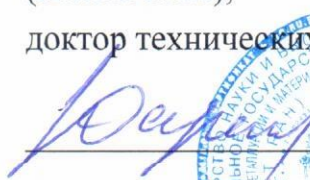


УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по научной работе
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Институт
металлургии и материаловедения им. А.А.
Байкова Российской академии наук
(ИМЕТ РАН),
доктор технических наук


В.С. Юсупов
« 19 » _____ 2025 г.


ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Рогалева Алексея Михайловича
«Формирование структуры и физико-механических свойств синтезированного
материала жаропрочного никелевого сплава ЭП648, полученного методом
селективного лазерного сплавления», представленной на соискание ученой
степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. –
«Материаловедение»

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Рогалева Алексея Михайловича посвящена исследованию формирования структуры и физико-механических свойств синтезированного методом селективного лазерного сплавления материала - жаропрочного никелевого сплава ЭП648.

Развитие авиационной промышленности требует создания прорывных технологий и разработки перспективных материалов. 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. Основным драйвером внедрения аддитивных технологий в аэрокосмическую отрасль является снижение времени освоения и исключение фазы подготовки производства и минимизацию последующей механической обработки.

Важным аспектом при изготовлении сложнопрофильных ресурсных деталей методом селективного лазерного сплавления является: исследование влияния параметров процесса на свойства синтезированного материала, способы снижения пористости, включающие в себя применение баротермической обработки, а также исследование влияния режимов термической обработки на структуру и свойства синтезированного материала. В связи с этим диссертационная работа Рогалева Алексея Михайловича, посвященная исследованию формирования структуры и физико-механических свойств синтезированного методом селективного лазерного сплавления материала жаропрочного никелевого сплава ЭП648 является весьма актуальной.

Структура и основное содержание работы

Представленная диссертационная работа Рогалева А.М. состоит из введения, 5 глав, заключения включая выводы, библиографический список и прилагаемый в приложение акт внедрения результатов. Работа изложена на 132 страницах машинописного текста, содержит 62 рисунок и 21 таблицу. Библиографический список состоит из 153 источника.

Во введении изложены актуальность темы исследования, цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость, выносимые на защиту положения, сведения об апробации работы и публикациях, личный вклад автора, данные, подтверждающие достоверность полученных результатов, структура и объем диссертации.

В первой главе проведен обзор актуальных направлений применения аддитивных технологий и достаточно подробно рассмотрен процесс селективного лазерного сплавления металлических порошков из различных материалов. Подробный анализ литературных данных позволил диссертанту обоснованно сформулировать и определить актуальность области научных исследований, конкретизировать цель и задачи исследования.

Вторая глава содержит общую технологическую схему изготовления заготовок деталей из синтезированных материалов на основе никеля методом селективного лазерного сплавления, методы контроля металлопорошковой композиции после атомизации, характеристики установки для селективного лазерного сплавления, оборудование для проведения баротермической и термической обработок. Широкий набор методов исследований и испытаний материалов, используемых в работе, свидетельствует о высоком уровне проработанности исследовательской базы подготовки автора.

В третьей главе представлены исследования влияния параметров (тип стратегии штриховки лазерного луча, толщина наносимого слоя металлопорошковой композиции, объемная плотность энергии) селективного лазерного сплавления на формирование объемной пористости и микроструктуры синтезированного в среде аргона и азота материала ЭП648. По результатам исследований было установлено, что:

- для получения низкой пористости предпочтительнее использовать меньшие толщины слоя при технологическом процессе;
- для снижения доли микротрещин в объеме синтезированного в среде азота материала необходимо строго регламентировать содержание кислорода;
- для формирования верхних поверхностей (UpSkin) необходимо регламентировать плотность энергии и скорость сканирования, для формирования нижних поверхностей (DownSkin) – плотность энергии на контуре.

