

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Евгенова Александра Геннадьевича на тему «Научные основы  
структурообразования в процессе селективного лазерного сплавления  
порошковых композиций жаропрочных никелевых и интерметаллидных  
сплавов для деталей газотурбинных двигателей и установок»,  
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по  
научной специальности 2.6.17. Материаловедение.

Применение аддитивных технологий для критических направлений в развитии авиационного двигателестроения потенциально является новым импульсом в части конструирования авиационных двигателей, связанным с новыми технологическими возможностями. Технология селективного лазерного сплавления (СЛС) для данного направления наиболее востребована в мире благодаря сумме преимуществ: высокой точности сложных геометрических конфигураций получаемых изделий, которые сложно или невозможно изготовить традиционными методами, сокращении затрат времени и средств на разработку, изготовление и техобслуживание (включая ремонт), в снижении массы, уменьшение количества отходов и т.д. СЛС-металл выгодно отличается от литого гомогенной структурой, отсутствием на макроуровне неравновесных фазовых составляющих (эвтектик), равномерным распределением дисперсных вторых фаз (карбидов, боридов и т.п.). Структура такого металла по размеру зерен близка к деформированному металлу. Однако физическая природа СЛС-металла связана с процессами плавления и кристаллизации, а значит, в отличие от деформированного металла, его структура может содержать и типичные дефекты литого металла, связанные с изменением молярной массы при кристаллизации и кристаллизационными напряжениями: поры и трещины. Кроме того, СЛС-металл отличается высоким уровнем напряжений и наличием выраженной текстуры, а значит, анизотропией механических свойств. Таким образом, реализация потенциальных преимуществ технологии требует тщательных исследований для «нейтрализации» негативных факторов, связанных с ее неизбежными особенностями. Это одна из задач, которая решалась в диссертационной работе А.Г. Евгенова.

Хочется отметить большой объем и подробный анализ публикаций, посвященных исследуемым вопросам, в том числе при сравнении и обсуждении с получаемыми автором результатами.

В работе впервые для авиационной техники разработаны синтезированные материалы нескольких классов. Это жаростойкие сплавы для деталей камер сгорания ВЖ159-ПС, ВЖ171-ПС, ЭП648-ПС, классические литейные сплавы ВЖЛ12У, ЖС6К, а также сплавы на основе интерметаллида  $\text{Ni}_3\text{Al}$ : ВКНА1ВР, ВИН5 и специально разработанный для технологии СЛС сплав ВКНА25Р. Эти материалы паспортизованы и рекомендованы для применения в газотурбинном двигателестроении.

Внедрение разработанных материалов в серийных и опытных изделиях, включая конструкции авиационных (ПД-14, ПД-35, ВК-650) и наземного (ПС-90ГП-2М) двигателей подтверждают актуальность проведенных исследований. Приведенные в диссертационной работе данные представляют собой решения для ключевых этапов технологического процесса изготовления деталей сборочных единиц (ДСЕ), включая технологический процесс печати, термической обработки, а также комплекс структурно-фазовых исследований и испытаний механических характеристик, в том числе, в условиях эксплуатационных режимов ДСЕ авиационных ГТД и после имитации наработки синтезированного металла.

Научная новизна и значимость диссертационной работы Евгенова А.Г. состоит в разработке научных основ процессов структурообразования жаропрочных сплавов, включая физические закономерности формирования ячеистой структуры, текстур, исследования эволюции фазовых составляющих при высокотемпературных воздействиях. Предложен механизм, объясняющий обострение или нивелирование текстуры при изменении параметров процесса, выявлена связь плотности энергии с физической плотностью получаемого металла.

Отдельно нужно отметить комплекс исследований в части ключевого отличия технологии СЛС от классических методов производства: изначально более высокого содержания газовых примесей в исходном порошке, усугубляющегося при многократном его применении. В данном направлении автором впервые установлены закономерности и механизмы загрязнения вторично вовлекаемых в процесс печати порошков, обоснованы критерии оценки степени деградации структуры синтезированного материала на базе реализуемых в производстве видов испытаний.

Сам процесс СЛС интересен именно в части печати фасонных заготовок, по сути, деталей с финишной механической обработкой только отдельных поверхностей. Большая часть синтезированной заготовки или не подвергается

механической обработке вовсе, или она ограничивается только локальным поверхностным воздействием: химической или механической полировкой, галтовкой и т.п. Материал при таком способе производства получается на стадии синтеза детали, минуя стадию полуфабриката. Именно это ключевое отличие аддитивных технологий от классических нашло отражение в представленной диссертационной работе. Работу выгодно отличает большой объем механических испытаний. Приведены не только данные по прочностным характеристикам при комнатной температуре. Не смотря на достаточно широкий круг рассмотренных материалов, для каждого приведены характеристики по кратковременной, длительной прочности и циклической долговечности в интервале рабочих температур. Приведены сравнения с аналогами, полученными по классическим технологиям и с передовыми зарубежными материалами.

