

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Александра Геннадьевича Евгенова 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.

Аддитивные технологии и технология селективного лазерного сплавления (СЛС), в частности, активно развиваются с конца прошлого века. В последние полтора десятилетия технология СЛС уверенно перешла в разряд способов производстве полноценных ресурсных деталей. Именно с этим связан и повышенный интерес к жаропрочным материалам, получаемым по данной технологии. 3D-печать деталей горячего тракта газотурбинных двигателей и установок справедливо считается наиболее востребованной, поскольку открывает новые возможности по формированию новых систем охлаждения, снижения трудоемкости за счет исключения трудоемких операций пайки, клепки, сварки и подготовительных операций, связанных с механической обработкой. Но потенциальная возможность осуществления технологического процесса на имеющемся оборудовании еще не равняется самому технологическому процессу. Так, все поставляемые технологические решения, материалы и оборудование для технологии СЛС и по настоящее время остаются импортными, по крайней мере, если говорить о серийно работающих на предприятиях установках. Отсутствие отечественных материалов, технологий 3D-печати из них полноценных деталей, их термической обработки – вот те глобальные задачи, на решение которых направлена представленная диссертация Евгенова А.Г. Данная работа затрагивает как научные вопросы структурообразования в процессе сверхбыстрого охлаждения металлических расплавов, эволюции структуры и свойств жаропрочных металлических материалов, так и прикладные, связанные с разработкой технологических процессов СЛС, термической и газостатической обработок, паспортизации материалов и создания необходимого нормативного сопровождения этой новой технологии. **По поставленным задачам и достигнутым результатам работа является крайне актуальной.** Исследование выполнено на самом современном научном и техническом уровне.

Диссертация изложена на 279 страницах, включает введение, четыре главы, выводы и список использованных источников (283 ссылки), и приложение (акт внедрения результатов работы).

Во введении автором обоснована актуальность исследования и описаны его основные задачи.

В первой главе приведен литературный обзор состояния исследований в России и за рубежом по теме диссертации. Рассмотрены особенности формирования структуры в процессе СЛС, освещены сложившиеся подходы к объяснению текстурных особенностей СЛС-материалов, анизотропии механических характеристик, возникающих напряжений. Дан достаточно подробный разбор доступных зарубежных жаропрочных материалов. По всем указанным направлениям выделены проблемные вопросы, требующие углубленных исследований и осмысления.

Вторая глава посвящена теории кристаллизации ванны расплава, объяснению и экспериментальному подтверждению движущей силы образования ячеистой и тонкодендритной структуры. Автором убедительно показано, что формирование ячеек кристаллизации обусловлено концентрационным переохлаждением и не имеет прямой связи с гидродинамическими процессами, связанными с движением теплового источника. Полученные выводы подкреплены исследованиями микроликвации легирующих элементов по сечению ячеек. Большой объем исследований посвящен эпитаксиальному росту ячеек кристаллизации, на основании которых автором предложен механизм стохастической бинаризации кристаллографической ориентации ячеек, объясняющий формирование упорядоченных текстур, отмечаемых в литературных источниках и полученных самим автором. Исследовано влияние основных параметров процесса СЛС (скорости перемещения лазера, межтрекового расстояния и стратегий штриховки) на формирование внутренних напряжений, текстуры и размеров зерен при последующей термической обработки. **В результате впервые получено линейное регрессионное уравнение, связывающее плотность энергии с температурами плавления порошковых композиций, обеспечивающее достаточную точность расчета для первичной отработки режима сплавления.**

Третья глава посвящена разработке отечественных материалов для технологии СЛС и состоит из трех основных разделов, включающих жаростойкие материалы для камер сгорания, литейные сплавы на основе никеля и сплавы на основе интерметаллида Ni_3Al .

Исследования по синтезированным жаростойким материалам посвящены трем сплавам, широко применяемым при классических технологиях производства: ЭП648, ВЖ159 и ВЖ171. Для первых двух материалов проведен комплекс исследований по влиянию условий СЛС (в частности, защитной среды азота) на механические характеристики в зависимости от теплового воздействия, эволюции структуры. Выявлены структурные особенности синтезированных в среде азота сплавов, показаны различные механизмы разупрочнения вследствие последовательного выделения ТПУ-фаз со все более высоким содержанием хрома в сплаве ЭП648, и, напротив, повышения прочности при выделении частиц σ -фазы в сплаве ВЖ159. Проведена корректировка химического состава сплава ВЖ159 по хрому относительно деформируемого аналога для компенсации снижения пластичности синтезированного материала. Разработанные синтезированные материалы паспортизованы для применения в авиационном двигателестроении.

Большая часть этой главы посвящена пионерским исследованиям по синтезу литейных сплавов – наиболее сложных для технологии СЛС несвариваемых сплавов, обладающих, однако, наиболее высокими показателями длительной прочности. В результате исследований установлена сама принципиальная возможность и разработаны технологические процессы получения синтезированных заготовок из сплавов ЖС6К, ВЖЛ12У без трещин на стандартном СЛС-оборудовании без высокотемпературного подогрева. Показано, что большое число карбидов препятствует протеканию рекристаллизации в процессе высокотемпературной обработки, что предопределяет выраженную анизотропию механических свойств, в особенности длительной прочности. Для повышения механических характеристик в направлении наибольшего приложения нагрузок проведены исследования по наведению кристаллографической текстуры.

