Заключение диссертационного совета 31.1.002.01, созданного на базе федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ), Российская Федерация, по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от «15» октября 2026 г. № 19

О присуждении Нерушу Святославу Васильевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Жаропрочные никелевые сплавы для селективного лазерного сплавления: особенности химического состава, структуры, механических и прочностных характеристик» по специальности 2.6.17. «Материаловедение» принята к защите «06» августа 2026 г. (протокол заседания № 15) диссертационным советом 31.1.002.01, созданным на базе федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 17, приказ Минобрнауки России от 24.10.2022 г. № 1363/нк «О выдаче разрешения на создание совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Соискатель Неруш Святослав Васильевич, «12» декабря 1987 г.р. В 2010 году окончил федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный

исследовательский технологический университет «МИСиС» по специальности «Металлургия цветных металлов».

Неруш Святослав Васильевич с 2010 г. работает в федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», где прошёл путь от инженера лаборатории № 616 «Порошковая металлургия и аддитивное производство» до начальника лаборатории № 616. В настоящее время является начальником научно-исследовательского отделения «Технологии порошковой металлургии, аддитивного производства, сварки, защитных и специальных высокотемпературных покрытий и материалов».

Диссертация выполнена в федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» в лаборатории № 616 «Порошковая металлургия и аддитивное производство».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор, академик РАН Каблов Евгений Николаевич – помощник Президента федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», председатель Совета Ассоциации – Президент Ассоциации «Российская академия наук».

Официальные оппоненты:

- Логачёва Алла Игоревна, доктор технических наук, начальник отделения металлических материалов и металлургических технологий акционерного общества «Композит»;

- Магеррамова Любовь Александровна, доктор технических наук, главный научный сотрудник федерального автономного учреждения «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», ГНЦ РФ

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном заведующим кафедрой СМ-12 «Технологии ракетно-космического машиностроения», доктором технических наук, профессором Галиновским Андреем Леонидовичем, и утвержденном первым проректором МГТУ им. Н.Э. Баумана, доктором экономических наук, профессором Дроговозом Павлом Анатольевичем, указала, что диссертационная работа 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. Диссертация соответствует требованиям пп. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Неруш Святослав Васильевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.17. «Материаловедение» (технические науки).

Соискатель имеет 77 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 9 научных работ, из них 8 – в рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК при Минобрнауки России, отражающих основное содержание работы. Получено 2 патента Российской Федерации на изобретение, подана 1 заявка на изобретение.

В опубликованных работах содержатся основные научные и практические результаты, изложенные в диссертационной работе соискателя. Публикации по теме диссертации представляют собой научные статьи в рецензируемых журналах, патенты на изобретение и заявку на изобретение. Все работы выполнены в соавторстве. Недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах в диссертации отсутствуют.

Личный вклад соискателя состоит в анализе научно-технической литературы, участии в оптимизации химического состава, комплексном исследовании синтезированного материала жаропрочных никелевых сплавов ВЖС1 и ВЖС3, обработке и анализе полученных экспериментальных данных, разработке научно-технической документации, написании научных публикаций.

Список основных трудов по теме диссертации, опубликованных в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:

1. Неруш С.В., Чубов Д.Г., Сухов Д.И., Капланский Ю.Ю. Взаимосвязь микроструктуры, механизмов ползучести и длительной прочности жаропрочных никелевых сплавов ВЖС1 и ВЖС3, полученных методом селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. – 2026. – № 7. – С. 43–62. – DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-43-62.

2. Чубов Д.Г., Неруш С.В. Обобщённый критерий трещиностойкости жаропрочных никелевых сплавов для селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. – 2026. – № 7. – С. 26–42. – DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-26-42.

3. Неруш С.В., Чубов Д.Г., Капланский Ю.Ю., Сухов Д.И. Исследование экспериментального жаропрочного сплава на основе никеля, полученного методом селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. – 2025. – № 7 (149). – Ст. 01. – DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-7-3-12.

4. Каблов Е.Н., Неруш С.В., Чубов Д.Г., Сухов Д.И., Филонова Е.В., Пахомкин С.И. Структурная нестабильность жаропрочных сплавов на основе

никеля с высоким содержанием гамма-штрих фазы, полученных методом селективного лазерного сплавления // Труды ВИАМ. – 2025. – № 8 (150). – Ст. 01. – DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-8-3-13.

5. Сухов Д.И., Неруш С.В., Ефимочкин И.Ю., Карачевцев Ф.Н., Богачев И.А. Получение металломатричных композитов на основе сплава ВЖ159 методом селективного лазерного сплавления // Авиационные материалы и технологии. – 2021. – № 2 (63). – Ст. 07. – DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-62-72.

6. Сухов Д.И., Неруш С.В., Беляков С.В., Мазалов П.Б. Исследование параметров шероховатости поверхностного слоя и точности изготовления изделий аддитивного производства // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2017. – № 9 (690). – С. 73–84. – DOI: 10.18698/0536-1044-2017-9-73-84.