В четвертой главе В работе изучено воздействие термической и баротермической обработок на микроструктуру и свойства синтезированного материала сплава ЭП648. Анализ показал, что фазовый состав после всех видов обработок включает γ -твердый раствор никеля, выделения α -Cr, интерметаллидную σ -фазу (ТПУ) и карбиды Cr_{23}C_6 , независимо от среды синтеза. Ключевым достижением является обнаружение в материале, синтезированном в азотной среде, наночастиц нитрида хрома (100-500 нм), которые повышают сопротивление ползучести. Комплекс механических испытаний демонстрирует, что термическая обработка с последующим старением увеличивает кратковременную прочность на 30%, а пластичность — в 4-6 раз по сравнению с литым аналогом. Превосходство синтезированного сплава ЭП648-ПС над литым ВХ4Л (ЭП648) при комнатной температуре обусловлено унаследованной мелкодисперсной микроструктурой и большей плотностью упрочняющих фаз

В пятой главе представлена разработанная и внедренная в серийное производство технология изготовления сложнопрофильных деталей из жаропрочного никелевого сплава ЭП648, синтезированного методом селективного лазерного сплавления (СЛС). В рамках работ создана технология производства заготовок «Завихритель» и «Корпус агрегата наддува», выпущен комплект научно-технической документации. Внедрение технологии осуществлено на предприятиях АО «ОДК-Авиадвигатель» и АО «НПО Энергомаш» соответственно.

В заключении диссертации приведены основные результаты и выводы, полученные в рамках диссертационной работы.

Научная новизна

1. Впервые для жаропрочного никелевого сплава ЭП648 после его синтеза в среде азота и последующего проведения баротермической и

термической обработок выявлены наноразмерные нитриды хрома, наличие которых положительно сказывается на сопротивлении ползучести.

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 между шероховатостью формирующихся поверхностей деталей из синтезируемого сплава ЭП648 и подводимой плотности энергии. Для формирования верхней поверхности деталей с шероховатостью Ra 4-5 необходимо обеспечить плотность энергии на контуре в интервале 30-39 Дж/мм² и скорости сканирования в интервале 300-1000 мм/с, а для формирования нижней поверхности деталей с шероховатостью Ra 14-15 необходимо обеспечить плотность энергии на контуре в интервале 6-8 Дж/мм², независимо от мощности и скорости энергии.

Практическая значимость полученных результатов

1. Установлено предельно допустимое содержание кислорода в металлопорошковых композициях, в среде синтеза и в синтезированном материале сплава ЭП648, обеспечивающее минимальное количество микротрещин в структуре синтезированного материала.

2. Определены основные режимы синтеза для формирования верхних и нижних поверхностей деталей из сплава ЭП648, обеспечивающие минимальные значения шероховатости.

3. Разработан подходящий для сплава ЭП648 способ изготовления сложнопрофильных деталей селективным лазерным сплавлением металлических порошков, включающий в себя проведение процесса синтеза в среде азота, баротермическую и термическую обработки.

4. Разработаны технологии изготовления сложнопрофильных статорных деталей: «Завихритель» авиационных двигателей ПД-8 и ПД-14 и «Корпус агрегата наддува» ракетного двигателя РД-191.

Разработанные технологии изготовления сложнопрофильных статорных деталей внедрены в серийное производство на АО «ОДК-Авиадвигатель» и АО «НПО Энергомаш».

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Достоверность результатов, сформулированных в диссертации Рогалева А.М., не вызывает сомнений и подтверждается использованием аттестованного оборудования, с применением установленных методов исследований и испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ и международных стандартов, а также апробацией результатов работы с получением положительных результатов. Достоверность материалов, изложенных в диссертации, подкреплена обсуждением полученных результатов на международных и всероссийских конференциях.

Соответствие результатов диссертации паспорту специальности

Диссертационная работа Рогалева Алексея Михайловича «Формирование структуры и физико-механических свойств синтезированного материала жаропрочного никелевого сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления» по цели, задачам, методам исследования, содержанию, научной новизне и практической значимости соответствует паспорту научной специальности 2.6.17. -Материаловедение в части п. 1, п. 4 и п. 16.

Апробация работы и публикации

Работа достаточно хорошо апробирована. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на 4 международных и всероссийских конференциях. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ в

руссииских и зарубеежных журналах, из них 6 в журналах из списка ВАК категории К1 и 2 в изданиях, индексируемых в RSCI и приравненных к журналам ВАК категории К1. Получено 2 патента РФ.

