



Акционерное общество «КОМПОЗИТ»



Пионерская ул., д. 4, г. Королёв, Московская область,
Россия, 141070
Телеграф БЕРЕЗА

тел. (495) 513-20-28, 513-23-29
канцелярия 513-22-56, факс (495) 516-06-17
e-mail: info@kompozit-mv.ru

ОКПО 56897835, ОГРН 1025002045813, ИНН / КПП 5018078448 / 501801001

В диссертационный совет 31.1.002.01
при НИЦ «Курчатовский институт»- ВИАМ,
по адресу: 105005, г. Москва, ул. Радио д. 17

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Неруша Святослава Васильевича «ЖАРОПРОЧНЫЕ НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ: особенности химического состава, структуры, механических и прочностных характеристик», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.17. «Материаловедение» (технические науки)

Актуальность темы диссертационной работы:

Создание материалов для рабочих лопаток и сопловых аппаратов турбины низкого давления перспективных газотурбинных двигателей, изготавливаемых методами аддитивных технологий и работающих при 800–1000 °С, относится к числу первоочередных задач отечественного авиадвигателестроения. Задача осложнена тем, что высокая объёмная доля упрочняющей γ' -фазы, необходимая для достижения требуемого уровня жаропрочности, одновременно обуславливает склонность материала к растрескиванию в процессе селективного лазерного сплавления (СЛС). Накопленный мировой и отечественный опыт показывает, что перенос литейных сплавов в технологию СЛС является трудоёмким процессом, при этом в процессе послойного сплавления возможно образование дефектов в виде пор и трещин, а также наблюдается анизотропия структуры и свойств.

Данная особенность материала, полученного СЛС, связана со спецификой процесса: высокие градиенты температур, скорости кристаллизации ванны расплава, термические напряжения, столбчатая структура зёрен. В связи с этим возникает актуальная задача разработки новых сплавов, система легирования которых учитывает особенности послойного сплавления.

Работа С.В. Неруша посвящена разработке сплавов непосредственно под условия послойного синтеза и созданию на этой основе сплавов ВЖС1 (объёмная доля γ' -фазы 35–40 %, рабочая температура до 900 °С) и ВЖС3 (около 60 %, рабочая температура до 1000 °С).

Актуальность диссертационной работы подтверждается её выполнением в рамках следующих проектов:

1. Дорожная карта «По разработке и внедрению нового жаропрочного никелевого сплава применительно к изготовлению заготовок рабочих лопаток и сопловых аппаратов ТНД двигателя ПД-35(26) методом селективного лазерного сплавления» с АО «ОДК-Авиадвигатель».

2. НИР «Исследование и разработка экспериментальных составов новых жаропрочных никелевых сплавов применительно к изготовлению рабочих лопаток и сопловых аппаратов ТНД методом селективного лазерного сплавления», шифр ССВ-253 в рамках Программы деятельности предприятия на 2024–2025 гг.

Целью диссертационной работы является установление критерия трещиностойкости, особенностей химического состава, структуры, прочностных характеристик и разработка новых жаропрочных никелевых сплавов с объёмной долей γ' -фазы от 35 до 70 % для применения в аддитивной технологии селективного лазерного сплавления.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Предложен обобщённый критерий трещиностойкости E для жаропрочных никелевых сплавов, получаемых методом селективного лазерного сплавления, объединяющий в едином безразмерном функционале три механизма растрескивания с учётом химического состава и кинетики

выделения γ' -фазы: кристаллизационные (горячие), холодные и ликвационные трещины. Подтверждена применимость предложенного критерия E для оптимизации химического состава и создания новых жаропрочных никелевых сплавов с объемной долей γ' -фазы от 35 до 70 % не склонных к образованию трещин при селективном лазерном сплавлении.

2. Установлен эффект подавления зародышеобразования избыточной γ' -фазы в пересыщенной метастабильной субструктуре сплава ВЖС1, сформированной в процессе селективного лазерного сплавления, обусловленный влиянием высоких скоростей кристаллизации микрообъемов ванны расплава и широкой однофазной областью существования γ -твердого раствора, способствующий предотвращению образования трещин.

3. Установлено формирование двойников отжига в структуре рекристаллизованных зерен синтезированного сплава ВЖС1 после полной термической обработки, способствующих повышению уровня сопротивления ползучести, при этом в сплаве доминирует дислокационный механизм ползучести с выраженным вкладом γ' -фазы и карбидов в упрочнение, что определяют полученные значения степенного показателя напряжения $n = 6,24$ и эффективной энергии активации ползучести $Q_c \approx 613$ кДж/моль.