7. Евгенов А.Г., Рогалёв А.М., Неруш С.В., Мазалов И.С. Исследование свойств сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления металлических порошков // Труды ВИАМ. – 2015. – № 2. – Ст. 02. – DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-2-2-2.

8. Вершков А.В., Оспенникова О.Г., Неруш С.В. Разработка концепции интегрированной информационной системы по свойствам авиационных материалов с возможностью расчёта характеристик разрабатываемых новых материалов // Труды ВИАМ. – 2015. – № 5. – Ст. 01. – DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-5-1-1.

Патенты Российской Федерации:

1. Пат. РФ 2865727. Жаропрочный сплав на основе никеля для получения изделий методом аддитивных технологий / Сухов Д.И., Неруш С.В., Капланский Ю.Ю., Чубов Д.Г., Карашаев М.М., Мазалов П.Б., Крылов С.А., Рогалев А.М., Тихонов М.М., Богачев И.А., Егоров Е.В. // Заявл. 03.03.2026 (заявка № 2026105666), опубл. 08.07.2026.

2. Пат. РФ 2623537. Способ изготовления деталей послойным лазерным сплавлением металлических порошков жаропрочных сплавов на основе

никеля / Каблов Е.Н., Неруш С.В., Евгенов А.Г., Рогалев А.М., Василенко С.А., Ходырев Н.А., Сухов Д.И. // Заявл. 13.11.2015 (заявка № 2015148793), опубл. 27.06.2017.

Заявка на изобретение:

1. Сплав на основе никеля для получения изделий методом аддитивных технологий / Сухов Д.И., Неруш С.В., Капланский Ю.Ю., Чубов Д.Г., Мазалов П.Б., Крылов С.А., Рогалев А.М., Тихонов М.М., Богачев И.А. // Заявка № 2026105665 от 03.03.2026.

Иные публикации:

1. Неруш С.В., Сухов Д.И., Капланский Ю.Ю., Чубов Д.Г. Закономерности кинетики ползучести и длительной прочности жаропрочного никелевого сплава ВЖС1 // Сборник докладов XVIII Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТЕСТМАТ». – М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2026. – С. 334–345.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Отзыв на диссертацию ведущей организации (федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»), подписан заведующим кафедрой СМ-12 «Технологии ракетно-космического машиностроения», доктором технических наук, профессором Галиновским Андреем Леонидовичем, утверждён первым проректором МГТУ им. Н.Э. Баумана, доктором экономических наук, профессором Дроговозом Павлом Анатольевичем.

Диссертация рассмотрена и обсуждена на кафедре СМ-12 «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана (15 сентября 2026 года, протокол № 04.63-04/2). Отзыв составлен на основании диссертации, автореферата и публикаций соискателя. Отзыв положительный.

Имеются замечания:

- 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 °C 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.

- 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 °C 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.

- В разделе 3.4 справедливо указано, что для никелевых сплавов с упрочняющей фазой $L1_2$ характерна аномальная температурная зависимость предела текучести с максимумом в области 600–800 °C, 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 °C 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.

- При обратном проектировании сплава ВЖС3 содержание хрома снижено, что при равновесной доле γ′-фазы около 60 % и рабочей температуре 1000 °C 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?

- 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»?

- В работе показано, что сеть когерентных границ Σ3 и дискретные карбиды MC-типа обеспечивают сопротивление зернограничному 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 Σ3 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 зернограничных выделений. Иными словами, не переходит ли механизм, заложенный в модель как технологический, в разряд эксплуатационных при длительной работе материала.

2. Отзыв на диссертацию официального оппонента – Логачёвой Аллы Игоревны, доктора технических наук, начальника отделения металлических материалов и металлургических технологий акционерного общества «Композит». Отзыв положительный.

Имеются замечания:

- 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.

- 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.

- 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 объёмной доли упрочняющей γ′-фазы до ~60 % привело к созданию лучших никелевых ЖС (ВЖМ4 и др.). Поэтому выбор IN939 в качестве основы линейки новых ЖС неизбежно приведёт 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.

- 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.

3. Отзыв на диссертацию официального оппонента – Магеррамовой Любови Александровны, доктора технических наук, главного научного сотрудника федерального автономного учреждения «Центральный институт

авиационного моторостроения имени П.И. Баранова», ГНЦ РФ. Отзыв положительный.

Имеются замечания:

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

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

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

- 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).

- В таблице 3.4 для состояния XZ, ТО2 при 800 °С 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.

- Анализ длительной прочности ВЖС1 проведён только для 800 и 900 °С. Важны характеристики ползучести и длительной прочности в более широком диапазоне температур. Линейная аппроксимация кривой Ларсона–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 «lg σ – P» 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 °С и выше 900 °С, а также при более длительных ресурсах.

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

- Что такое здесь плотность трещин? Стр. 190, 60 «плотность трещин до 12 $мм^{-1}$».

- Таблица на стр. 193: обозначение параметра Tsol, °С повторено в двух строках. По-видимому, вместо этого должен быть Tliq – Tsol, °С.

- 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.

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

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

- 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.

