

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Рогалева Алексея Михайловича

**«Формирование структуры и физико-механических
свойств синтезированного материала жаропрочного
никелевого сплава ЭП648, полученного методом
селективного лазерного сплавления»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
научной специальности 2.6.17. Материаловедение.

1. Актуальность темы диссертации

Постоянное развитие авиационной и космической промышленности направлено на совершенствование весовой эффективности конечного изделия. Снижение веса и стоимости производства — наиболее сложная технологическая задача в области совместных разработок как новых материалов, так и перспективных технологий изготовления этих материалов, в изделиях авиационной техники. Мировые тенденции показывают, что аддитивные технологии являются одним из наиболее устойчиво развивающихся перспективных процессов. Аддитивные технологии позволяют изготавливать изделия практически любой геометрии с высоким комплексом свойств синтезированного материала. На сегодняшний день актуальным является замена традиционных технологии литья при изготовлении сложных изделий, например деталей камеры сгорания газотурбинного двигателя (ГТД) на аддитивные технологии, в частности, технологию селективного лазерного сплавления. Наиболее распространенным отечественным материалом для изготовления большого количества деталей камеры сгорания ГТД по традиционным технологиям, является никелевый жаропрочный сплав марки ЭП648. Сплав ЭП648 традиционно применяется для изготовления таких элементов камеры сгорания как форсунки и завихрители. Однако при традиционной технологии литья изделий из данного сплава сопряжено с рядом трудностей, невысокой экономической эффективностью ввиду сложности конструкции подобных деталей и выходом годного не более 40%.

Разработка технологии получения изделий ГТД на основе жаропрочного никелевого сплава марки ЭП648 с помощью селективного лазерного сплавления является актуальной научно-технической задачей. Диссертационная работа Рогалева Алексея Михайловича определение особенностей формирования структуры и физико-механических свойств синтезированного материала жаропрочного никелевого сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления с применением баротермической и термической обработок.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Научные новизна, защищаемые положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, обоснованы автором и подтверждаются экспериментальными исследованиям. Представленная работа является

завершенным трудом, в котором сформулированы логически выстроенные выводы и рекомендации.

3. Достоверность полученных в работе результатов

Достоверность представленных результатов определяется использованием комплекса современных аналитических методов исследования структуры материалов и оценки их свойств, воспроизводимостью экспериментальных данных, статистической обработкой результатов измерений, соответствием результатов исследований данным, полученным другими группами специалистов. По материалам диссертации опубликовано шесть печатных работ, входящих в перечень ВАК. Две работы в журналах, включенных в международные системы цитирования Scopus и два патента Российской Федерации. Результаты работы были представлены и обсуждены на Всероссийских и международных научных конференциях.

4. Значимость результатов для науки и практики

Научной новизной выполненных исследований являются:

1. Впервые в синтезированном материале жаропрочного никелевого сплава ЭП648 после синтеза в среде азота и последующего проведения баротермической и термической обработок выявлены наноразмерные нитриды хрома, наличие которых положительно сказывается на сопротивлении ползучести синтезированного материала.

2. Установлено, что суммарное содержание кислорода, который наследуется из металлопорошковой композиции и защитной среды, в синтезированном в среде азота материале не должно превышать 150 ppm. Содержание кислорода свыше 150 ppm приводит к значительному увеличению объемной доли трещин в синтезированном материале.

3. Впервые установлена взаимосвязь формирования поверхностей деталей из синтезированного материала жаропрочного никелевого сплава ЭП648 от подводимой плотности энергии. Для формирования верхней поверхности деталей (UpSkin) со значениями шероховатости Ra 4-5 необходимо обеспечить плотность энергии на контуре в интервале 30-39 Дж/мм² и скорости сканирования в интервале 300-1000 мм/с. Для формирования нижней поверхности деталей (DownSkin) со значением шероховатости Ra 14-15 необходимо обеспечить плотность энергии на контуре в интервале 6-8 Дж/мм², независимо от мощности и скорости энергии.

В практическом плане результаты исследований способствуют внедрению селективного лазерного сплавления в авиационную и космическую промышленности, что может в значительной мере определить процесс развития авиационного машиностроения в России и позволит обеспечить создание научно технологического задела, близкого к мировому уровню, направленного на реализацию новых конструктивных решений при соединении деталей в узлы в авиационном строении; снижение материалоемкости и общего веса единицы изделия, увеличению производительности процесса.

5. Общая характеристика содержания диссертации

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы, из 153 наименований и 1 приложения. Общий объем диссертации составляет 132 страниц, включая 62 рисунок и 21 таблиц.

