



Акционерное общество «КОМПОЗИТ»



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

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

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

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.

Актуальность темы

Аддитивные технологии – гамма технологических процессов, объединенных послойным способом нанесения (или добавления) материала на каждом последующем сечении 3D-модели, – наиболее развивающееся направление в промышленности как за рубежом, так и в России. Для получения металлических изделий наиболее востребованной в части серийного применения технологией является селективного лазерного сплавления (СЛС), сочетающая высокую геометрическую точность, относительно малую шероховатость поверхностей и потенциально высокий комплекс механических характеристик получаемого материала. Сама технология, будучи зарубежной разработкой, пришла в Россию в уже сложившемся виде с относительно стандартным набором свариваемых материалов.

Основные области применения, в которых может быть обеспечен максимальный выигрыш от потенциально уникальных возможностей послойной печати изделий – это авиационное и ракетное двигателестроение, что наглядно видно по зарубежным публикациям. При этом известно, что передовые зарубежные разработчики применяют преимущественно материалы не стандартного набора, поставляемые с оборудованием, а сплавы собственной разработки, наиболее полно раскрывающие потенциал агрегации узлов, топологической оптимизации конструктивного облика изделий и т.п.

большой объем зарубежных публикаций по данному направлению, однако, оставляет без ответа ряд ключевых вопросов в части металловедения, не приводя стройных и единых закономерностей по структурообразованию и текстурным особенностям получаемого материала, что в условиях высоких градиентов температур является ключевым для изотропности материала. Кроме того, явная ограниченность набора зарубежных материалов, особенно, с учетом отечественных подходов к проектированию авиационных двигателей требует разработки своих, оригинальных материалов.

В связи с этим автором поставлена комплексная задача: через более полное описание физических процессов кристаллизации в условиях высоких градиентов разработать гамму российских синтезированных материалов для технологии селективного лазерного сплавления, исследовать потенциальную применимость для данной технологии не только свариваемых, но и литейных и интерметаллидных сплавов. В качестве основных направлений автором выбраны жаропрочные свариваемые материалы с высокой жаростойкостью, классические литейные сплавы с высокой длительной прочностью и сплавы на основе интерметаллида Ni_3Al , т.е. охвачены практически все группы материалы, представляющие наибольший интерес для изготовления ресурсных деталей горячего тракта ГТД и ГТУ.

Таким образом можно заключить, что работа посвящена решению актуального вопроса разработки научных основ и технологий производства ресурсных деталей методом селективного лазерного сплавления.

Новизна результатов работы

В диссертации Евгенова А.Г. проведены систематические исследования основных оставляющих многофакторного технологического процесса селективного лазерного сплавления применительно к синтезу деталей из жаропрочных сплавов на основе никеля и интерметаллида Ni_3Al . К наиболее важным и оригинальным результатам, полученным в диссертационной работе, следует отнести:

1. Разработка физической модели кристаллизации ванны расплава в процессе СЛС и обоснование механизма стохастической бинаризации КГО кристаллитов, удовлетворительно объясняющего текстурные и структурные изменения при изменении базовых технологических параметров процесса.

2. Установление корреляционной связи между температурным интервалом плавления металлопорошковых композиций с необходимой плотностью энергии при обеспечении пористости на уровне $\leq 0,01\%$, что обеспечило возможность ее предварительного расчета с весьма малой погрешностью.

3. Установление связи плотности энергии при штриховке различных элементов сечений 3D-модели с интенсивностью загрязнения окисленными частицами, образующимися при кипении ванны расплава.

4. Выявление и описание двух механизмов перекрестного загрязнения синтезированного металла: частицами оксидов Al_2O_3 и фрагментами окисленного металлического пара – металлического конденсата.

5. Разработка отечественных жаростойких и жаропрочных материалов на основе никеля и интерметаллида Ni_3Al для технологии селективного лазерного сплавления.

Научная и практическая значимость.

В работе получены важные и оригинальные результаты в части разработки технологических процессов селективного лазерного сплавления, исследования влияния термической и газостатической обработок на структуру и свойства синтезированных жаропрочных материалов, включая длительные высокотемпературные воздействия. Исследована ячеистая и тонкодендритная структура, формирующаяся в процессе СЛС, проведены показательные эксперименты для однозначного установления причин ее возникновения. Теоретические исследования в данном направлении переведены в практическую плоскость для управления остротой текстуры применительно к литейным сплавам, получаемым методом СЛС. Важно отметить и сам факт получения бездефектных (без трещин) образцов литейных и интерметаллидных сплавов на стандартном, не оборудованном дополнительными системами высокотемпературного подогрева, оборудовании, что стало возможным благодаря глубокому пониманию процессов формирования тонкой структуры ванн расплава.

Разработана расчетная концепция прогнозирования загрязнения оборотных порошков в зависимости от цикличности их применения, разработана методика определения зональности загрязнения частицами окислов при имитации плотного заполнения платформы построения деталями.

Практическая ценность работы заключается в разработке большого массива нормативно-технологических документов, включая Государственный стандарт на изделия из жаростойких сплавов, полученные методом СЛС, технологические инструкции и технологические рекомендации на процесс СЛС и термическую, газостатическую, химикотермическую обработки. Разработанные документы являются, по сути, базисом для работы с отечественными жаропрочными материалами в рамках серийного и опытного аддитивных производств. Кроме того, практическая значимость работы подтверждается Актом внедрения результатов, в котором представлена целая

гамма деталей, изготовленных с использованием результатов диссертационной работы, примененных для новых и уже серийных изделий в авиационном двигателестроении.

