

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель Генерального
директора по науке

НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ

В.В. Антипов

« 10 »

2022 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

Халил Асмаа Мостафа Рабие

«Исследование структуры и свойств сплавов на основе алюминия после
процесса лазерного плавления»,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по научной специальности 2.6.1 – «Металловедение и термическая обработка
металлов и сплавов».

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Халил Асмаа Мостафа Рабие посвящена актуальному вопросу адаптации существующих и разработки новых алюминиевых сплавов для аддитивного производства. В аддитивных технологиях кристаллизация сплава сопровождается возникновением высоких внутренних напряжений вследствие температурного градиента, что приводит к повышенной склонности материала к трещинообразованию. Кроме того, большой перегрев расплава под действием лазера вызывает испарение легирующих компонентов и отклонение от номинального химического состава сплава.

Научная новизна, практическая значимость полученных результатов, полученных в диссертации

Важность работы заключается в разработке решений по повышению стойкости сплавов к образованию трещин после лазерного плавления, формированию однородной мелкодисперсной структуры, обеспечению необходимого химического состава конечного продукта.

Значительный положительный эффект модифицирования с помощью скандия, циркония, титана и бора хорошо известен при литье и сварке

алюминиевых сплавов. В работе подтверждено, что добавки скандия, циркония, титана, и бора эффективно измельчают зерно в сплавах на системы Al-Zn-Mg-Cu (7075, 7020) и Al-Cu-Mg (2024) как в слитках, так и после поверхностного лазерного плавления (ПЛП), способствуют подавлению образования нежелательных столбчатых кристаллитов и снижению склонности к трещинообразованию.

Существенной ценностью работы является разработанный комплекс решений для получения однородной мелкозернистой структуры в зоне лазерного плавления свободной от трещин: (1) модифицирование сплава добавками, инициирующими гетерогенное зарождение кристаллов (Ti, B, Sc, Zr), и эвтектикообразующими элементами (Fe, Ni, Si); (2) использование подогрева до температур не ниже 400 °C в процессе поверхностного лазерного плавления; (3) проведение гомогенизации слитков перед лазерным плавлением; (4) увеличение содержания легкоплавких элементов (Zn и Mg) в сплаве для компенсации их угара в процессе лазерного плавления. Кроме того, предложены составы новых сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu, обеспечивающих формирование однородной структуры после ПЛП, и имеющих перспективы применения в аддитивном производстве.

Достоверность результатов и обоснованность выводов

Достоверность результатов не вызывает сомнений и подтверждается их согласованностью с литературными данными. Это позволяет утверждать, что обозначенная в работе цель исследования достигнута, а положения, выносимые на защиту, экспериментально доказаны.

Структура и основное содержание работы

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, описания используемых материалов и экспериментальных методов, глав с результатами исследования и списка использованной литературы. Число страниц в диссертационной работе 174, рисунков 98, таблиц 20, ссылок в списке литературы 191.

Во введении поставлена цель работы, обоснованы ее актуальность, научная и практическая значимость.

В первой главе проведен литературный обзор. Проанализировано влияние параметров процесса и температуры рабочей зоны на формирование структуры алюминиевых сплавов. Также рассмотрено влияние эффективного интервала кристаллизации (ЭИК) на образование кристаллизационных трещин и влияние второстепенных и основных элементов на микроструктуру и механические свойства. Описаны существующие на сегодняшний день технологии аддитивного производства, их особенности, преимущества и

недостатки. Установлены основные причины образования кристаллизационных трещин, пористости, анизотропии свойств и высоких термических напряжений при аддитивном производстве алюминиевых сплавов, а также основы выбора систем легирования на основе алюминия, предназначенных для аддитивного производства. В результате анализа литературы для исследования были выбраны сплавы двух серий AA7xxx и AA2xxx, которые являются наиболее популярными высокопрочными сплавами для многих областей применения, однако по литературным данным лазерная обработка этих сплавов не дала хороших результатов.

Во второй главе подробно описаны экспериментальные подходы, использованные при выполнении диссертационной работы, а также составы 32 исследованных сплавов, рассчитанные значения их ЭИК и экспериментально определенные характеристики твердости и размера зерна в литом состоянии.

В третьей главе анализируется влияние модифицирующих элементов Sc, Zr, Ti-B, Fe-Ni на эффективный интервал кристаллизации, микроструктуру в литом состоянии и твердость сплавов систем Al-Zn-Mg-Cu и Al-Cu-Mg. Исследованы особенности формирования микроструктуры и дефектов, образующиеся в условиях быстрого затвердевания в зоне лазерного плавления (ЗЛП). ЗЛП стандартных сплавов AA7075 и AA2024 (без каких-либо добавок) и модифицированных сплавов с FeNi (7075-FeNi) и Cr (2024-Cr) содержали большое количество трещин. Модифицированные сплавы ScZr и TiB для обеих систем продемонстрировали меньшее количество трещин в ЗЛП. На примере модельных сплавов Al-Cu показано, что неравновесные эвтектические фазы являются одним из критических факторов, ответственных за образование трещин при лазерном плавлении. Гомогенизационный отжиг может быть использован для обеспечения качества структуры ЗЛП и контроля образования трещин за счет растворения неравновесных фаз.