4. Установлено бимодальное распределение γ' -фазы в синтезированных сплавах ВЖС1 и ВЖС3 после полной термической обработки, что определяет высокий уровень механических свойств во всем интервале рабочих температур. При этом для сплава ВЖС1 первичные и вторичные частицы γ' -фазы имеют исключительно округлую форму, тогда как для сплава ВЖС3 – первичная γ' -фазы имеет кубоидную морфологию, что обусловлено различным содержанием объемной доли γ' -фазы и различными значениями мисфита.

Практическая значимость полученных результатов:

1. Создан новый жаропрочный никелевый сплав марки ВЖС1 с рабочей температурой до 900 °С (механические свойства при 20 °С $\sigma_b = 1446$ МПа, $\sigma_{0,2} = 959$ МПа, $\delta = 19,3$ %, при 900 °С $\sigma_b = 504$ МПа, $\sigma_{0,2} = 469$ МПа, $\delta = 9,7$ %, $n = 6,24$).

$\sigma_{100}^{800} = 420$ МПа), превосходящий по уровню свойств все отечественные жаропрочные сплавы, применяемые в технологии селективного лазерного сплавления, заявка на изобретение № 2026105665 от 03.03.2026 г.

2. Создан высоколегированный жаропрочный никелевый сплав марки ВЖСЗ с объемной долей γ' -фазы 63-67 % и рабочей температурой до 1000 °С (механические свойства при 20 °С: $\sigma_B = 1354$ МПа, $\sigma_{0,2} = 876$ МПа, $\delta = 24,5$ %, при 1000 °С: $\sigma_B = 446$ МПа, $\sigma_{0,2} = 340$ МПа, $\delta = 6,2$ %, $\sigma_{100}^{1000} = 130$ МПа), не имеющий прямых аналогов для технологии селективного лазерного сплавления, заявка на изобретение № 2026105667 от 03.03.2026 г.

3. Разработаны технологические параметры селективного лазерного сплавления металлопорошковой композиции жаропрочного никелевого сплава марки ВЖС1, выпущена ТР 1.2.3195-2025. Разработаны режимы газостатической и термической обработки сплава ВЖС1, выпущена ТР 1.2.3196-2025.

4. Разработаны технологические параметры селективного лазерного сплавления металлопорошковой композиции жаропрочного никелевого сплава марки ВЖСЗ, выпущена ТР 1.2.3236-2026. Разработаны режимы газостатической и термической обработки сплава ВЖСЗ, выпущена ТР 1.2.3239-2026.

5. Проведены огневые стендовые испытания крыльчатки турбины из жаропрочного никелевого сплава ВЖС1 в составе малоразмерного газотурбинного двигателя тягой 80 кгс разработки ОАО «ЛИИП им. Гризодубовой В.С.» По результатам испытаний составлен Акт об опробовании и внедрении, принято решение о применении разработанного сплава в серийном изготовлении турбин.

6. В АО «ОДК-Авиадвигатель» проведен комплекс механический испытаний на растяжение, длительную прочность и многоцикловую усталость синтезированного жаропрочного никелевого сплава ВЖС1 с расчетом ресурса работы рабочих лопаток и сопловых аппаратов турбины низкого давления двигателя ПД-26. По результатам испытаний составлен Акт о внедрении с заключением главного конструктора о возможности применения

разработанного сплава для изготовления рабочих лопаток и сопловых аппаратов турбины низкого давления двигателя ПД-26 по технологии селективного лазерного сплавления.

Структура работы:

Диссертация изложена на 249 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, общих выводов и заключения, списка литературы из 157 источников и приложения, содержит 69 рисунков и 14 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и пять задач исследования, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, сведения о степени достоверности и апробации результатов.

Первая глава содержит аналитический обзор литературы: рассмотрены аддитивные технологии и промышленное применение жаропрочных никелевых сплавов, явление ползучести, механизмы упрочнения, а также мировой и отечественный опыт получения жаропрочных сплавов методами аддитивного производства.

Вторая глава содержит описание материалов и методов: получение металлопорошковых композиций методом газовой атомизации, термодинамическое моделирование, изготовление образцов методом СЛС в двух ориентациях построения (XZ и XY), два режима термической обработки, комплекс методов структурных исследований (подготовка шлифов, СЭМ, EBSD, ПЭМ, включая SAED, HRTEM и STEM/EDS) и методы механических испытаний – на кратковременное одноосное растяжение, на ползучесть и на длительную прочность.

