

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),
доктор экономических наук,
профессор



П.А. Дроговоз

2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Актуальность темы диссертационной работы

Создание газотурбинных двигателей нового поколения относится к числу задач, от решения которых напрямую зависит технологический суверенитет страны в области авиационного двигателестроения. В программе создания перспективного двигателя ПД-26 разработки АО «ОДК-Авиадвигатель» рабочие лопатки и сопловые аппараты турбины низкого давления, работающие при температурах 800-1000 °С, относятся к наиболее ответственному классу деталей горячего тракта. Именно материал этих деталей в конечном счёте определяет и ресурс двигателя, и его удельные характеристики, и саму возможность выхода изделия на заявленные параметры.

Аддитивные технологии дают отрасли то, чего традиционное литьё по выплавляемым моделям дать не может, а именно скорость. Коэффициент ис-

пользования материала при селективном лазерном сплавлении (СЛС) не превышает 1,5 против 5-10 при литье с последующей механической обработкой, а путь от трёхмерной модели до готовой заготовки сокращается с месяцев до дней. Для программы создания нового двигателя это означает возможность итеративно оптимизировать конструкцию лопатки непосредственно на этапе стендовых испытаний, не изготавливая всякий раз дорогостоящую литейную оснастку. Моноблочные конструкции без сварных швов, внутренние каналы охлаждения произвольной топологии, снижение массы узла. Иными словами, аддитивное производство - это не просто новый способ изготовления отдельной детали, а инструмент сокращения сроков создания двигателя в целом.

Однако весь этот потенциал до последнего времени упирался в отсутствие материала. Ни один из промышленных жаропрочных никелевых сплавов с объёмной долей γ' -фазы выше 30–35 % - ни IN738LC, ни IN939, ни CM247LC, ни MAR-M-247, ни отечественные ВЖЛ12У, ЖС6У и ЖС32 - для послойного синтеза непригоден: в неравновесных условиях СЛС при скоростях охлаждения 10^5 - 10^6 К/с и температурных градиентах свыше 10^6 К/м эти сплавы растрескиваются. Показательны приведённые в обзоре данные: из двенадцати сплавов, синтезированных в идентичных условиях, шесть дали трещины с плотностью до 12 мм^{-1} . Многолетние попытки убрать проблему подбором параметров процесса - мощности излучения, скорости сканирования, шага штриховки, стратегии заполнения успехом не увенчались, и это закономерно: составы литейных сплавов оптимизировались под скорости охлаждения 10^0 – 10^2 К/с, то есть под условия, отличающиеся от условий послойного синтеза на четыре-пять порядков. Проще говоря, материалов, пригодных для аддитивного изготовления высоконагруженных деталей турбины, до настоящей работы попросту не существовало.

Диссертационная работа С.В. Неруша отвечает на этот вызов иначе, чем всё, что делалось прежде: не адаптировать существующий сплав к технологии, а спроектировать сплав под технологию. Созданные в работе жаропрочные никелевые сплавы ВЖС1 и ВЖС3 являются первыми отечественными материалами такого класса - сплавами, изначально спроектированными под условия селективного лазерного сплавления, а не приспособленными к ним постфактум. Сплав ВЖС3 с объёмной долей γ' -фазы около 60 % и рабочей температурой до 1000 °С прямых аналогов не имеет ни в отечественной, ни в мировой практике: до настоящей работы ни одна исследовательская группа в мире не продемонстрировала бездефектного синтеза поликристаллического никелевого сплава с такой долей упрочняющей фазы без подогрева подложки выше 200 °С. Речь, таким образом, идёт не об улучшении известного решения, а о

создании нового класса материалов для аддитивного производства - и о снятии того ограничения, которое до сих пор отделяло аддитивные технологии от самых нагруженных деталей турбины.

Работа выполнялась в рамках Дорожной карты «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», утверждённой академиком РАН А.А. Иноземцевым, и научно-исследовательской работы шифр ССВ-253. У работы есть конкретный заказчик, конкретная деталь и конкретный срок внедрения, а полученные результаты уже доведены до актов об опробовании и внедрении. Тема диссертации отвечает приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и решает научно-техническую задачу, имеющую существенное значение для отечественного авиационного двигателестроения.

Структура и краткое содержание работы

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

Первая глава представляет собой аналитический обзор. Наиболее полезной его частью является разбор пяти групп существующих подходов к оценке трещиностойкости с указанием границ применимости каждой: обзор не ограничивается перечислением, а показывает, чего именно каждому подходу недостаёт, и логично подводит к постановке пяти задач исследования. Отдельно отметим раздел об отечественном опыте (ЭП648, ВЖ159 и другие составы) - он задаёт ту систему координат, в которой затем и оцениваются полученные результаты. Вторая глава описывает материалы и методы: получение металлопорошковых композиций газовой атомизацией, термодинамическое моделирование, синтез образцов в двух ориентациях построения, два режима термической обработки, комплекс структурных методов (СЭМ, EBSD, просвечивающая микроскопия с SAED, HRTEM и STEM/EDS) и механические испытания на растяжение, ползучесть и длительную прочность.