Отзывы на автореферат:

1. Акционерное общество «ОДК-Авиадвигатель» (АО «ОДК-Авиадвигатель»), подписан заместителем генерального директора АО «ОДК» по управлению НПК «Пермские моторы», генеральным директором – генеральным конструктором АО «ОДК-Авиадвигатель», академиком РАН, доктором технических наук, профессором, Героем Труда Российской Федерации Иноземцевым Александром Александровичем. Отзыв положительный.

Имеются замечания:

- Недостаточно освещены вопросы обеспечения ресурса рабочих лопаток и сопловых аппаратов турбины низкого давления, изготовленных по технологии СЛС из материалов сплавов ВЖС1 и ВЖС3.

- В работе отсутствует информация о достигнутых параметрах шероховатости при изготовлении тонкостенных заготовок. Минимизация последующей механической обработки при изготовлении лопаток турбины низкого аддитивным способом является не менее важной задачей, чем достижение высоких характеристик длительной прочности материала.

- Работа получила бы дополнительное преимущество в случае рассмотрения экономической составляющей применения нового подхода к проектированию химического состава сплавов для СЛС и его влияния на производительность аддитивного процесса изготовления заготовок, а также влияния использования новых жаропрочных никелевых сплавов на стоимость жизненного цикла авиационного перспективного двигателя.

2. Опытно-конструкторское бюро имени А. Люльки – филиал публичного акционерного общества «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение» (ОКБ им. А. Люльки – филиал ПАО «ОДК-УМПО»), подписан главным конструктором по изделию 295 Соловьевой Анастасией Валерьевной, главным специалистом – начальником отдела технологического сопровождения проектов, кандидатом технических наук Кузьминским Дмитрием Леонидовичем, утверждён генеральным конструктором, директором ОКБ им. А. Люльки, доктором технических наук, членом-корреспондентом РАН Марчуковым Евгением Ювенальевичем. Отзыв положительный.

Имеется замечание:

- Механические характеристики и данные по длительной прочности для сплава ВЖС3 приведены как средние значения, полученные на образцах, изготовленных в направлении XZ. Желательно было привести свойства данного сплава в направлении XY, аналогично свойствам сплава ВЖС1.

3. Акционерное общество «ОДК-Климов» (АО «ОДК-Климов»), подписан генеральным конструктором Продановым Евгением Степановичем, главным металлургом Кузьминым Олегом Вадимовичем, заместителем главного конструктора по перспективным разработкам, кандидатом технических наук Липиным Алексеем Владимировичем, начальником лаборатории по исследованию материалов, кандидатом технических наук Музафаровой Светланой-Викторией Рустамовной, руководителем группы научных программ – секретарём НТС Илюшиным Михаилом Юрьевичем. Отзыв составлен ведущим специалистом – руководителем группы УГМет Живушкиным Алексеем Алексеевичем. Отзыв положительный.

Имеются замечания:

- Из автореферата не ясно, насколько возможно заимствование методологий из «литейной» практики применительно к разработке новых жаропрочных сплавов для аддитивных технологий и применительно к структуре СЛС-сплавов, имея в виду, в первую очередь, следующие

параметры оптимизации состава: через оптимизацию содержания углерода и перераспределение карбидообразующих элементов для подавления ликвации, через критерий по среднему числу вакансий $\bar{N}v < 2{,}40$ для оптимизации ТПУ-фаз, через минимизацию мисфита, регулируемую балансом элементов между γ- и γ′-подрешётками.

- Из автореферата не ясно, каким образом функционал накопления дефектов (знаменатель обобщённого критерия трещиностойкости Ξ) в соответствии с принятыми параметрами оптимизации состава по п. 1 учитывает три различных механизма растрескивания – растрескивание в процессе кристаллизации, растрескивание от деформационного старения и зернограничное охрупчивание карбидными и боридными выделениями по границам зёрен.

- В части практического использования результатов диссертационной работы из автореферата не видно: планируется ли выполнение работ по определению зависимости уровня указанных в работе механических свойств от различных применяемых установок АП? В частности, интересен разброс значений при использовании различных марок оборудования внутри одной линейки, а также оборудования различных производителей, в том числе, отечественных. Планируется ли выполнение работ по исследованию влияния расположения детали в зоне построения на механические свойства материала? В частности, интересует вопрос, касающийся различий уровня механических характеристик для расположения детали в зоне одновременной работы нескольких лазерных источников (для многолазерных установок АП) от расположения в зоне работы единственного лазерного источника на деталь.

4. Филиал публичного акционерного общества «ОДК-Сатурн» – Омское моторостроительное конструкторское бюро (филиал ПАО «ОДК-Сатурн» – ОМКБ), подписан главным металлургом филиала ПАО «ОДК-Сатурн» – ОМКБ, кандидатом технических наук Лавриком Евгением Геннадьевичем. Отзыв положительный.

Имеются замечания:

- В автореферате при описании обобщённого критерия трещиностойкости Ξ не приведены количественные значения коэффициентов веса параметров, входящих в этот критерий, и не указан метод их определения.

