

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу

Добрянского Василия Николаевича

«Влияние гранулометрического состава порошков из сплава AlSi10Mg на закономерности процесса селективного лазерного плавления», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. «Материаловедение» (технические науки)

### **Актуальность темы диссертации**

Диссертационная работа Добрянского Василия Николаевича представляет собой всестороннее исследование влияния гранулометрического состава на процессы формирования единичных трэков при селективном лазерном плавлении (СЛП) алюминиевого сплава AlSi10Mg. Среди большого количества аддитивных технологий для металлов СЛП является основным методом для создания сложных деталей с высокой детализацией. Однако для успешного применения этой технологии критически важно понимание и учет влияния характеристик исходного материала – порошков, используемых в СЛП. Гранулометрический состав оказывает существенное влияние на процесс плавления. Порошковые слои, состоящие из частиц различного размера, могут отличаться следующими свойствами: текучесть, плотность упаковки, эффективный коэффициент теплопроводности, динамика денудации, эффективный коэффициент абсорбции лазерного излучения и др. В связи с этим, исследования в настоящей диссертационной работе актуальны.

### **Общая характеристика работы**

Работа структурирована классическим образом: введение, литературный обзор по тематике исследования, подробное изложение экспериментальных методов, результаты исследований, расчеты с помощью аналитической модели и заключение.

В работе исследуется влияние гранулометрического состава порошкового материала на морфологию единичных трэков при различных параметрах процесса. В качестве исходного материала использовался порошок сплава AlSi10Mg со стандартным гранулометрическим распределением (20–63 мкм). Для исследования были выделены различные фракции с помощью просеивания. Для полученных фракций были определены химический состав, насыпная плотность, гранулометрическое распределение,

температура плавления и теплоёмкость. Основная часть работы посвящена определению характеристик единичных треков, образовавшихся при плавлении порошкового слоя лазером в установке СЛП. Дополнительно к подробным экспериментальным данным приводятся расчеты с помощью аналитической модели Розенталя. На первом этапе оцениваются эффективные коэффициенты теплопроводности и абсорбции лазерного излучения с помощью решения обратной задачи. Остальные теплофизические свойства измерены экспериментально. Автором предлагается методика оценки влияния гранулометрии порошка на морфологию ванны расплава с использованием моделей подвижного теплового источника и эксперимента по сплавлению единичных треков.

Стиль изложения не вызывает нареканий, приведены довольно подробные экспериментальные данные в приложениях к настоящей диссертационной работе. В целом автором продемонстрировано комплексное понимание исследуемой проблемы. Приведены экспериментальные исследования, теоретический анализ и математическое моделирование.

### **Научная новизна работы**

Научная новизна диссертационной работы Добрянского В.Н. не вызывает сомнения и заключается в следующем:

1. Автором показано влияние гранулометрического состава порошка сплава  $AlSi10Mg$  на химический состав порошковой пробы. Установлено возрастание содержания кремния с увеличением среднего размера частиц.

2. В работе предложена новая методика оценки эффективных коэффициентов теплопроводности и поглощения порошкового слоя с помощью экспериментальных результатов по сплавлению единичных треков и применения стандартных моделей для подвижных тепловых источников.

3. Автором установлены зависимости морфологии ванны расплава и дефектности структуры единичных треков от гранулометрического состава исходной металлопорошковой композиции. В работе показано существенное влияние размера частиц порошка на величину энерговклада, необходимого для его сплавления порошкового слоя в 60 мкм. Предложена методика учёта влияния гранулометрического состава при оптимизации технологических условий лазерного синтеза.

### **Практическая ценность диссертации**

Полученные в ходе диссертационной работы экспериментальные данные, методики и выводы показали значительное влияние гранулометрического состава на процесс селективного лазерного плавления. Методика оценки теплофизических свойств порошкового слоя, разработанная в диссертационной работе, может быть полезна при расчетах температурных полей для процесса селективного лазерного плавления. Основная практическая ценность диссертации заключается в подробных экспериментальных исследованиях по морфологии единичных трэков, что позволит проводить валидацию более сложных моделей процесса СЛП с учетом переотражения лучей, фазовых переходов и гидродинамики. Также представленные данные крайне полезны при выборе оптимальных параметров процесса, таких как мощность лазера, скорость сканирования, параметр перекрытия, отступ контурного прохода от границы, компенсационные параметры и др.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием современного поверенного оборудования с лицензионным программным обеспечением, а также применением современных методов экспериментальных исследований и математического моделирования.

### **Соответствие автореферата диссертации**

Автореферат и опубликованные по теме диссертации работы полностью отражают содержание диссертации.

Соответствие автореферата диссертации Добрянского В.Н. подтверждается точным отражением ключевых элементов и результатов, изложенных в самой диссертационной работе.