Третья глава - центральная по объёму и содержанию. В ней построен обобщённый критерий трещиностойкости Ξ как отношение функционала пластической релаксации к функционалу накопления дефектов, интегрируемых по времени термического цикла и объёму зоны термического влияния; кинетика выделения упрочняющей фазы введена уравнением Джонсона–Мела–Ав-

рами–Колмогорова. Критерий откалиброван и проверен на выборке из 15 сплавов, выполнен глобальный анализ чувствительности методом Соболя, по результатам которого сформулированы пять направлений модификации системы легирования IN939 и разработан сплав ВЖС1. Далее прослежена эволюция структуры по пяти стадиям термической обработки, приведены кратковременные свойства для трёх структурных состояний и результаты испытаний на ползучесть с определением параметров $n \approx 6,24$ и $Q \approx 613$ кДж/моль.

Четвёртая глава решает обратную задачу - от целевых свойств к составу - в двенадцатимерном пространстве легирования при одновременных ограничениях на равновесную долю γ' -фазы, интервал кристаллизации, температуру сольвуса, характерное время зарождения γ' и стабильность к образованию топологически плотноупакованных фаз. Результатом является сплав ВЖС3 с рабочей температурой до 1000 °С, синтезируемый без трещин при подогреве подложки не выше 200 °С. Пятая глава посвящена апробации на детали: из сплава ВЖС1 изготовлена моноблочная заготовка «Крыльчатка турбины» с тонкостенным лопаточным венцом, проведены огневые стендовые испытания в составе малоразмерного газотурбинного двигателя тягой 80 кгс, после чего заготовка проконтролирована капиллярным методом, цифровой радиографией и бесконтактным лазерным 3D-сканированием с построением карт отклонений относительно исходной CAD-модели.

Научная новизна и теоретическая значимость

Главным новым результатом работы является сам критерий Ξ . В отличие от эмпирических индексов $[Al + Ti]$ и SAC, а также критериев RDG и SCI, описывающих исключительно кристаллизационное растрескивание, он собирает в одном безразмерном функционале три механизма сразу и связывает их с химическим составом через кинетику выделения γ' -фазы. Установлено, что для системы легирования IN939 в характерных для СЛС условиях на долю деформационного старения приходится 65–70 % функционала накопления дефектов, - этим и объясняется, почему критерии, ориентированные на горячие трещины, для данного класса сплавов работают неудовлетворительно.

Анализ чувствительности показал, что 47 % дисперсии критерия дают всего два параметра - температура сольвуса γ' -фазы и характерное время её зарождения. Отсюда следует не умоуменьшаемая, а физически обоснованная стратегия легирования: частичная замена титана ниобием для сплава ВЖС1 и переход к танталу и рению для сплава ВЖС3.

Ценным представляется установленный эффект подавления зародышеобразования избыточной γ' -фазы в пересыщенной метастабильной субструктуре сплава ВЖС1, формирующейся при синтезе. Он подтверждён отсутствием сверхструктурных отражений $L1 \square$ на электронограммах и отсутствием пространственной корреляции карт распределения Al и Ti при STEM/EDS-картировании, то есть двумя независимыми по природе методами. Установлено также формирование в рекристаллизованных зёрнах сети когерентных двойниковых границ $\Sigma 3$, бимодальное распределение γ' -фазы в обоих сплавах и различие её морфологии - округлой в ВЖС1 и кубоидной в ВЖС3.

Теоретическое значение имеет методология обратного проектирования: переход от требуемых эксплуатационных характеристик к химическому составу через условие $\Xi > \Xi_{кр}$ при наборе физических ограничений. Показано, что при равновесной доле γ' -фазы не ниже 55 % указанным ограничениям не удовлетворяет ни один из существующих промышленных сплавов, - что и обосновывает новизну композиции ВЖС3.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Достоверность полученных результатов обеспечена применением аттестованного оборудования и испытаниями по действующим ГОСТ, использованием взаимодополняющих структурных методов разного пространственного разрешения (от оптической металлографии до просвечивающей микроскопии высокого разрешения), проведением параллельных испытаний на каждом уровне нагружения и перекрёстным определением кинетических параметров ползучести двумя независимыми процедурами обработки данных (изонапряжённая интерполяция и глобальная аппроксимация уравнением Нортон), давшими согласованный результат. Существенно, что ключевые структурные выводы не опираются на единственный метод: отсутствие γ' -фазы после синтеза подтверждено морфологически, дифракционно и химически, а её появление после полной термической обработки - теми же тремя способами.