- Несмотря на приведённые в автореферате диапазоны параметра Ларсона–Миллера, при которых кривая длительной прочности сплава ВЖС3 приближается к уровню литого сплава CM247LC, количественные значения расхождения по напряжению или ресурсу между материалами не приведены, что затрудняет точную оценку степени приближения синтезированного материала к литому аналогу.

5. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС), подписан доктором технических наук (специальность 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы), доцентом Логиновым Павлом Александровичем. Отзыв положительный.

Имеется замечание:

- На рисунке 7 автореферата пластичность меняется немонотонно: снижение δ_5 при нагреве до 800 °C для состояния XZ–TO2, резкое падение для XY–TO1 при нагреве до 900 °C и монотонное снижение для XZ–TO1. Стоило бы добавить несколько предложений о физической природе этого эффекта.

6. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), подписан старшим научным сотрудником лаборатории конструкционных сталей и сплавов, кандидатом технических наук Лукиным Евгением Игоревичем. Отзыв положительный.

Имеется замечание:

- Результаты натурных огневых стендовых испытаний детали «Крыльчатка турбины» в автореферате приведены только для сплава ВЖС1, а для более высокотемпературного сплава ВЖС3 (рабочая температура до 1000 °С) данные испытаний натурных деталей отсутствуют, что не позволяет в полной мере оценить его технологичность и работоспособность в условиях, приближенных к эксплуатационным.

7. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ), подписан кандидатом технических наук, доцентом Борисовым Евгением Владиславовичем. Отзыв положительный.

Имеется замечание:

- Показатель степени по напряжению n = 6,24 приведён как свидетельство дислокационного механизма ползучести. Для дисперсионно-упрочнённых систем такое значение принято рассматривать как кажущееся, завышенное вкладом порогового напряжения, ниже которого макроскопическая ползучесть подавлена. Хотелось бы услышать оценку этого порога для сплава ВЖС1 и отвечающее ему значение истинного показателя – это уточнило бы физическую интерпретацию и границы применимости приведённого конститутивного уравнения.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается следующим:

- доктор технических наук, начальник отделения металлических материалов и металлургических технологий АО «Композит» Логачёва Алла Игоревна является признанным специалистом в области металлургии жаропрочных сплавов и технологий изготовления из них деталей ракетно-космической техники, в том числе методами порошковой металлургии и аддитивных технологий.

- доктор технических наук, старший научный сотрудник ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова» Магеррамова Любовь Александровна является ведущим

специалистом в области прочности, долговечности и ресурса деталей горячей части газотурбинных двигателей. В её работах последних лет рассматриваются расчётно-экспериментальные исследования деталей ГТД, изготовленных аддитивными методами, в том числе облегчённых конструкций с ячеистой структурой.

- федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» является одним из ведущих научно-образовательных центров Российской Федерации в области машиностроительных технологий и материаловедения. В университете развиваются научные школы в области лазерных и аддитивных технологий, в том числе прямого лазерного выращивания, лазерного легирования и структурообразования материалов при воздействии концентрированных потоков энергии. Исследования в данной области отражены в публикациях сотрудников ведущей организации.

Список основных публикаций сотрудников ведущей организации за последние 5 лет:

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Аддитивные технологии: монография / под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2025. – 340 с.

2. Крючина О.А., Шиганов И.Н. Результаты исследования технологической среды оптического спектра при лазерных процессах обработки материалов // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. – 2025. – Т. 4, № 2 (14). – С. 253–258.

3. Шиганов И.Н., Холопов А.А., Ломакин И.А., Богатырев Д.О. Структурные особенности композиционных материалов системы Fe-Cu, полученных аддитивной технологией прямого лазерного выращивания // Технология машиностроения. – 2025. – № 4. – С. 5–9.

4. Крючина О.А., Шиганов И.Н. Энергетические характеристики отраженного излучения при лазерных технологических процессах // Наукоемкие технологии в машиностроении: материалы XV Международной научно-технической конференции: в 2 т. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. – С. 216–219.

5. Хриптович Е.В., Шиганов И.Н. Лазерное легирование поверхности стали Ст20Х широкополосным методом // Наукоемкие технологии в машиностроении: материалы XV Международной научно-технической конференции: в 2 т. – М., 2024. – С. 251–253.

6. Крючина О.А., Шиганов И.Н., Садовников И.Э. Особенности энергетических характеристик световой технологической среды при лазерной и лазерно-дуговой обработке металлов волоконными лазерами // Сварочное производство. – 2024. – № 1. – С. 29–36.

7. Ишкиняев Э.Д., Петровский В.Н., Грезев Н.В., Хриптович Е.В., Шиганов И.Н. Повышение эксплуатационных свойств поверхностей металлов с применением высокомощных волоконных лазеров // Сварочное производство. – 2024. – № 3. – С. 18–27.

8. Шиганов И.Н., Овчинников В.В., Шляпин А.Д. Особенности фазовых и структурных превращений в композиционных материалах на основе систем несмешивающихся компонентов при воздействии концентрированных потоков энергии // Физика и химия обработки материалов. – 2024. – № 1. – С. 5–13.

