

УТВЕРЖДАЮ

Ректор
д.ф.-м.н., профессор, академик РАН



Кулешов А.П.

набор 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

Автономной некоммерческой образовательной организации высшего образования
«Сколковский институт науки и технологий»

на диссертационную работу **Брыкина Вениамина Андреевича** на тему «Влияние параметров селективной лазерной плавки на структуру и физико-механические свойства изделий из металлопорошковой композиции AlSi10Mg», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности

2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

Диссертация Вениамина Андреевича Брыкина посвящена разработке методики автоматизированного подбора параметров технологии селективной лазерной плавки (СЛП) металлопорошковых композиций для достижения требуемых структуры и физико-механических свойств изделий.

Актуальность и значимость. Требования к изделиям, производимым аддитивно из металлических материалов, постоянно растут. Если ранее на результат селективной лазерной плавки смотрели как на заготовку (т.е. промежуточную часть производственного процесса), то теперь от этого конкретного метода производства ожидают получения функциональных изделий, в значительной степени соответствующих растущим требованиям. Удовлетворение этих требований возможно во многом за счёт управления параметрами технологического процесса (в т.ч. и энергетическим вкладом при синтезе порошка). Поиск допустимого диапазона таких параметров и их дальнейшая оптимизация – это отдельный этап научно-исследовательских технологических работ, который может занимать значительное время, усложняя и удорожая производственные процессы на предприятии. Более того,

тщательно подобранные для отдельно взятой установки аддитивного производства и конкретного порошкового материала технологические параметры оказываются неприменимы на других установках или при смене материала. Таким образом, особенно важными становятся решения, позволяющие автоматизировать технологические решения.

В связи с этим тема диссертационной работы, посвященная поиску решений по повышению качества конечных изделий и снижению времени на проведение опытно-конструкторских и технологических работ, является актуальной, а результаты исследований имеют не только научное, но и существенное практическое значение.

Научная новизна. Научные положения диссертации фокусируются на установлении закономерностей влияния параметров энергозатрат, таких как мощность лазерного излучения, скорость сканирования и толщина слоя порошка, на структуру и физико-механические свойства изделий из металлопорошковой композиции AlSi10Mg. В рамках работы разработаны программные инструменты, которые автоматизируют процесс подбора технологических параметров, что существенно повышает эффективность производства и сокращает время на подготовку.

Практическая значимость работы заключается в разработке и внедрении новых методов и инструментов, которые позволяют существенно улучшить технологические процессы аддитивного производства. Результаты работы имеют широкую применимость для научно-исследовательской и экспериментальной деятельности участка промышленного аддитивного производства и подтверждены успешным внедрением в производственные процессы на предприятии АО «Лазерные системы». Эти инструменты могут быть использованы на различных предприятиях, работающих с аддитивными технологиями, что подтверждает высокую практическую ценность работы.

Подтверждение опубликованных в научной печати основных результатов диссертации. Основные результаты работы отражены в 16 научных работах, в том числе: 4 статьях в журналах из списка,

рекомендованного ВАК, 2 в статьях, индексируемой Scopus, а также докладах на научно-технических конференциях.

Материал диссертации изложен на 195 страницах машинописного текста, содержит 18 таблиц, 92 рисунка. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 108 наименований, а также трёх приложений.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и основные задачи, определена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов и апробация работы.

В первой главе проведён анализ актуального состояния и основных тенденций развития ключевых методов изготовления изделий из металлопорошковых композиций, проводится анализ современных проблем технологической подготовки аддитивного производства в т.ч. селективной лазерной плавки металлических порошков. Автором с помощью сравнительного анализа систем технологической подготовки производства показано, что сегодня перспективным является улучшение существующих программных комплексов путём разработки методов экспресс-анализа результатов опытных исследований, оперативной оценки качества выполнения технологических задач, а также снижения требований к квалификации специалиста, выполняющего анализ и оптимизацию параметров технологического процесса. Это обуславливает важность разработки программных инструментов, которые могли бы увеличить эффективность процесса технологического проектирования аддитивного производства.

Вторая глава посвящена презентации методического аппарата исследования. Автор подробно описывает материалы и методы проводимых экспериментов, приводя критерии оценки результата и описывая варьируемые параметры технологического процесса. Приведены характеристики исследуемой металлопорошковой композиции сплава AlSi10Mg марки RS-300-45.

Предложена схема опытных работ по оптимизации параметров технологического процесса селективной лазерной плавки, подробно представлены этапы экспериментальных работ и оборудование для исследования результатов эксперимента.

В третьей главе описан ход исследовательских работ по поиску эффективных параметров СЛП и анализу получаемых физико-механических свойств.

Разработанная методика предполагает входной контроль металлопорошковой композиции (рассмотрен на примере RS-300-45), лазерную плавку, анализ и отбор единичных треков на порошковой подложке, выращивание методом СЛП объёмных образцов и исследование их структуры и физико-механических свойств. Результат исследования позволил выделить эффективный набор параметров синтеза изделий методом СЛП, позволяющий достичь относительной плотности в 99,7%.

В четвертой главе разработаны и внедрены в технологический цикл программные инструменты экспресс-анализа результатов экспериментов и автоматизации процесса подбора параметров селективной лазерной плавки. В частности, программный инструмент экспресс-анализа результатов томографии образцов позволяет определить наиболее эффективные с точки зрения сплошности структуры образцы и соответствующие им технологические параметры процесса СЛП.