Для данной работы можно отметить комплексный подход к получению синтезированных изделий: изложенные теоретические представления и закономерности формирования структуры и текстур для жаропрочных сплавов применены при разработке материалов, технологий и технологических приемов печати сложнопрофильных деталей. В дальнейшем они реализованы при разработке технологий термической и газостатической обработки.

Обоснованность и достоверность результатов исследований не вызывает сомнений и определяется эффективным применением современных методов исследования химического и фазового состава, структуры и механических свойств разработанных материалов. Дополнительно правильность выводов и адекватность данных косвенно подтверждается автором на основе сравнения с результатами исследований по материалам аналогам классического производства и зарубежным синтезированным материалам.

Результаты, полученные в диссертации, отражены в 28 публикациях в журналах из перечня ВАК и 3 патентах РФ, доложены на многочисленных международных и всероссийских конференциях. Сама диссертационная работа изложена на 278 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложения.

Замечания по диссертационной работе А.Г. Евгенова

1. В выражении (4.5), очевидно, неправильно указаны индексы, описывающие наименование подрежима: в описании формулы указан контур нижней поверхности, а в формуле фигурируют только индексы, соответствующие по таблице 4.1 контуру верхней поверхности (КВП).
2. Оценка остаточных напряжений в синтезированном материале в разделе 2.3 проводилась рентгеновским методом  $\sin^2\Psi$ . Таким образом,

проводились исследования поверхностных напряжений, на которые оказывает влияние подготовка исследуемых поверхностей. Влияние стратегий сканирования на распределение остаточных напряжений может быть отличным от установленного при оценке напряжений в объеме материала.

3. В формуле 2.4 вид коэффициента детерминации не соответствует обозначению.
4. На рис.3.28 у литого сплава ЖС6К прочность выше, чем у СЛС(ХУ), что противоречит тексту под рисунком на стр. 145.
5. В полученных результатах, в частности по механическим характеристикам разработанных материалов, не приведены данные по использованному количеству образцов для статистической обработки.
6. Упомянуто (стр.153-154), что «разработанные технологические приемы (с массивными монокристаллическими вкладками) реализованы при синтезе заготовок рабочих лопаток из перспективного никелевого жаропрочного сплава». Хотелось бы получить подробную информацию о результатах изготовления, структуре и анализе этой детали.
7. По результатам исследований направленного роста зерен, влияния монокристаллической подложки «затравки» и стратегий сканирования в привязке к КГО не сделан вывод о практической значимости полученных результатов. Как полученные результаты исследований могут быть применены на практике и какой эффект позволяют достичь?
8. В тексте работы имеются орфографические ошибки и опечатки, отсутствует описание некоторых сокращений.
9. Расчетные значения механических характеристик (РЗХКП) при общей квалификации (паспортизации) порошковых материалов ВЖ159-ПС, ВЖ171-ПС, ЭП648-ПС получены при использовании оборудования EOS M290, EOS M400-4 и ConceptLaser M2. Можно ли говорить о том, что выбранный для каждой МПК энергетический вклад и другие параметры при 3D печати будут приводить к подобным результатам при использовании других моделей принтеров? Было бы целесообразным продолжить работу в части привязки полученных результатов и выводов к другим используемым в авиационном двигателестроении современным принтерам, работающим по технологии СЛС.

Указанные замечания не снижают ценности работы, выполненной на высоком научно-техническом уровне.

## Закключение

Рассмотренная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные структурные и технологические принципы синтеза ресурсных деталей ГТД и ГТУ из жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов методом селективного лазерного сплавления, на основании которых предложены новые технологические решения, применяемые в опытном и серийном производстве.

Автореферат полностью отражает основные положения диссертационной работы.

Диссертация соответствует критериям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013г. и научной специальности 2.6.17. Материаловедение, а ее автор, Евгенов Александр Геннадьевич заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Официальный оппонент  
Д.т.н.



Л.А. Магеррамова

01.12.2025г.

Магеррамова Любовь Александровна, д.т.н.,  
начальник сектора  
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

Подпись Магеррамовой Любви Александровны  
заверяю

Заместитель генерального директора  
Директор ИЦ 2000 «Динамика, прочность, надежность»  
ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

Ю.А. Ножницкий