### **Замечания**

1. Получен результат по вариации химического состава порошкового материала в зависимости от гранулометрического состава (Раздел 2.2 настоящей диссертации). Данный результат является новым и полезным в контексте стандартизации порошковых материалов для аддитивных технологий. Однако следует отметить, что точность использованных методов для измерения концентраций компонентов (сравнение интенсивностей пиков рентгенограмм и энергодисперсионный анализ)

весьма ограничена. Более убедительный результат предполагает использование таких аналитических методов как масс-спектрометрия или оптико-эмиссионная спектрометрия.

2. На многих изображениях поперечных сечений единичных лазерных дорожек наблюдаются характерный узор, по-видимому, отражающий направления и интенсивности конвекционных потоков в ванне расплава (Рисунки 34-39 настоящей диссертации). Данное явление никак не упоминается и не обсуждается в рамках работы, несмотря на внушительное количество приведенных экспериментальных данных.

3. В работе приводится лишь оценка теплоемкости по правилу смеси для пористых сред (частицы порошка и поры, заполненные инертным газом). В связи с тем, что весомую часть исследования занимают расчеты температурных полей с помощью аналитической модели и также были получены экспериментальные кривые для всех образцов порошковых материалов с помощью дифференциально-сканирующей калориметрии, данная теплофизическая характеристика могла бы быть измерена экспериментально.

4. В предложенной методике по определению эффективных теплофизических параметров с использованием экспериментальных данных и аналитической модели Розенталя имеются существенные допущения. Автором приводятся найденные коэффициенты поглощения и теплопроводности путем решения обратной задачи. Необходимо отметить, что лишь в начальном этапе формирования ванны расплава размеры частиц могут оказывать какое-либо влияние на эффективный коэффициент абсорбции. Действительно более мелкие частицы могут привести к появлению дополнительного рассеяния и переотражения. Но необходимо отметить, что после формирования ванны расплава, коэффициент поглощения будет определяться теплофизическими свойствами жидкой фазы; кроме того, при достижении температуры кипения расплава будет наблюдаться существенная деформация поверхности ванны (формирование углубления), что приведет к увеличению эффективного коэффициента поглощения вплоть до 0,9 в том числе для алюминиевых сплавов, что подтверждается приведенными экспериментальными данными (для режимов большого энерговыклада (более 700 Дж/м) влияние размера



частиц на морфологию ванны расплава нивелируется). Так как в модели не учитываются фазовые переходы, расчет поглощения энергии по принципу трассировки лучей (ray tracing) и особенности лазерного плавления в режиме «замочной скважины», оптимизированные теплофизические параметры могут быть использованы лишь для качественного сравнения различных фракцией порошка в рамках данного исследования.

5. Так как основные теплофизические свойства для модели Розенталя были получены путем решения обратной задачи, была продемонстрирована довольно высокая сходимость между расчетами и экспериментальными данными. Однако, возможность применения полученных данных для других экспериментов (например, при увеличении толщины порошкового слоя) может быть крайне ограничена из-за низкой сходимости за пределами исследованного окна технологических параметров СЛП. Таким образом, для валидации полученных свойств необходимы дополнительные эксперименты.

6. Толщина порошкового слоя в 60 мкм будет наблюдаться для процесса СЛП с шагом платформы в 30 мкм и насыпной плотностью порошка в 0,5 от плотности сплошного материала. Для обоснования выбора толщины порошкового слоя при постановке экспериментов с единичными трэками в работе могла бы дополнительно приводиться оценка стационарной толщины порошкового слоя в процессе СЛП.

## **Заключение**

Сделанные замечания носят рекомендательный характер, могут послужить основой для дальнейшего развития работы и не снижают научной и практической ценности диссертации и общей высокой оценки работы.

Диссертационная работа Добрянского Василия Николаевича выполнена на высоком научно-техническом уровне, представляет собой самостоятельную законченную научно-квалификационную работу, в которой на примере порошка из сплава AlSi10Mg изложены закономерности влияния гранулометрического состава на химический состав, теплофизические свойства, морфологию ванны расплава и оптимальные параметры сплавления.

Результаты диссертационной работы были представлены автором на 6 научно-технических конференциях, опубликованы в 12 печатных работах, из них 5 в журналах, включенных в международные системы цитирования.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-16 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденном Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Добрянский Василий Николаевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. «Материаловедение» (технические науки).

Официальный оппонент  
PhD, заведующий лабораторией  
«Катализ и переработка  
углеводородов»  
НИТУ МИСИС

25.11.2024

---

Чернышихин Станислав Викторович

119049, Москва, Ленинский пр-т, 4, стр. 1  
+7 495 955-01-37  
S.chernyshikhin@misis.ru

Подпись Чернышихина Станислава Викторовича удостоверяю.

Проректор по безопасности и  
общим вопросам

(должность)

Исаев И.М.

(Ф.И.О.)