Третья глава посвящена разработке критерия трещиностойкости и исследованию жаропрочного никелевого сплава ВЖС1 для селективного лазерного сплавления. Приведены выбор базовой системы легирования (IN939) и подход к оптимизации состава на основе критерия трещиностойкости. Показано, что в состоянии после синтеза сплав представляет собой пересыщенный γ -твёрдый раствор с ячеисто-дендритной субструктурой, без выделений γ' -фазы; после полной термической обработки

формируется бимодальная γ/γ' -структура с объёмной долей γ' -фазы 35–40 % и округлой морфологией выделений. Установлено, что рекристаллизационный отжиг приводит к формированию равноосной зёрненной структуры с размером зерна 40–100 мкм и устранению столбчатой текстуры, а также к образованию двойников отжига $\Sigma 3$. По результатам механических испытаний определены значения предела прочности, условного предела текучести и относительного удлинения в интервале температур 20–950 °С для двух режимов термической обработки (ТО1, ТО2) и двух ориентаций построения (XZ, XY). Показано, что состояние XZ, ТО1 обеспечивает наиболее устойчивое сочетание прочности и пластичности в рабочем интервале 800–950 °С. По испытаниям на ползучесть при 850–950 °С определены показатели $n \approx 6.24$ и $Q \approx 613$ кДж/моль; по испытаниям на длительную прочность при 800 и 900 °С получены значения времени до разрушения и построены диаграммы Ларсона–Миллера. Установлено, что по уровню длительной прочности сплав ВЖС1 сопоставим с литыми IN939 и IN713LC и превосходит синтезированные сплавы ЭП648-ПС и ВЖ159-ПС.

Четвёртая глава посвящена разработке и исследованию высокопрочного жаропрочного никелевого сплава ВЖС3 для селективного лазерного сплавления. Описаны постановка задачи обратного проектирования, процедура многокритериальной оптимизации состава в 12-мерном пространстве легирующих элементов и расчётные термодинамические параметры сплава. Показано, что сплав содержит около 60 % γ' -фазы, а интервал между температурой солидус и температурой растворения γ' -фазы составляет около 120 °С, что существенно шире, чем у известных аналогов с сопоставимой долей упрочняющей фазы. Приведены результаты исследования микроструктуры синтезированного материала: после полной термической обработки формируется бимодальная γ/γ' -структура с кубоидной морфологией первичных выделений γ' -фазы и карбидами MC-типа преимущественно по границам зёрен. По результатам испытаний на одноосное растяжение определены значения предела прочности, условного предела текучести и относительного удлинения при 20, 800, 900 и

1000 °С. По испытаниям на длительную прочность при 800, 900 и 1000 °С получены значения времени до разрушения и построена диаграмма Ларсона–Миллера. Установлено, что уровень длительной прочности сплава ВЖС3 сопоставим с литыми промышленными сплавами, включая IN738LC, и приближается к уровню CM247LC.

Пятая глава посвящена апробации и внедрению результатов работы: постановке задачи апробации, изготовлению заготовки детали «Крыльчатка турбины» из сплава ВЖС1 методом СЛС и её натурным испытаниям в составе малоразмерного газотурбинного двигателя. Описаны методики и результаты контроля заготовки после испытаний: визуальный осмотр и капиллярный контроль, цифровая радиография, контроль геометрии методом лазерного 3D-сканирования. Показано, что по данным всех трёх методов контроля внутренние и поверхностные дефекты, а также деформации, вызванные эксплуатационным нагружением, отсутствуют. Приведены сведения о внедрении полученных результатов в рамках Дорожной карты по двигателю ПД-35(26) и НИР шифр ССВ-253.

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Достоверность результатов обеспечена применением аттестованного оборудования и стандартизованных методик испытаний по ГОСТ, использованием взаимодополняющих методов структурного анализа различного пространственного разрешения, проведением параллельных испытаний на каждом уровне нагружения при определении характеристик длительной прочности и перекрёстной проверкой кинетических параметров ползучести двумя независимыми процедурами обработки данных. Дополнительным подтверждением служит опробование сплава на реальной детали сложной геометрии.

По теме диссертации опубликовано По теме диссертации опубликовано 7 научных работ, из них 6 – в изданиях, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки России, получен 1 патент и поданы 2 заявки на изобретения Российской Федерации. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: III

Международный форум новых материалов, химии и технологий, круглый стол в рамках выставки «Металлообработка-2026» и XVIII Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «Тестмат».