В заключении сформулированы основные выводы диссертации.

Основные научные результаты, полученные соискателем, заключаются в следующем:

Выявлены зависимости структуры и физико-механических свойств материала в изделии от технологического режима (энергетического вклада, скорости лазерного сканирования и высоты слоя) при селективной лазерной плавке металлического порошка, которые оказывают наибольшее влияние на сплошность структуры, прочность и пластичность выращиваемого изделия. Установлено, что влияние высоты слоя при синтезе RS-300-45 приводит к

вытягиванию зёрен в направлении геометрического центра ванны расплава – при увеличении высоты слоя в 3 раза, размер зерна увеличивается в 2,8 раза.

Разработан программный компонент для экспресс-анализа результатов экспериментов по синтезу единичных треков. Применение этой методики позволяет сократить исследуемый диапазон параметров на 50% в рамках одного эксперимента и снизить время всех исследовательских работ по поиску параметров на 25%.

В ходе эксперимента по селективной лазерной плавке 99 единичных треков порошка RS-300-45 проведено исследование их непрерывности с использованием оптической микроскопии. Определены эффективные диапазоны параметров для синтеза непрерывных треков на отечественной установке Addsol D50: мощность лазера [220:400] Вт и скорость сканирования [200:1400] мм/с.

Создана программа для экспресс-анализа результатов томографического исследования, позволяющая определить наиболее эффективные параметры СЛП для достижения однородной мелкозернистой структуры (до 1,5 мкм) и высокой плотности образцов (99,7% и 99,5%). Установлены оптимальные параметры: [325 Вт; 900 мм/с; 30 мкм] и [350 Вт; 1500 мм/с; 30 мкм].

Установлено, что использование программных компонентов с оптимизированной компоновкой образцов сокращает цикл опытных работ по селективной лазерной плавке на 53,5%. Но и без оптимизации компоновки разработанные средства экспресс-анализа уменьшают время НИР на 10,8%. При этом охватывается 92,5% потенциально эффективных параметров СЛП. Это позволяет утверждать, что инженер-технолог не пропустит оптимальный набор параметров печати в процессе исследований.

Достоверность полученных результатов подтверждается большим объемом проведенных комплексных исследований, корректной обработкой полученных данных, а также применением взаимодополняющих аналитических методов исследования. Результаты работы прошли апробацию в виде публикаций в журналах, рекомендованных ВАК, а также докладывались на

международных конференциях. Сделанные в работе выводы научно обоснованы и не противоречат литературным данным.

Соответствие диссертационной работы паспорту специальности.

Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы в области теоретических и экспериментальных исследований физико-химических процессов получения полуфабрикатов и изделий из порошковых материалов, а также в области совершенствования технологических процессов производства изделий из порошковых материалов.

Автореферат в полной мере отображает содержание диссертации.

Недостатки и замечания по диссертационной работе. К недостаткам работы следует отнести следующее:

1. Недостаточно подробно обоснована применимость разработанных программных средств экспресс-анализа и автоматизации подбора параметров технологии СЛП для других металлопорошковых композиций.

2. Не показано в явном виде взаимодействие и связь предложенных инструментов с базовыми модулями АСТПП.

3. Недостаточно подробно рассмотрено влияние свойств порошка на качество слоя и процесс СЛП.

4. В работе установлены экспериментальные зависимости микроструктуры аддитивного материала от параметров процесса СЛП. Однако, обсуждению влияния этих параметров на физико-механические свойства материала не уделено достаточного внимания.

В остальном, результаты диссертационной работы имеют существенное значение для дальнейшего совершенствования и повышения эффективности промышленных аддитивных технологий, а также повышения их применимости в реализации наукоёмких задач. Они позволяют существенно повысить эффективность изготавливаемых аддитивно деталей и сборочных единиц за счет нового уровня технологической подготовки производственных процессов.

Диссертация Брыкина В.А. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технологические решения и разработки, связанные усовершенствованием методов технологической подготовки процессов СЛП.

Указанные замечания не снижают практической значимости диссертации, которая выполнена на высоком научном уровне и удовлетворяет всем требованиям Положения ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор, Брыкин Вениамин Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5 – Порошковая металлургия и композиционные материалы (технические науки).

Материалы диссертации заслушаны и обсуждены на научном семинаре Центра Технологий Материалов, протокол №1211 от 6 ноября 2024 года. На заседании присутствовало (очно и в режиме онлайн) 15 человек, выступило 3 человека. Результаты голосования: «за» – 15, против – нет, воздержавшихся – нет.

Доцент, директор,
Центр Технологий Материалов, Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»

Кандидат физико-математических наук
Валерьевич

Сергеичев Иван

Подпись Сергеичева Ивана Валерьевича удостоверяю,

РУКОВОДИТЕЛЬ ОТДЕЛА
КАДРОВОГО АДМИНИСТРИРОВАНИЯ
ТУК О.С.



Адрес организации: Территория Инновационного Центра «Сколково», Большой бульвар д.30, стр.1, Москва 121205, Россия.

Наименование организации: Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий»

Электронный адрес: inbox@skoltech.ru

Телефон: +7(495)280-14-81