

## **ОТЗЫВ**

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

### ***Актуальность темы диссертационной работы:***

Детали горячей части двигателей (в частности лопатки турбин) работают длительно в неравномерном поле нагрузок при температурах металла более, чем  $1100^{\circ}\text{C}$ , которые кроме того меняются с течением времени в полетных условиях. В частности, лопатки ТНД для двигателя ПД-26, которые послужили одной из инициатив данной диссертационной работы для создания новых материалов, работают при температурах более  $1050^{\circ}\text{C}$ .

Существующие литейные жаропрочные сплавы для изготовления таких деталей ГТД как рабочие и сопловые лопатки обладают высокими прочностными характеристиками статической, длительной прочности и циклической долговечности в условиях длительной эксплуатации и циклического нагружения. Без знания прочностных характеристик в этих диапазонах сложно судить о работоспособности деталей. Однако эти сплавы в виде синтезированных материалов из металлопорошковых композиций (МПК) при 3Д печати подвержены трещинообразованию и не могут быть применены. Неоспоримые преимущества аддитивных технологий, с помощью которых в частности можно кардинально сокращать технологический цикл изготовления сложных деталей, исключая, в том числе, сварные соединения, диктуют необходимость разработки новых жаропрочных сплавов, получаемых синтезом из МПК и обладающих или превосходящих прочностные характеристики литейных аналогов. Это особенно важно, т.к. у получаемых в настоящее время аддитивным методом селективного лазерного

сплавления (СЛС) материалов характеристики длительной прочности значительно ниже, чем у традиционного литого материала. Тоже касается и усталостных характеристик.

Поэтому актуальность представленной диссертационной работы, посвященной разработке новых жаропрочных никелевых сплавов для аддитивной технологии, обладающих необходимыми для использования в авиадвигателестроении характеристиками, не вызывает сомнений.

**Целью** диссертационной работы является разработка новых жаропрочных никелевых сплавов для применения в СЛС процессах на основе установления нового критерия трещиностойкости, позволяющего нивелировать склонность сплава к образованию трещин путем оптимизации химического состава с учетом достижения высокой длительной прочности синтезированного материала после газостатической и термической обработок на уровне близком к литому сплаву-аналогу для рабочих температур 900 – 1000 °С.

***Научная новизна и теоретическая значимость диссертационной работы:***

Предложен обобщенный критерий трещиностойкости жаропрочных никелевых сплавов для СЛС, введенный как отношение функционалов пластической релаксации и накопления дефектов, интегрируемых по времени термического цикла и объёму зоны термического влияния. Критерий позволяет выполнить корректировку химического состава для повышения технологичности и снижения склонности материала к образованию трещин в неравновесных высокоскоростных условиях кристаллизации микрообъемов ванны расплава. Теоретическое значение также имеет методология обратного решения задачи проектирования: переход от целевых эксплуатационных характеристик к химическому составу при условии достижения высокого комплекса физико-механических свойств.

### ***Практическая значимость полученных результатов:***

Разработаны новые жаропрочные сплавы: ВЖС1 с рабочей температурой до 900 °С, превосходящий по уровню свойств длительной прочности все отечественные жаропрочные сплавы, применяемые в технологии СЛС, и новый жаропрочный сплав ВЖС3 с рабочей температурой до 1000 °С, не имеющий прямых аналогов для технологии СЛС. Эти материалы необходимы для создания аддитивными методами деталей горячей части ГТД (в частности рабочих и сопловых лопаток турбины), которые для использования длительно при высоких температурах до сих пор не получены.

### ***Структура работы:***

Диссертационная работа изложена на 249 страницах машинописного текста и состоит из введения, пяти глав, выводов, 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.

В главе 1 приведен аналитический обзор литературных источников по исследованию и применению никелевых сплавов, используемых в аддитивных технологических процессах. Отмечено, что характеристики длительной прочности имеющихся для изготовления методом СЛС никелевых сплавов значительно уступают литым аналогам. Достоинством обзора является критический разбор пяти групп существующих подходов к оценке трещиностойкости с указанием пределов применимости каждой из них.

