Nickel-chromium-iron-aluminium alloy: pat. 4671931 US; appl. 11.05.84; publ. 09.06.87.
20. Superalloy repair welding using multiple alloy powders: pat. 8618434 US; appl. 22.03.10; publ. 22.09.11.
21. Repaired turbine exhaust strut heat shield vanes and repair methods: pat. 8083465 US; appl. 05.09.08; publ. 11.03.10.

References

1. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M., Nerush S.V., Krupnina O.A. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 1. Materials and synthesis technologies. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 1, pp. 2–12.
2. Kablov E.N., Evgenov A.G., Bakradze M.M., Nerush S.V., Krupnina O.A. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 2. Compensation and control of deviations, GIP and heat treatment. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 2, pp. 2–12.
3. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V., Bazyleva O.A., Mazalov I.S., Dynin N.V. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 3. Adaptation and creation of materials. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 4, pp. 15–25.
4. Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V., Bazyleva O.A., Mazalov I.S. New generation materials and digital additive technologies for the production of resource parts of FSUE VIAM. Part 4. Development of heat-resistant materials. *Elektrometallurgiya*, 2022, no. 5, pp. 8–19.
5. Knyazev A.E., Min P.G. Comparison of characteristics of metal powder compositions of VZhL718 alloy, manufactured by PREP and VEGA methods, after selective laser melting. *Metallurg*, 2024, no. 4, pp. 48–58.
6. Min P.G., Vadeev V.E., Kolesnikov S.I., Chemov D.A. The effect of impurities on mechanical and operational properties of the cast nickel-base superalloy VZhM200. *Trudy VIAM*, 2024, no. 10 (140), paper no. 02. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 15, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-10-13-23.
7. Min P.G., Vadeev V.E., Rogalev A.M., Knyazev A.E. Study of chemical composition, structure and mechanical properties of EP648 alloy at various stages of additive manufacturing. *Materialovedenie*, 2018, no. 12, pp. 17–22.
8. Mostafa A., Rubio I.P., Brailovski V. et al. Structure, Texture and Phases in 3D Printed IN718 Alloy Subjected to Homogenization and HIP Treatments. *Metals*, 2017, no. 7, pp. 196–219. DOI: 10.3390/met7060196.

9. El-Bagoury N., Hessien M.M., Alsawat M. et al. Optimization of Microstructure and Mechanical Properties of Hipped Inconel 718 by Various Heat Treatment Processes. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 2019, vol. 8, pp. 642–655. DOI: 10.1007/s13632-019-00568-7.
10. 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.
11. Gorbovets M.A., Khodinev I.A., Monin S.A. Influence of average cycle stress on characteristics of low-cycle fatigue of high-temperature nickel alloy VZh175. *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 1 (70), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: May 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-1-126-136.
12. 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: May 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-3-14.
13. 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: May 15, 2025). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-3-30-41.
14. *Nickel based filler material*: pat. 2373038 Rus. Federation; appl. 02.06.08; publ. 20.11.09.
15. *Nickel based filler material*: pat. 2304499 Rus. Federation; appl. 10.11.05; publ. 20.08.07.
16. *Heat-resistant nickel-based alloy and product made from this alloy*: pat. 2285059 Rus. Federation; appl. 24.03.05; publ. 10.10.06.
17. *Heat-resistant weldable nickel-based alloy and a product made from this alloy*: pat. 2301277 Rus. Federation; appl. 20.12.05; publ. 20.06.07.
18. *Weldable oxidation resistant nickel-iron-chromium-aluminium alloy*: pat. 8506883 US; appl. 12.12.07; publ. 18.06.09.
19. *Nickel-chromium-iron-aluminium alloy*: pat. 4671931 US; appl. 11.05.84; publ. 09.06.87.
20. *Superalloy repair welding using multiple alloy powders*: pat. 8618434 US; appl. 22.03.10; publ. 22.09.11.
21. *Repaired turbine exhaust strut heat shield vanes and repair methods*: pat. 8083465 US; appl. 05.09.08; publ. 11.03.10.

Информация об авторах

Пантелеев Михаил Дмитриевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Свиридов Александр Владимирович, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Попов Кирилл Николаевич, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Зотов Святослав Дмитриевич, техник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Mikhail D. Panteleev, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

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

Kirill N. Popov, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Svyatoslav D. Zotov, Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 27.06.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 14.07.2025.
The article was submitted 27.06.2025; approved and accepted for publication after reviewing 14.07.2025.