9. Курынцев С.В., Шиганов И.Н. Особенности кристаллизации сварочной ванны при лазерной сварке меди со сталью // Цветные металлы. – 2024. – № 3. – С. 52–57.

10. Шиганов И.Н., Овчинников В.В., Шляпин А.Д. Новая аддитивная технология изготовления композиционного материала Fe-Cu // Электрометаллургия. – 2024. – № 10. – С. 2–9.

11. Хриптович Е.В., Шиганов И.Н., Грезев Н.В. Моделирование процесса широкополосного лазерного легирования // Технология машиностроения. – 2024. – № 2. – С. 26–33.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработан обобщённый безразмерный критерий трещиностойкости Ξ жаропрочных никелевых сплавов при селективном лазерном сплавлении, определяемый как отношение функционала пластической релаксации к функционалу накопления дефектов, интегрируемых по времени термического цикла и объёму зоны термического влияния. Функционал накопления дефектов учитывает три механизма – растрескивание в процессе кристаллизации, растрескивание от деформационного старения и зернограничное охрупчивание карбидными и боридными выделениями, – а кинетика выделения γ′-фазы описывается уравнением Джонсона–Мела–Аврами–Колмогорова. При апробации на выборке из 15 никелевых сплавов коэффициент детерминации логарифмической регрессии с экспериментальной плотностью трещин составил 0,94 против 0,41–0,74 для известных критериев.

Предложен подход к проектированию химического состава жаропрочных никелевых сплавов для селективного лазерного сплавления, основанный на глобальном анализе чувствительности критерия Ξ (метод Соболя), по результатам которого 47 % дисперсии критерия определяются двумя параметрами – температурой сольвуса γ′-фазы и характерным временем её зарождения: направленная модификация сплава IN939 (частичная замена Ti на Nb, снижение температуры сольвуса, увеличение времени зарождения γ′-фазы) для сплава ВЖС1 и решение обратной задачи проектирования в 12-мерном пространстве легирования при ограничениях на равновесную долю γ′-фазы (не менее 67 %), интервал кристаллизации, температуру сольвуса, время зарождения γ′-фазы, мисфит и стабильность к образованию ТПУ-фаз для сплава ВЖС3.

Доказано, что разработанные сплавы после синтеза, горячего изостатического прессования и термической обработки обладают следующим уровнем свойств:

- Сплав ВЖС1 (объёмная доля γ′-фазы 35–40 %, направление построения XZ, режим ТО1): при 20 °С $\sigma_в$ = 1446 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 959 МПа, δ = 19,3 %. При 900 °С $\sigma_в$ = 504 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 469 МПа, δ = 9,7 %. Предел длительной прочности на базе 100 ч при 800 °С – 420 МПа. По параметру Ларсона–Миллера длительная прочность находится на уровне литых сплавов IN939 и IN713LC и превосходит синтезированные сплавы ЭП648-ПС и ВЖ159-ПС.

- Сплав ВЖС3 (объёмная доля γ′-фазы 63–67 %, направление построения XZ): при 20 °С $\sigma_в$ = 1354 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 876 МПа, δ = 24,5 %. При 1000 °С $\sigma_в$ = 436 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 340 МПа, δ = 6,2 %. Пределы длительной прочности на базе 100 ч – около 570 МПа при 800 °С и около 130 МПа при 1000 °С. По параметру Ларсона–Миллера сплав расположен выше литого IN738LC во всём исследованном диапазоне и приближается к литому CM247LC.

- Ползучесть сплава ВЖС1 в интервале 850–950 °С и 209–497 МПа описывается степенным законом Нортона с показателем n = 6,24 и кажущейся энергией активации Q ≈ 613 кДж/моль, что соответствует дислокационному механизму с выраженным вкладом γ′-фазы и карбидов.

Введены понятия функционала пластической релаксации Φ_{rel} и функционала накопления дефектов Φ_{dam}, характеризующих соответственно способность материала зоны термического влияния релаксировать термические напряжения пластическим течением и накопление повреждений за термический цикл синтеза слоя, а также характерного времени зарождения γ′-фазы τ_{nucl} как кинетического параметра оптимизации химического состава.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

Доказано, что для системы легирования IN939 в характерных для селективного лазерного сплавления условиях на растрескивание от

деформационного старения приходится лишь 65–70 % причин накопления дефектов, чем объясняется ограниченная применимость критериев, ориентированных только на кристаллизационное растрескивание (RDG, SCI), к сплавам с высокой объёмной долей γ′-фазы.

Установлен эффект подавления зародышеобразования γ′-фазы в пересыщенной метастабильной субструктуре сплава ВЖС1 после синтеза, подтверждённый отсутствием сверхструктурных рефлексов $L1_2$ на электронограммах и отсутствием пространственной корреляции распределения Al и Ti по данным STEM/EDS. Установлено формирование двойников отжига (границ Σ3) в рекристаллизованных зёрнах сплава ВЖС1 после полной термической обработки, бимодальное распределение γ′-фазы в сплавах ВЖС1 и ВЖС3 и различие её морфологии (округлая в ВЖС1, кубоидная в ВЖС3).