Достоверность и обоснованность результатов

Все научные положения диссертации и сделанные автором выводы исходят из логики результатов проведенных экспериментов, достоверность которых подкреплена высоким совершенством примененного оборудования, апробированных методик проведения исследований и измерений, подкреплены большим объемом металлографических исследований, микрорентгеноспектрального анализа, просвечивающей микроскопии (в т.ч., прямого разрешения), рентгеновского фазового анализа, рентгеновских методов анализа текстуры и внутренних напряжений. В работе представлен большой объем данных по механическим свойствам, включая кратковременную прочность в интервале рабочих температур, длительную и циклическую прочность. Дополнительным подтверждением достоверности полученных данных является данные по статическим и усталостным испытаниям, полученные при паспортизации разработанных материалов с достаточно большими выборками. Сами по себе подходы к паспортизации полученных методом СЛС материалов сформулированы при непосредственном участии соискателя на базе принятых для классических материалов методик.

Технологии, материалы и нормативные документы, разработанные при непосредственном участии соискателя, внедрены в опытное и серийное аддитивное производство и НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ, и АО «ОДК-Авиадвигатель».

Оформление диссертации

Диссертация соискателя связана внутренней логикой исследований по трем ключевым направлениям: теоретические исследования в части особенностей высокоскоростной кристаллизации в процессе СЛС, разработки материалов и исследовании деградации оборотных порошков и синтезированных материалов при их применении. Положения диссертации обладают научной новизной и практической значимостью. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Основные положения диссертационной работы, результаты и выводы достаточно полно отражены в 28 публикациях (в журналах, рекомендованных ВАК, – 28, в изданиях, индексируемых в WoS и Scopus – 19), 3 патентах РФ, которые имеют высокий научно-методический уровень и полностью отражают основное содержание диссертации.

Оформление диссертации удовлетворительное и оставляет благоприятное впечатление, текст снабжен достаточным графическим и

табличным материалом, подкрепляющим сформулированные выводы и положения.

Замечания по диссертационной работе и автореферату.

1. Предложенная эмпирическая зависимость плотности энергии от температур солидус и ликвидус является ценным практическим результатом для исследованной группы сплавов. Однако для оценки её универсальности необходимо явно указать границы применимости модели: диапазон технологических параметров (мощность, скорость, толщина слоя и т.д.), тип оборудования и характеристик порошка, для которых она валидирована.

2. Методика исследования загрязнения оборотных порошков на реальных деталях различной геометрии описана недостаточно для воспроизведения и независимой проверки результатов. В диссертации отсутствуют: эскизы или ключевые габариты деталей («Завихритель», «Лопатки» и др.), данные об их расположении и ориентации на платформе построения. Это не позволяет оценить корректность вывода о доминирующей роли протяженности контуров и поддержек. В связи с этим остается нераскрытым, проводилась ли оптимизация параметров поддержек для минимизации выбросов и насколько выявленные закономерности справедливы для сплавов с иной температурой плавления и склонностью к окислению.

3. Важные результаты о деградации свойств при высокой плотности заполнения платформы получены только для сплава ВЖ159-ПС. В работе не обсуждаются ограничения и переносимость этих выводов на другие исследованные материалы, где основной проблемой может быть не загрязнение, а трещинообразование. Также неясно, как на результат влияют исходное качество порошка (уровень газовых примесей, наличие дефектов, технологические свойства) и возможные вариации технологических параметров в условиях серийного производства. Для формирования полной картины рекомендуется дать сравнительную оценку влияния плотности заполнения на разные группы разработанных сплавов.

4. В работе представлена масштабная разработка целой гаммы синтезированных материалов (ВЖ159-ПС, ЭП648-ПС, ВЖ171-ПС, интерметаллидных и др.). Однако отсутствует комплексный сравнительный анализ, который бы однозначно обосновывал целесообразность их применения вместо традиционных технологий (литьё, обработка металла давлением). Главным образом по экономической эффективности всего цикла изготовления детали (от синтеза до финишной обработки) с учетом стоимости порошка и его деградации, операций удаления поддержек, ГИП и механической обработки (трудоемкости цикла производства).

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

Заключение

Диссертационная работа Евгенова Александра Геннадьевича представляет собой законченное научное исследование, соответствующее паспорту научной специальности 2.6.17 Материаловедение. В соответствии с п. 9 Положения о присуждении ученых степеней ее вполне можно рассматривать как научно-квалификационную работу, в которой решена важная народно-хозяйственная проблема разработки отечественных жаропрочных материалов и технологий синтеза из них функциональных деталей методом селективного лазерного сплавления для изделий авиационного двигателестроения и наземных газотурбинных установок. По общему объему выполненных исследований и полученных результатов, научной новизне, актуальности и практической значимости представленная диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор А.Г. Евгенов заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Официальный оппонент,
д.т.н.



А.И. Логачёва
12.12.2025

Подпись Логачёвой Аллы Игоревны удостоверяю

Директор по кадрам АО «Композит»



Б.Н. Елаков

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