Выполнен большой объем исследований по СЛС сплавов на основе интерметаллида Ni_3Al : ВКНА4УР, типа ВКНА25, ВКНА1В. В результате под технологию СЛС разработан новый поликристаллический интерметаллидный сплав ВКНА25Р, по длительной

прочности сопоставимый с поликристаллическим аналогом ВКНА4УР, а по усталостным характеристикам значительно превосходящий литые интерметаллидные сплавы.

Четвертая глава посвящена исследованиям и созданию методик оценки загрязнения обратных порошков в процессе СЛС и деградации синтезированного металла при их использовании. В данной главе автором впервые сформулированы механизмы загрязнения обратного порошка, показана связь интенсивности загрязнения порошка частицами окислов с плотностью энергии штриховки по отдельным режимам сплавления. Разработана методика определения коэффициентов загрязнения (коэффициент контаминации) для каждого конкретного режима сплавления (поверхность, контур, подложки и т.п.). Проведены исследования по деградации синтезированного металла в зависимости от количества циклов применения обратного порошка и плотности заполнения платформы построения. Установлены два основных механизма снижения свойств: при попадании дискретных частиц оксида алюминия и частиц окисленного металлического пара. Показано различное воздействие указанных механизмов на кратковременную, длительную и усталостную прочность синтезированного материала. Исследовано влияние загрязнений окислами на долю пор и несплавлений. Разработана методика исследования зональности распределения загрязнений по рабочей зоне построения, сконструированы специальные образцы, обеспечивающие возможность отбора проб порошка на химический анализ из заданной зоны при постоянном сечении на всей высоте построения. Методика впервые реализована в виде нормативного документа – технологической инструкции.

Все перечисленные результаты являются **новыми, как и научные и технологические приемы и подходы, использованные для их получения.**

Достоверность и обоснованность каждого научного вывода, положения или выявленной закономерности подтверждены полученными диссертантом экспериментальными данными, их реализацией на конкретном серийном оборудовании, в рамках опытных и опытно-промышленных партий материалов, использованных при паспортизации и внедрении результатов исследований. Результаты диссертационного исследования имеют высокую научную ценность, практическую значимость, послужили основой создания оригинальных отечественных материалов для технологии селективного лазерного сплавления и являются базой для дальнейшей разработки новых классов материалов для этой технологии.

Результаты диссертации полностью опубликованы в 28 статьях, 3 патентах на изобретения, апробированы на международных и всероссийских конференциях. Автореферат диссертации соответствует содержанию диссертации.

Заключение

В заключении следует отметить, что работа А.Г. Евгенова имеет ряд достоинств, выделяющих ее из числа многих диссертаций.

Диссертанту не только удалось установить общие закономерности структурообразования в процессе селективного лазерного сплавления, и не только создать на основе этих закономерностей гамму отечественных синтезированных жаропрочных сплавов, но и применить их для изготовления деталей авиационных газотурбинных двигателей, разработать несколько нормативных документов, в том числе, ГОСТ на аддитивные технологии для изделий из жаростойких сплавов, получить три патента и издать, в соавторстве со своими коллегами, первую в стране книгу «Селективное лазерное сплавление: Материалы и технологии для синтеза ресурсных деталей» (Москва, 2024).

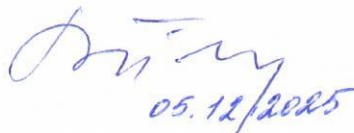
Учитывая эти достоинства диссертации, вряд ли имеет смысл перечислять ее мелкие недостатки. Отмечу только те, которые могут быть, по моему мнению, учтены в дальнейших исследованиях.

1. В работе детально рассмотрены технологические аспекты изготовления аддитивных материалов, но не уделено внимания обеспечению прочности по границам ванн расплава, хотя именно на этих границах зарождаются малые усталостные трещины, которые служат очагами финального разрушения при циклическом нагружении.
2. Качество разработанных сплавов оценено в диссертации по результатам стандартных механических испытаний и температурных испытаний на длительную прочность и усталость. Учитывая, что разработанные сплавы предназначены для деталей газотурбинных двигателей, была бы важной и оценка характеристик термоусталости.

Сделанные замечания, безусловно, не снижают актуальности, высокой научной и практической ценности работы.

Диссертационная работа Александра Геннадьевича Евгенова «Научные основы структурообразования в процессе селективного лазерного сплавления порошковых композиций жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавов для деталей газотурбинных двигателей и установок» соответствует критериям, установленным Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 «О порядке присуждения ученых степеней» к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, соответствует паспорту научной специальности 2.6.17 Материаловедение, а ее автор А.Г. Евгенов заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Официальный оппонент
Д.т.н., профессор


05.12/2025

Л.Р. Ботвина

Ботвина Людмила Рафаиловна
Доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А.
Байкова Российской академии наук
119334, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 49
Телефон (раб.): 8-499-135-96-83
e-mail: lbotvina@imet.ac.ru

Подпись Ботвиной Людмилы Рафаиловны заверяю
Ученый секретарь, к.т.н.
ФГБУН «ИМЕТ им. А.А. Байкова» РАН

О.Н. Фомина