Во 2 главе проанализированы материалы и имеющиеся методы получения металлопорошковых композиций, изготовления образцов методом селективного лазерного сплавления в двух ориентациях построения, два режима термической обработки, комплекс методов структурных исследований (подготовка шлифов, СЭМ, EBSD, ПЭМ, включая SAED,

HRTEM и STEM/EDS) и методы механических испытаний - на разрыв при растяжении и на длительную прочность.

Глава 3 посвящена разработке критерия трещиностойкости. Обоснован выбор структурного состояния материала - сочетания режима термообработки и ориентации построения, которое даёт наилучший баланс прочности и пластичности в рабочем интервале 800–950 °С. Проведены исследования влияния видов постобработки и анизотропии на механические характеристики кратковременной и длительной прочности на основе испытаний образцов из разработанного сплава ВЖС1.

Глава 4 посвящена разработке и исследованию высокоупрочнённого жаропрочного никелевого сплава ВЖС3 для СЛС. Методом сформулированной и реализованной стратегии обратного проектирования найден состав новой композиции поликристаллического сплава для бездефектного синтеза методом СЛС. Испытания на кратковременную и длительную прочность показали результаты превышающие соответствующие характеристики современных промышленных литых жаропрочных сплавов.

В главе 5 обсуждены результаты контроля неразрушающими методами испытанной крыльчатки (БЛИСК) малоразмерного ГТД, изготовленной из МПК сплава ВЖС1, в составе двигателя в ходе стендовых испытаний при действии эксплуатационных условий. Установлено, что деталь сохранила как структурную целостность, так и геометрическую стабильность.

### ***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.

В выводах сформулированы основные результаты. Разработан обобщённый критерий трещиностойкости для никелевых жаропрочных сплавов, получаемых методом СЛС; на основе оптимизации химического состава разработан жаропрочный сплав ВЖС1 с рабочей температурой до

900°C, превосходящий по длительной прочности все отечественные жаропрочные сплавы, применяемые в технологии СЛС; разработан высоколегированный жаропрочный никелевый сплав марки ВЖС3 с рабочей температурой до 1000°C, не имеющий прямых аналогов для технологии СЛС.

Результаты, полученные в диссертации, отражены в 9 публикациях, из них 8 в изданиях, входящих в перечень ВАК при Минобрнауки России, получено 2 патента и подана 1 заявки на изобретения Российской Федерации. Результаты доложены на III Международном форуме новых материалов, химии и технологий, круглом столе выставки «Металлообработка-2026» и XVIII Всероссийской конференции «Тестмат».

### ***Замечания и вопросы по диссертационной работе***

1. В задачах работы №4 и №5 (стр. 8) указан актуальный для обеспечения работоспособности рабочих и сопловых лопаток турбин диапазон температур 800-1000°C. Анализ же ползучести сплава ВЖС1 проведен для диапазона 850-950, а длительной прочности - 800-900°C; для сплава ВЖС3 длительная прочность определялась для температур 800, 900 и 1000°C. Тогда как необходимо иметь такие характеристики для температур в более широком диапазоне температур от 600 до 1100°C.

2. Не приведены результирующие химические составы новых сплавов ВЖС1 и ВЖС3.

3. Не указано оборудование (3Д принтеры, на которых производился синтез объектов исследования, их характеристики). Как выбирались параметры печати? Зависели ли от них получаемые результаты?

4. Какое количество образцов для каждой точки экспериментов, в частности для определения прочностных характеристик, использовалось? На стр. 164 указано 2-4, на стр. 199 и в таблице 4.2, на рис. 4.4 - по 2 образца для испытаний на длительную прочность. Такое количество образцов мало для обоснования повторяемости результатов. Также не ясно, какое количество образцов из ВЖС3 было испытано для получения характеристик кратковременной прочности при разрыве (табл. 4.1, рис. 4.2, 4.3).