Дополнительным подтверждением служит апробация на реальной детали сложной геометрии, где неоднородность теплоотвода при послойном синтезе заведомо выше, чем на образцах-свидетелях стандартной формы.

По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, из них 8 - в изданиях Перечня ВАК при Минобрнауки России, получено 2 патента Российской Федерации на изобретение и подана 1 заявка. Результаты доложены на III Международном форуме новых материалов, химии и технологий, круглом столе выставки «Металлообработка-2026» и XVIII Всероссийской конференции «Тестмат». Автореферат отражает содержание диссертации.

Практическая значимость и рекомендации по использованию результатов

Практическая часть работы доведена до состояния, редкого для кандидатской диссертации. Создан сплав ВЖС1 с рабочей температурой до 900 °С (при 20 °С $\sigma_B \approx 1450$ МПа, $\sigma_{0.2} \approx 960$ МПа, $\delta_5 = 19,3$ %; при 900 °С $\sigma_B \approx 500$ МПа, $\sigma_{0.2} \approx 470$ МПа, $\delta_5 = 9,7$ %; σ_{100} при 800 °С ≈ 420 МПа), на состав которого подана заявка на изобретение № 2026105665 от 03.03.2026 г. Создан высоколегированный сплав ВЖС3 с рабочей температурой до 1000 °С (σ_{100} при 1000 °С ≈ 130 МПа), защищённый патентом Российской Федерации RU 2865727 от 08.07.2026 г. Выпущены технологические рекомендации на параметры синтеза и режимы газостатической и термической обработки для обоих сплавов: ТР 1.2.3195-2025 и ТР 1.2.3196-2025, ТР 1.2.3236-2026 и ТР 1.2.3239-2026.

Самостоятельным практическим достижением считаем бездефектный синтез поликристаллического материала с объёмной долей γ' -фазы около 60 % при подогреве подложки не более 200 °С. Насколько известно, такой результат для данного класса сплавов получен впервые.

Сплав ВЖС1 опробован не на образце, а на детали: изготовлена заготовка крыльчатки турбины с тонкостенными лопатками, проведены огневые стендовые испытания в составе малоразмерного ГТД разработки ОАО «ЛИИП им. Гризодубовой В.С.», составлен акт об опробовании и внедрении, принято решение о применении сплава при серийном изготовлении турбин. В АО «ОДК-Авиадвигатель» выполнен комплекс механических испытаний с расчётом ресурса рабочих лопаток и сопловых аппаратов ТНД двигателя ПД-26 и составлен акт о внедрении с заключением главного конструктора.

Результаты работы рекомендуется использовать в организациях отрасли, занимающихся разработкой жаропрочных материалов и аддитивным изготовлением деталей горячего тракта, а также в учебном процессе при подготовке специалистов по направлениям «Материаловедение» и «Авиационная и ракетно-космическая техника».

Замечания и вопросы по диссертационной работе

Работа оставляет благоприятное впечатление и по объёму экспериментального материала, и по степени его доведения до практического результата. Приведённые ниже замечания принципиального характера не носят, высказаны в порядке обсуждения и переработки диссертации не требуют.

1. В разделе 2.1.1 указано, что содержание газовых примесей и углерода в металлопорошковых композициях контролировалось, однако собственные

значения по кислороду и азоту для порошков ВЖС1 и ВЖС3 в работе не приведены. Не приведены и величины остаточной пористости синтезированного материала после синтеза и после газостатической обработки: в разделе 1.7 такие данные даны только для сплава ЭП648 по литературным источникам. Между тем автор сам убедительно показывает на примере сплава ВЖ159, что оксидные включения на основе иттрия и алюминия сокращают долговечность при 1000 °С более чем вдвое, выступая концентраторами напряжений и очагами зарождения пор. Просим привести устно достигнутые значения по кислороду, азоту и остаточной пористости, а также сообщить, использовался ли порошок повторных просевов и каким образом контролируется изменение его характеристик от цикла к циклу.

2. Наибольшая длительность испытания сплава ВЖС1 составляет около 150 ч, сплава ВЖС3 - около 240 ч, тогда как ресурс деталей ТНД измеряется тысячами часов. Между тем именно знак и величина размерного несоответствия решёток определяют, будет ли при рабочих температурах развиваться направленная коалесценция γ' -фазы и в какой плоскости. В работе для ВЖС1 задано $|\delta| < 0,15 \%$, для ВЖС3 - $|\delta| < 0,2 \%$, но знак мисфита не оговорён. Просим пояснить, какой знак δ даёт расчёт CALPHAD для обоих сплавов, ожидается ли рафтинг при 900–1000 °С и располагает ли автор результатами структурных исследований после выдержек в сотни часов. Для экстраполяции диаграммы Ларсона–Миллера за пределы экспериментального диапазона именно структурный аргумент был бы наиболее убедительным.