Замечания по диссертационной работе

1) Из изображений, приведённых на рис. 3.4, сложно сделать однозначные выводы о наличии или отсутствии микротрещин в синтезированном материале ЭП648-ПС, изготовленном в среде азота и в среде аргона. Для точного определения наличия микротрещин и пустот в материале рекомендуется привести статические данные по количеству обработанных изображений и доле дефектов, выявленных в синтезированном в среде азота и аргона материале;

2) В разделе 3.4 приведен сравнительный анализ структуры синтезированного материала ЭП648-ПС со структурой литого материала ВХ4Л. Литой материал ВХ4Л обрабатывается по схеме закалка с последующим старением, синтезированный материал ЭП648-ПС – горячее изостатическое прессование с последующим старением. В тексте диссертации не проведен сравнительный анализ характера формирования структуры литого и синтезированного материала.

3) В разделе 2.2 на стр. 42 указано, что в работе проводили измерение пикнометрической плотности, однако по тексту работы результаты этих исследований не представлены;

4) Хотя установлено влияние кислорода на трещинообразование, недостаточно раскрыта роль других примесей (серы, азота, углерода) и их взаимодействия с основными легирующими элементами (Cr, Mo, W);

5) Выявлено образование наноразмерных нитридов хрома после ГИП+ТО, но не изучены кинетика и термодинамика их образования, а также не представлены температурно-временные диапазоны оптимального выделения упрочняющих фаз;

б) Технологический процесс сплавления представлен для сред «азот» и «аргон» с выявлением кинетики структурообразования, однако не рассмотрены другие защитные технологические среды, например «гелий» или «гелий-аргоновая смесь», с целью определения наилучшей среды синтеза.

Сделанные замечания, однако, не снижают общую положительную оценку работы, ее научную и практическую значимость.

Заключение по диссертации

Диссертационное исследование Рогалева А.М. является завершенной научно-квалификационной работой, выполненным на актуальную тему на высоком научном уровне. В ней предложены научно обоснованные технические и технологические решения по изготовлению ответственных деталей из сплава ЭП648-ПС с высокими эксплуатационными характеристиками экономически целесообразным и технологически выгодным методом селективного лазерного сплавления для задач авиационно-космической отрасли, что вносит вклад в экономику и обороноспособность нашей страны. В частности, разработаны и внедрены в серийное производство технологии изготовления сложнопрофильных статорных деталей: «Завихритель» авиационных двигателей ПД-8 и ПД-14 и «Корпус агрегата наддува» ракетного двигателя РД-191М.

Диссертация «Формирование структуры и физико-механических свойств синтезированного материала жаропрочного никелевого сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления» о объеме, актуальности, научной новизне и практической значимости удовлетворяет всем требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в актуальной редакции), а ее автор, Рогалев Алексей Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. «Материаловедение».

Диссертационная работа Рогалева Алексея Михайловича «Формирование структуры и физико-механических свойств синтезированного материала жаропрочного никелевого сплава ЭП648, полученного методом селективного лазерного сплавления» рассмотрена и обсуждена в ИМЕТ РАН на совместном коллоквиуме сотрудников Лаборатории прочности и пластичности металлических и композиционных материалов и наноматериалов и Лаборатории конструкционных сталей и сплавов (19 ноября 2025 г., протокол №3). Отзыв составлен на основании диссертации, автореферата и публикаций А.М. Рогалева.

Председатель коллоквиума
Заведующий лабораторией прочности и
пластичности металлических и композиционных
материалов и наноматериалов, главный научный
сотрудник,
чл.-корр. РАН, д.т.н.



Колмаков А.Г.

Ученый секретарь коллоквиума
ведущий научный сотрудник, к.т.н.



Кобелева Л.И.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН)

Адрес: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, 49

Телефон: +7 (499) 135-20-60

Адрес электронной почты: imet@imet.ac.ru

Сайт: <https://www.imet.ac.ru/>