Применительно к проблематике диссертации результативно **использован** комплекс взаимодополняющих методов: термодинамическое моделирование методом CALPHAD с расчётом неравновесной кристаллизации по модели Шайля, кинетическое моделирование выделения γ′-фазы по модели Джонсона–Мела–Аврами–Колмогорова, глобальный анализ чувствительности по Соболю, сканирующая электронная микроскопия, дифракция обратно рассеянных электронов, просвечивающая электронная микроскопия, включая SAED, HRTEM и STEM/EDS, испытания на растяжение, ползучесть и длительную прочность.

Изложены закономерности эволюции структуры сплава ВЖС1 на пяти стадиях термической обработки – от пересыщенного γ-твёрдого раствора с ячеисто-дендритной субструктурой после синтеза до рекристаллизованной равноосной зёренной структуры (40–100 мкм) с бимодальной когерентной γ/γ′-структурой после полной термической обработки.

Раскрыты противоречия между необходимостью повышения объёмной доли γ′- фазы для обеспечения жаропрочности и склонностью сплавов с объёмной долей γ′-фазы более 30 % к растрескиванию при

селективном лазерном сплавлении, не устраняемой подбором параметров синтеза.

Изучено влияние режима термической обработки и ориентации построения на кратковременные механические свойства и длительную прочность сплава ВЖС1. Установлено резкое снижение пластичности в направлении XY при 800–900 °С (δ_5 до 1–2 %), связанное с ориентацией межслойных и горизонтальных сегментов границ зёрен относительно оси нагружения.

Проведена модернизация существующих представлений о разработке жаропрочных никелевых сплавов для аддитивного производства: предложен переход от адаптации литейных и деформируемых сплавов к направленному проектированию химического состава с учётом кинетики фазовых превращений в термических циклах послойного синтеза.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

Разработаны и внедрены новые жаропрочные никелевые сплавы ВЖС1 с рабочей температурой до 900 °С (заявка на изобретение № 2026105665 от 03.03.2026 г.) и ВЖС3 с рабочей температурой до 1000 °С (патент RU 2865727 от 08.07.2026 г.). Сплав ВЖС1 внедрён в серийное изготовление детали «Крыльчатка турбины» малоразмерного газотурбинного двигателя и опробован АО «ОДК-Авиадвигатель» для рабочих лопаток и сопловых аппаратов турбины низкого давления двигателя ПД-26, по сплаву ВЖС3 АО «ОДК-Авиадвигатель» выполнена предварительная оценка работоспособности сопловых аппаратов и рабочих лопаток третьей – пятой ступеней. Выпущены технологические рекомендации на параметры селективного лазерного сплавления и режимы газостатической и термической обработки: ТР 1.2.3195-2025 и ТР 1.2.3196-2025 (ВЖС1), ТР 1.2.3236-2026 и ТР 1.2.3239-2026 (ВЖС3).

Из сплава ВЖС1 изготовлена заготовка детали «Крыльчатка турбины», прошедшая стендовые испытания в составе малоразмерного газотурбинного

двигателя тягой 80 кгс разработки ОАО «ЛИИП им. Гризодубовой В.С.». По результатам испытаний и последующего контроля (капиллярный контроль, цифровая радиография, лазерное 3D-сканирование), не выявившего дефектов размером более 130 мкм и деформаций, составлен Акт об опробовании и внедрении и принято решение о применении сплава в серийном изготовлении турбин.

В АО «ОДК-Авиадвигатель» проведён комплекс механических испытаний сплава ВЖС1 на растяжение, длительную прочность и многоцикловую усталость с расчётом ресурса рабочих лопаток и сопловых аппаратов турбины низкого давления двигателя ПД-26. Составлен Акт о внедрении с заключением главного конструктора о возможности применения сплава для изготовления этих деталей по технологии селективного лазерного сплавления.

Определены пределы и перспективы практического использования: сплав ВЖС1 – для деталей горячего тракта с рабочей температурой до 900 °С, сплав ВЖС3 – до 1000 °С, при изготовлении в направлении построения XZ. Результаты работы внедряются 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 и НИР шифр ССВ-253.

Создана расчётная методика оценки склонности жаропрочных никелевых сплавов к растрескиванию при селективном лазерном сплавлении по критерию Ξ, позволяющая отбирать химические составы до проведения экспериментального синтеза.

Представлены рекомендации по применению разработанных сплавов в турбине низкого давления (ВЖС1 для шестой – восьмой ступеней с рабочей температурой до 900 °С, ВЖС3 для третьей – пятой ступеней с рабочей температурой до 1000 °С) и предложения по дальнейшему совершенствованию работ, включающие испытания на длительную

прочность в более широком диапазоне температур и длительностей, определение характеристик мало- и многоцикловой усталости и испытания образцов, вырезанных из деталей.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Для экспериментальных работ результаты получены на аттестованном оборудовании (сканирующий электронный микроскоп с приставкой дифракции обратно рассеянных электронов, просвечивающий электронный микроскоп с ускоряющим напряжением 200 кВ, испытательные машины для кратковременных и длительных испытаний, рычажные установки для испытаний на ползучесть с высокотемпературными экстензометрами) в соответствии с ГОСТ 1497, ГОСТ 9651, ГОСТ 10145, ГОСТ 20899. Испытания проводились на нескольких параллельных образцах на каждом режиме, кинетические параметры ползучести определены двумя независимыми процедурами обработки данных, давшими согласующийся результат.