3. В разделе 3.4 справедливо указано, что для никелевых сплавов с упрочняющей фазой L1 $\square$ характерна аномальная температурная зависимость предела текучести с максимумом в области 600–800 °С, а бимодальное распределение γ' -фазы должно смещать её температурный интервал и амплитуду. Однако в приведённых данных для сплава ВЖС1 условный предел текучести снижается монотонно во всех трёх структурных состояниях, тогда как для сплава ВЖС3 в интервале 20–800 °С наблюдается фактически площадка - снижение с 876 до 830 МПа, менее 6 %. Просим прокомментировать, подавляется ли аномалия в сплаве ВЖС1 бимодальным распределением выделений и соотношением размеров крупной и мелкой фракций относительно критического размера перехода от перерезания к орвановскому обходу, и связано ли различие в поведении двух сплавов с почти двукратным различием объёмной доли γ' -фазы и с уровнем энергии антифазных границ.

4. При обратном проектировании сплава ВЖС3 содержание хрома снижено, что при равновесной доле γ' -фазы около 60 % и рабочей температуре

1000 °С закономерно. Окислительная стойкость при этом обеспечивается алюминием, однако для деталей ТНД нельзя исключать и сульфидно-оксидную коррозию. Предполагается ли применение защитных покрытий и согласуются ли режимы их нанесения (в частности, диффузионного алитирования) с двухступенчатым старением, либо покрытие потребует отдельной корректировки режима термической обработки?

5. Механические характеристики получены на цилиндрических образцах с диаметром рабочей части в 5 мм, тогда как размер рекристаллизованного зерна после ТО1 составляет 40–100 мкм. В тонкостенных элементах лопатки и в лопаточном венце крыльчатки по толщине сечения укладывается порядка 5–15 зёрен, а при таком соотношении для жаропрочных сплавов известно снижение длительной прочности и особенно пластичности. Планируются ли испытания тонкостенных образцов или образцов, вырезанных непосредственно из синтезированной детали, и каким образом масштабный фактор учтён в расчёте ресурса, выполненном в АО «ОДК-Авиадвигатель»?

6. В работе показано, что сеть когерентных границ $\Sigma 3$ и дискретные карбиды MC-типа обеспечивают сопротивление зернограницному проскальзыванию при ползучести. При этом в самом критерии Ξ третье слагаемое функционала накопления дефектов связано именно с образованием сплошных плёнок карбидов и боридов по границам зёрен. Просим пояснить, какова доля границ $\Sigma 3$ по данным EBSD после полной термической обработки, сохраняется ли она при высокотемпературных выдержках и наблюдалось ли превращение первичных карбидов MC в карбиды типа $M_{23}C_6$ или M_6C с образованием зернограницных выделений. Иными словами, не переходит ли механизм, заложенный в модель как технологический, в разряд эксплуатационных при длительной работе материала.

Высказанные замечания относятся к оформлению материала и к вопросам, выходящим за рамки поставленных в работе задач. Существа полученных результатов - бездефектного синтеза сплавов ВЖС1 и ВЖС3, достигнутого уровня прочностных характеристик и результатов опробования на реальной детали двигателя - они не затрагивают и общей высокой оценки работы не изменяют.

Заключение

Диссертационная работа С.В. Неруша является законченным научно-квалификационным исследованием, выполненным на высоком экспериментальном уровне. В ней решена актуальная научно-техническая задача создания отечественных жаропрочных никелевых сплавов, сочетающих бездефектность

синтеза методом селективного лазерного сплавления с уровнем жаропрочности литейных аналогов, и предложена методология направленного проектирования таких сплавов, доведённая от расчётного критерия до детали, прошедшей натурные испытания в составе двигателя. 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 учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Неруш Святослав Васильевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.17. «Материаловедение» (технические науки).

Диссертационная работа Неруша Святослава Васильевича «ЖАРОПРОЧНЫЕ НИКЕЛЕВЫЕ СПЛАВЫ ДЛЯ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ: особенности химического состава, структуры, механических и прочностных характеристик» рассмотрена и обсуждена в МГТУ им. Н.Э. Баумана на кафедре СМ-12 «Технологии ракетно-космического машиностроения» (15 сентября 2026 года, протокол №04.63-04/2). Отзыв составлен на основании диссертации, автореферата и публикаций С.В. Неруша.

Заведующий кафедрой СМ-12

«Технологии ракетно-космического машиностроения»,
доктор технических наук, профессор

Галиновский А.Л.

Ученый секретарь кафедры СМ12

«Технологии ракетно-космического машиностроения»,
К.т.н., доцент

Филимонов А.С.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет) МГТУ им. Н.Э. Баумана 105005, г.Москва, ул.2-я Бауманская, д.5, стр.1
Телефон: +7 (499) 263-63-91, E-mail: bauman@bmstu.ru