Замечания по диссертационной работе

Замечание №1.

В работе не приведена таблица с массовыми долями всех легирующих элементов для сплавов ВЖС1 и ВЖС3, что затрудняет их анализ. Также отсутствуют данные по физическим характеристикам (плотности, коэффициенту теплового расширения, теплопроводности и теплоёмкости и т.д.). Замена титана на тантал и рений увеличивает плотность сплава, что может сказаться на центробежных нагрузках в рабочих лопатках; расчёт удельной прочности был бы полезен для оценки целесообразности такого легирования. Приведение теплофизических характеристик и сравнение с другими сплавами способствовало бы более однозначной оценке разработанных материалов.

Замечание №2.

На представленных кривых ползучести не всегда отчётливо выражена вторая стадия с постоянной скоростью деформации. Скорость меняется, что может указывать на неустановившийся режим. Определение минимальной скорости ползучести как наклона на выбранном участке в таком случае требует дополнительного обоснования, поскольку рассчитанные значения $n = 6.24$ и $Q_c = 613$ кДж/моль могут оказаться недостаточно надёжными для прогнозирования ресурса. Отсутствие явной стационарной стадии может быть связано с эволюцией структуры в процессе испытания; структурный анализ образцов после ползучести помог бы прояснить этот вопрос.

Замечание №3.

Ориентация на ЖС IN939 “в качестве отправной точки оптимизации химического состава» (цитирую автора) для создания нового сплава кажется спорной. Как отмечено автором, сплав IN939 не содержит Re, Ru и характеризуется относительно небольшим количеством упрочняющей γ' -

фазы (около 35 %). Однако известно, что именно введение Re и Ru и повышение объемной доли упрочняющей γ' - фазы до $\sim 60\%$ привело к созданию лучших никелевых ЖС (ВЖМ4 и др.). Поэтому выбор IN939 в качестве основы линейки новых ЖС неизбежно приведет к потере уровня жаропрочности. Кстати, во втором ЖС (ВЖС3), также представленном в диссертации, Re добавлен и повышено содержание γ' - фазы, и это соответствует логике увеличения жаропрочности.

Замечание №4.

В работе приведены данные о выделениях, обогащённых Nb, Ti, Ta и C, которые интерпретируются как карбиды типа MC. Однако для однозначной идентификации фазовой природы таких частиц желательно представлять данные микродифракции с определением межплоскостных расстояний. При скоростях охлаждения, характерных для СЛС, в междендритных областях преимущественно образуются фазы Лавеса или метастабильные карбидные фазы, имеющие схожий химический состав, но иную кристаллическую решётку и меньшую термическую стабильность, тогда как формирование стабильных карбидов типа MC и $M_{23}C_6$ существенно затруднено. Кроме того, остаётся неясным, сохраняется ли природа частиц, обогащённых Nb, Ti, Ta и C, после ГИП и термической обработки в СЛС-образцах. Дополнительные дифракционные данные позволили бы подкрепить выводы о карбидной природе частиц и их роли в жаропрочности.

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости и актуальности диссертационной работы.

Заключение о соответствии диссертации требованиям ВАК

Диссертационная работа выполнена на высоком экспериментальном уровне и содержит новые научные результаты, имеющие значение для материаловедения жаропрочных никелевых сплавов и аддитивного производства ответственных деталей газотурбинных двигателей. В работе решена актуальная научно-техническая задача создания отечественных

жаропрочных никелевых сплавов, сочетающих бездефектность синтеза методом селективного лазерного сплавления с уровнем жаропрочности литейных аналогов. Объём публикаций и апробация результатов отвечают требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертационная работа Неруша Святослава Васильевича «ЖАРОПРОЧНЫЕ НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ: особенности химического состава, структуры, механических и прочностных характеристик» соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Неруш Святослав Васильевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. - Материаловедение (технические науки).

Официальный оппонент,
Доктор технических наук



А.И. Логачёва
21.09. 2026г.

Подпись Логачёвой Аллы Игоревны удостоверяю

Директор по кадрам АО «Композит»



Б.Н. Елаков

Логачева Алла Игоревна,
доктор технических наук,
начальник отделения металлических материалов и металлургических технологий
Акционерного общества «Композит»
Адрес: 141070, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, д.4.
Телефон: 8(495)513-21-26
Адрес электронной почты: info@kompozit-mv.ru