Теория построена на известных и проверяемых данных и фундаментальных представлениях физического материаловедения: термодинамике фазовых равновесий (CALPHAD), кинетике фазовых превращений (Джонсона–Мела–Аврами–Колмогорова), теории дислокационной ползучести дисперсионно-упрочнённых сплавов (степенной закон Нортона, модель порогового напряжения) и параметрическом методе Ларсона–Миллера.

Идея базируется на анализе отечественной и зарубежной научно-технической литературы (157 наименований), обобщении мирового и отечественного опыта применения жаропрочных никелевых сплавов в аддитивных технологиях, а также на результатах предшествующих разработок НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ в области селективного лазерного сплавления жаропрочных сплавов.

Использовано сравнение авторских данных с литературными данными для промышленных литых (IN738LC, IN939, IN713LC, CM247LC, ВЖЛ12У)

и синтезированных (ЭП648-ПС, ВЖ159-ПС) жаропрочных никелевых сплавов.

Установлено качественное и количественное совпадение авторских результатов с результатами независимых источников: кажущаяся энергия активации ползучести сплава ВЖС1 (≈ 613 кДж/моль) сопоставима с литературным значением для литого IN738LC (≈ 590 кДж/моль), а значения показателя степени n = 6,24 соответствуют характерному для дисперсионно-упрочнённых никелевых сплавов диапазону.

Использованы современные методики сбора и обработки исходной информации: калибровка критерия Ξ на представительной выборке из 15 жаропрочных никелевых сплавов с известной плотностью трещин, метод наименьших квадратов, регрессионный анализ с оценкой коэффициента детерминации и глобальный анализ чувствительности по Соболю.

Личный вклад соискателя состоит в: выполнении всех этапов диссертационного исследования, включающих анализ научно-технической литературы, участие в оптимизации химического состава, комплексное исследование синтезированного материала жаропрочных никелевых сплавов ВЖС1 и ВЖС3, обработку и анализ полученных экспериментальных данных, в том числе разработку необходимой научно-технической документации, написание научных публикаций и выступление с докладами на научных конференциях (III Международный форум новых материалов, химии и технологий, круглый стол в рамках выставки «Металлообработка-2026», XVIII Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «Тестмат»).

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. Одним из обоснований критерия трещиностойкости является замедление образования γ′-фазы, приведена цифра. Как в эксперименте определялось время замедления образования γ′-фазы?

2. Можно ли утверждать, что известные свариваемые сплавы, отечественные и зарубежные, соответствуют предложенному критерию?

3. На слайде 10 температурная зависимость свойств сплава ВЖС1 проведена гладкой кривой между экспериментальными точками при комнатной температуре и 800 °С, тогда как для жаропрочных сплавов хорошо известны пик предела текучести и провал пластичности в интервале 650–800 °С. Были ли эксперименты, позволяющие провести такую кривую, или её следовало показать пунктиром?

4. Для какого состояния определён критерий трещиностойкости, для заготовки после селективного лазерного сплавления или после ГИП и старения? Влияют ли на него ГИП и старение?

5. Определяющим является процесс лазерного сплавления, однако в докладе не сказано, какой применяется лазер, какой мощности, с каким пятном, на каком оборудовании (отечественном или импортном) и в какой документации описан процесс.

6. В сплаве ВЖС3 очень широкие пределы легирования танталом и рением (от 0,5 до 3 %). Проверено ли, что во всём интервале сохраняются полученные механические свойства? Не следует ли сократить интервалы легирования по этим элементам?

7. На слайде 11 показаны квоты превосходства нового материала при 800 и 900 °С, тогда как в таблице приведены данные при 800 и 950 °С. На каких данных основаны квоты превосходства при 900 °С?

8. Какие температуры выбраны для различных ступеней турбины низкого давления двигателя ПД-26?

9. На слайде «Актуальность» указан ресурс не более 100 часов. Правильно ли это?

10. Какова производительность процесса селективного лазерного сплавления при изготовлении лопаток в условиях нехватки литейных мощностей?

11. Какие особенности относятся к механическим и какие к прочностным характеристикам, указанным в названии работы? В ходе дискуссии отмечено, что прочностные характеристики являются частью механических и такое разделение в названии избыточно.

12. В ходе дискуссии отмечено, что критерий трещиностойкости содержит множество параметров, которые невозможно определить экспериментально. Основной вклад (более 50 %) в него вносит интервал между температурами сольвуса и солидуса, а остальные параметры привязаны к нему несколько искусственно.

Соискатель Неруш С.В. ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

1. Расчётным путём определялось не замедление, а увеличение характерного времени зарождения γ′-фазы и снижение скорости её выделения. Полный перечень параметров приведён в диссертации.