6. Основное содержание работы

Во введении автор формулирует актуальность выбранной цели исследований, указывает на основные задачи, решаемые в диссертационной работе, отмечает научную новизну исследований, практическое значение работы, перечисляет основные положения, вынесенные на защиту, подчеркнута роль аддитивных технологий в современной промышленности.

В первой главе проведен анализ состояния проблемы по методам аддитивных технологий изготовления изделий из металлических порошков на основе обзора литературы, рассмотрены основные принципы селективного лазерного сплавления. Показано, что задачи исследований на решение которой направлена диссертационная работа являются актуальными.

В второй главе рассмотрены материалы и методы исследования, использованные для решения поставленных задач. В качестве материала для исследований был выбран жаропрочный высокохромистый никелевый сплав марки ЭП648 (ТУ14-1-2234-77). Показано современное технологическое и аналитическое оборудование для исследования структуры и свойств полученных образцов в результате селективного лазерного сплавления.

В третьей главе проведены исследования основных фракций порошка, проведена оптимизация параметров процесса селективного лазерного сплавления: мощности излучения, скорости перемещения лазерного излучения, толщина наносимого слоя, тип стратегии штриховки с целью получения плотного материала (минимальная пористость). Найдены оптимальные энергетические условия. Установлено, что предпочтительнее использовать меньшие толщины слоя для получения синтезированного материала с более низкой пористостью, а также использовать шахматную штриховку для снижения пористости. Показано, что микроструктура синтезированного материала имеет сложное строение с закристаллизованными ваннами расплава, состоящими из субзерен с ячеистой структурой. При этом синтезированный в среде аргона материал имеет более высокую пористость, чем в среде азота, но в последнем в структуре присутствуют микротрещины. Установлено, что формирование поверхностей деталей из синтезированного материала сплава марки ЭП648 зависит от подводимой плотности энергии. Кроме этого, необходимо строго регламентировать содержание кислорода в синтезированном материале никелевого жаропрочного сплава ЭП648, которое складывается из кислорода в металлопорошковой композиции и в среде синтеза (азоте), и должно составлять не более 150 ppm.

В четвертой главе представлено исследование влияния термической и баротермической обработок на структуру синтезированного материала. Установлено, что фазовый состав синтезированного материала сплава ЭП648, независимо от среды синтеза, подвергнутого баротермической и термической обработкам, состоит из матричного никелевого γ -твердого раствора и выделений фаз на основе ОЦК твердого раствора хрома (фаза α -Cr), интерметаллидной топологически плотноупакованной (ТПУ) σ -фазы и карбидной фазы типа Cr_{23}C_6 . В материале, синтезированном в среде азота, после баротермической и термической

обработок, методом ПЭМ впервые выявлены наноразмерные (100-500 нм) частицы фазы на основе нитрида хрома, положительно влияющие на сопротивление ползучести синтезированного материала сплава ЭП648. Определено влияние термической и баротермической обработок на структуру и комплекс механических свойств синтезированного материала. Показано, что кратковременная прочность синтезированных образцов после термического воздействия с последующим старением во всех вариантах синтеза превышает прочность литого материала на 30%, а пластические характеристики – в 4-6 раз. Установлено, что, синтезированный материал сплава ЭП648-ПС по свойствам при 20°С превосходит литой сплав ВХ4Л (ЭП648). Причиной повышения механических свойств служит наследственная мелкодисперсная микроструктура синтезированного материала и увеличение плотности упрочняющих фаз.

В пятой главе приведены результаты разработки и внедрения технологий изготовления сложнопрофильных деталей из синтезированного материала жаропрочного никелевого сплава ЭП648. В результате разработана технология изготовления заготовок детали «Завихритель» и заготовки «Корпус агрегата наддува» методом селективного лазерного сплавления МПК сплава ЭП648, выпущена соответствующая научно-техническая документация, технология внедрена в серийное производство АО «ОДК-Авиадвигатель» и АО «НПО Энергомаш» соответственно.

В заключении диссертации приводятся основные результаты и выводы.

7. Личный вклад соискателя в диссертационную работу

Результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично автором, либо в соавторстве с другими специалистами при его непосредственном участии. Основной вклад автора заключается в анализе научно-технической литературы, участие в отработке и оценке влияния технологических параметров процесса селективного лазерного сплавления, комплексному исследованию синтезированного материала жаропрочного никелевого сплава ЭП648, обработку и анализ полученных экспериментальных данных, в том числе разработку необходимой научно-технической документации, написание научных публикаций и выступление с докладами на научных конференциях.

8. Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации.

Автореферат отражает содержание диссертации.

9. Практическая значимость работы

Полученные в работе результаты исследований расширяют представления о структурно-фазовых превращениях, происходящих при формировании материала из никелевого сплава с помощью лазерного излучения в технологии селективного лазерного сплавления и последующей пост обработки. Разработан и защищен патентом RU 2623537 способ изготовления сложнопрофильных деталей селективным лазерным сплавлением металлических порошков жаропрочных сплавов на основе никеля, включающий в себя проведение процесса синтеза в среде азота, баротермическую и термическую обработки. Одним из важнейших научно-технических результатов данной диссертационной работы является разработанные технологии изготовления сложнопрофильных статорных деталей: «Завихритель» авиационных двигателей ПД-8 и ПД-14 и «Корпус агрегата

наддува» ракетного двигателя РД-191М. Данные технологии внедрены НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ в серийное производство АО «ОДК-Авиадвигатель» и АО «НПО Энергомаш». Основными потребителями представленной технологии являются также научные организации СПбПУ, ИТПМ СО РАН, МИСИС, МГТУ им Баумана, МАИ.

Замечания по диссертационной работе:

1. Не исследовалась форма единичного трека (дорожки) в зависимости от энергетических режимов процесса селективного лазерного сплавления.

2. В работе рассматривается плотность энергии (энергия на единицу объема расплавленного материала) выраженная формулой $E = \frac{P}{V h_c l}$ размерностью [Дж/мм³] где P - мощность лазерного излучения, V - скорость сканирования, h_c - толщина слоя, l - расстояние между проходами лазера. Почему на рисунке 3.6, а также в некоторых местах в тексте диссертации плотность энергии размерностью [Дж/мм²] или это затраты энергии на единицу площади, а не плотность?

3. В диссертации не указаны параметры лазерного излучения, тип лазера, диаметр сфокусированного излучения, фокусное расстояние. Варьировались ли при оптимизации два последних параметра?

4. На структуру материала в технологии селективного лазерного сплавления влияет скорость кристаллизации и градиент температур. Проводились исследования по влиянию температуры платформы построения на порообразование и структуру материала?

5. Согласно тексту диссертации результаты, полученные при сравнении двух фракций (10-40 мкм и 10-63 мкм), показывают сопоставимые значения по относительной плотности синтезированного материала, однако фракция с размерностью 10-63 мкм наиболее технологичная, обеспечивает плотноупакованный слой. Почему это повлияло на плотность, ведь диапазоны фракций перекрываются. Сравнилось ли распределение частиц по размерам в этих фракциях?

6. В главе 3 указано, что нитридов в структуре после СЛС не выявлено, однако в главе 4 в структуре материала после ГИП+ТО выявлены нитриды хрома, с чем это связано?

7. В работе не указаны режимы горячего изостатического прессования и термообработки. Т.к. структура после селективного лазерного сплавления отлична от структуры литого материала возникает вопрос, оптимизировались ли режимы пост обработки для материала полученного после селективного лазерного сплавления?

Указанные замечания не снижают ценности диссертационной работы в целом, которая посвящена актуальному научно-техническому направлению получения изделий в авиационной и космической промышленности на основе жаропрочного никелевого сплава марки ЭП648 с помощью селективного лазерного сплавления.

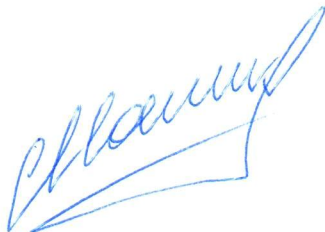
Диссертация представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. Считаю, что диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне, соответствует паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение и удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым

к кандидатским диссертациям «Положение о присуждении ученых степеней» (постановление правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.).

Считаю, что ее автор, Рогалев Алексей Михайлович, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.17. Материаловедение.

Официальный оппонент

Доктор технических наук,



А.Г. Маликов

17 ноября 2025 г.

Сведение о составителе отзыва

Заведующий лабораторией «Лазерные технологии»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

тел. 8 (383) 330-42-68,

E-mail: admin@itam.nsc.ru, <http://itam.nsc.ru>

Подпись Маликова А.Г. заверяю:

Ученый секретарь ИТПМ СО РАН,

к.ф.-м.н.



Ю.В. Кратова

Я, Маликов Александр Геннадьевич, даю согласие на обработку моих персональных данных, связанную с защитой диссертации и оформлением аттестационного дела Рогалева Алексея Михайловича.