5. В таблице 3.4 для состояния XZ, TO2 при 800 °C условный предел текучести указан выше предела прочности, что является опечаткой и подлежит исправлению. Доверительные интервалы численно одинаковы для всех трёх структурных состояний при каждой температуре. Необходимо указать каким образом были оценены эти интервалы и какое количество образцов на точку было испытано. В разделе 2.5.1 заявлены испытания при семи температурах, а в таблицах 3.4 и 3.5 приведены результаты для четырёх.

6. Анализ длительной прочности ВЖС1 проведен только для 800 и 900°C. Важны характеристики ползучести и длительной прочности в более широком диапазоне температур. Линейная аппроксимация кривой Ларсена-Миллера годится только в исследованной области параметров «температура-время». При более низких температурах или больших длительностях линейный характер кривой нарушается. Необходимо указать область применения линейного закона.

На стр. 173.указана возможность экстраполирования кривой “lgσ-Р” за пределы исследованного диапазона температур и напряжений. Необходимо указать пределы экстраполяции. На стр. 175 автором как раз и указана необходимость проведения испытаний при температурах ниже 800 °C и выше 900 °C, а также при более длительных ресурсах.

7. Стр. 172-173. Как определены и чему равны коэффициенты «а» и «b» в уравнении  $lg \sigma = a \cdot P + b$ ?

8. Что такое здесь плотность трещин? Стр. 190, 60 «плотность трещин до 12 мм<sup>-1</sup>».

9. Таблица на стр.193 обозначение параметра  $T_{sol}$  °C повторен в двух строках. По-видимому, вместо этого должен быть  $T_{liq} - T_{sol}$  °C.

10. Условия испытаний крыльчатки из МПК ВЖС1 не указаны (в частности, частота вращения, температурного состояния), что было бы необходимо для доказательств соответствия полученных результатов на объекте и на образцах, изготовленных, в том числе, в одном технологическом

цикле. Без этих сопоставлений результат носит чисто качественный характер. Рекомендуется продолжить испытания.

11. На стр. 10 указано, что «проведены огневые стендовые испытания крыльчатки турбины...». Что здесь имеется в виду под слово «огневые»? Обычно в проведённых испытаниях этот термин не употребляется.

12. Имеются некоторые редакционные замечания, относящиеся к подписям рисунков, к ссылкам на них т.д. Не все примененные обозначения параметров (в частности в формулах) объяснены.

13. В дальнейшем следует расширить температурный диапазон исследований прочностных характеристик. Увеличить количество образцов для каждого параметра испытаний для получения статистически обоснованного результата. А также определить характеристики при МЦУ и МнЦУ, что также очень важно для циклической долговечности и сопротивления вибрационным нагрузкам.

#### ***Заключение о соответствии диссертации требованиям ВАК***

Диссертационная работа является важным шагом в получении новых жаропрочных материалов для разработки конкурентоспособных авиационных ГТД.

Указанные замечания не снижают ценности работы.

Рассмотренная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные структурные и технологические принципы разработки жаропрочных никелевых сплавов для изготовления методом СЛС деталей ГТД, работающих длительно в условиях высоких неравномерных температурных полей, на основании которых предложены новые жаропрочные никелевые сплавы ВЖС1 и ВЖС3 для применения в опытном и серийном производстве. Объём публикаций и апробация результатов отвечают требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Автореферат полностью отражает основные положения диссертационной работы.

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, главный научный сотрудник

  
(подпись)

Магеррамова Любовь Александровна

(фамилия, имя, отчество)

« 18 » 09 2026 г.

Федерального автономного учреждения «ЦИАМ им. П.И. Баранова»,  
Государственного научного центра Российской Федерации  
111116, Москва, ул. Авиамоторная, 2  
Телефон 8(495)3621283  
e-mail: lamagerramova@ciam.ru

Я, Магеррамова Любовь Александровна, даю свое согласие на обработку персональных данных, размещение этих сведений на официальном сайте.

Подпись Магеррамовой Любви Александровны удостоверяю  
Заместитель генерального директора

Директор ИЦ 2000 «Динамика, прочность, надежность»

ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова», д.т.н.

Ю.А. Ножницкий