2. В данной работе это не исследовалось, так как подход другой и речь идёт о разработке новых сплавов. Критерий направлен на предотвращение образования трещин. Полностью свариваемый сплав, скорее всего, ему отвечает, так как значение критерия у него будет выше критического.

3. Кривая построена по небольшому объёму испытаний образцов. Гарантированный статистический объём будет установлен после проведения квалификации и паспортизации материала.

4. Критерий определён для процесса селективного лазерного сплавления, без ГИП и термической обработки. Задача состоит в том, чтобы подавить зарождение γ′-фазы в процессе сплавления. В ранее выполненных работах выделение γ′-фазы в синтезированном материале не подавлялось, и такой материал растрескивался от остаточных напряжений в течение 48 часов, если не провести термическую обработку. В разработанных сплавах достигнуто полное подавление γ′-фазы при её объёмной доле до 67 % за счёт существенного увеличения характерного времени зарождения γ′-фазы. В сплаве ВЖС3 это обеспечено легированием рением и танталом.

5. Применяется промышленное оборудование с иттербиевыми лазерами: Concept Laser (Германия), DMP Flex (США) и EOS (Германия). Сплавление проводилось при мощности около 200 Вт, диаметр пятна лазера составляет 60–80 мкм. Режимы задаются технологом, характеристики оборудования приведены в документации по его эксплуатации. Отработка режимов в задачи работы не входила, однако для сплава ВЖС3 структура без трещин достигается только при двойном проплаве.

6. При подготовке заявки на изобретение проверены как средние, так и граничные составы, что отражено в тексте патента на сплав ВЖС3. В технических условиях на синтезированный материал и заготовки деталей устанавливаются более узкие интервалы и расчётный состав, применяемый при выплавке и контроле. Конечный химический состав в открытой части работы не приводится в соответствии с политикой конфиденциальности института.

7. Квоты превосходства при 900 °С рассчитаны по данным, приведённым в диссертации, как исходные цифры для сравнения.

8. Выбраны две температуры: 900 °С для менее нагруженных ступеней с шестой по восьмую (сплав ВЖС1) и 1000 °С для более высокотемпературных ступеней с третьей по пятую (сплав ВЖС3). Задача на разработку сплавов на эти температуры поставлена директивно генеральным конструктором. Ресурс является расчётным и подтверждён заключением разработчика двигателя. Применение двух сплавов экономически оправдано, так как ВЖС1 менее легирован и значительно дешевле ВЖС3.

9. Ресурс не более 100 часов установлен конструкторами для рабочих лопаток и сопловых аппаратов двигателя-демонстратора ПД-35, изготовленных ввиду ограничения литейных мощностей из сплавов ЭП648 и ВЖ159. После 100 часов эти детали подлежат снятию. Исходя из этого, генеральным конструктором была поставлена задача, разработать технологичные для селективного лазерного сплавления материалы с уровнем свойств, приближенным к литому сплаву ВЖЛ12У. По расчёту АО «ОДК-

Авиадвигатель» разработанные сплавы обеспечивают 800 часов на режиме взлёта для ступеней с третьей по восьмую. Испытания продолжаются, количество образцов достигает семисот.

10. Экономическая эффективность оценена до начала работы для мелкосерийного производства (до 15 двигателей в год). На установке с габаритами построения 400×400 мм за один цикл изготавливается шесть секторов сопловых аппаратов и от десяти рабочих лопаток. Стоимость сопоставима с серийным литьём, а при отсутствии литейных мощностей и ограниченном сроке ОКР (около пяти лет) экономия средств значительна. Кроме того, коэффициент использования материала значительно выше.

11. В соответствии с действующими национальными стандартами Российской Федерации к механическим характеристикам относятся характеристики кратковременной прочности, к прочностным – длительная прочность и ползучесть, испытания на которые регламентированы разными стандартами. Название не делит родовое понятие, а разделяет его на методически разные экспериментальные блоки.

В диссертационной работе все заимствованные источники представлены со ссылками на автора или источник.

На заседании «15» октября 2026 г. диссертационный совет принял решение за создание научной задачи создания отечественных жаропрочных никелевых сплавов ВЖС1 и ВЖС3 для изготовления методом селективного лазерного сплавления деталей горячего тракта газотурбинных двигателей с рабочей температурой до 900 и 1000 °C соответственно, сочетающих отсутствие трещин при синтезе с уровнем длительной прочности литейных аналогов, на основе разработанного обобщённого критерия трещиностойкости, имеющей существенное значение для развития материаловедения и авиационного двигателестроения, присудить Нерушу С.В. ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 4 докторов технических наук по научной специальности 2.6.17. – «Материаловедение», участвовавших в заседании, из 19 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за – 14, против – 0.

Председательствующий: Председатель диссертационного совета		Антипов Владислав Валерьевич
	подпись	фамилия, имя, отчество (полностью)
Ученый секретарь диссертационного совета		Горбовец Михаил Александрович
	подпись	фамилия, имя, отчество (полностью)

Дата оформления заключения: «15» октября 2026 г.