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния гомогенизационного отжига и дополнительного легирования на повышение характеристик исследуемых сплавов. Представлены решения для устранения столбчатой микроструктуры и растрескивания. Гомогенизационный отжиг сплавов проводили перед процессом лазерного плавления для достижения равномерного распределения легирующих элементов и растворения неравновесных фаз с целью уменьшения их вредного влияния на кристаллизацию после лазерного плавления и получения однородной и стабильной структуры ЗЛП. Гомогенизированные сплавы имели меньше кристаллизационных трещин в ЗЛП. Добавление ScZr и TiB привело к полному устранению трещин и измельчению структуры ЗЛП при сохранении

зоны столбчатых зерен. Проведена оптимизация химического состава сплавов. Показано, что комбинация Ti, B и Zr способствует подавлению зоны столбчатых зерен, однако не устраняет кристаллизационные трещины. В сплавах 7075-FeNiTiBCo и 7075-TiB-4Si получили превосходную морфологию ЗЛП с однородными и ультрамелкими зернами без зоны столбчатых зерен и трещин. Уменьшение содержания Zn и Mg (при использовании алюминиевых сплавов 7020) и модифицирование TiB позволило получить ЗЛП без дефектов.

В пятой главе представлено описание подходов для оптимизации и совершенствования процесса лазерного плавления, структуры сплава после лазерного плавления и механических свойств, сформулированы основные выводы. Показано улучшение качества микроструктуры путем нагрева обрабатываемых образцов во время лазерного плавления до температуры около 400 °С, при этом не образовывались трещины, а структура ЗЛП стала мелкозернистой. Более того, в сплаве 7075-0.5Ti+0.1B+0.5Zr полностью исчезли границы между ЗЛП. Были рассчитаны потери от испарения Zn и Mg и проведена их компенсация при изготовлении новых сплавов с высоким содержанием Zn и Mg. После применения ПЛП, химический состав ЗЛП был таким же, как и для сплава 7075.

Результаты диссертационной работы обсуждены на международных конференциях и полностью опубликованы в 4 печатных работах, которые рекомендованы ВАК.

Замечания по диссертационной работе

1. Следует пояснить методику расчета величины эффективного интервала кристаллизации (ЭИК) (в частности, в таблице 2.1 и на стр. 64). По имеющимся данным программа TermoCalc позволяет рассчитывать только температуры ликвидуса и солидуса, а не ЭИК.
2. На рисунках 3.2 и 4.18 (в отличие от рисунка 4.27) для разных участков кривой Шейла не указаны фазы, которые образуются в этих участках.
3. На рисунке 2.1 (стр. 51) и стр. 57 запланировано проведение рентгенофазового анализа (XRD), однако по тексту диссертации результаты не приведены.
4. На рисунке 2.1 (стр. 51) в методах исследования запланировано определение механических свойств литых образцов до и после ПЛП. Не приведены значения механических свойств при растяжении литых образцов для сплавов типа 2024, а также материала после ПЛП. Также не предложены составы новых сплавов для системы Al-Cu-Mg для аддитивного производства (задача 5, стр.12).
5. В работе одним из главных выводов (стр. 84-85) является то, что выделения фаз по границам зерен и неоднородность структуры слитков

приводит к зарождению трещин при ПЛП, что является важным с научной точки зрения. Рекомендуется привести примеры возможного практического применения гомогенизации в аддитивном производстве, в котором в качестве исходного материала для синтеза используются не слитки, а порошки или проволоки.

6. В работе рассмотрена очень низкая скорость сканирования 1 мм/с, которая практически не приемлема в аддитивном производстве вследствие значительного увеличения длительности изготовления детали. В случае оценки возможности применения предлагаемых составов при больших скоростях печати, следует учитывать, что увеличение скорости сканирования (более 100 мм/с) может привести к повышенной склонности к трещинообразованию предлагаемых сплавов и невозможности их использования.

7. В работе утверждение (в частности, на стр. 61), что модификаторы и легирующие компоненты снижают эффективный интервал кристаллизации, рекомендуется обосновать теоретически.

8. Рекомендуется подробнее пояснить принцип уменьшения количества испарившихся Zn и Mg в присутствии TiB. Указанная причина (в равномерности распределения элементов вдоль ЗЛП за счет образования центров кристаллизации, и как следствие гетерогенного зарождения во время быстрой кристаллизации) не объясняет этот факт.

9. Одна из главных задач работы заключалась в оценке эффекта модифицирующего действия разных элементов применительно к аддитивному производству. Однако размер зерна, судя по всему, был количественно измерен только для слитков. В связи с этим следует пересмотреть главный вывод 1 на стр. 160, что модифицирующие элементы снижают размер зерна в 15-30 раз после ПЛП.

10. Рекомендуется привести пояснения, как были построены зависимости склонности к образованию трещин.

Сделанные замечания имеют рекомендательный характер и не влияют на высокую оценку диссертационной работы Халил Асмаа Мостафа Рабие.

Заключение (выводы о работе)

Диссертационная работа «Исследование структуры и свойств сплавов на основе алюминия после процесса лазерного плавления», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском технологическом университете "МИСиС".

Соискателю Халил Асмаа Мостафа Рабие может быть присвоена степень кандидата технических наук по специальности 2.6.1 — «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов » по результатам публичной защиты диссертации.

Дата рассмотрения и утверждения отзыва

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании Президиуме НТС НИО «Титановые, магниевые, бериллиевые и алюминиевые сплавы» 10 ноября 2022 г. (протокол №56).

Начальник лаборатории
«Алюминиевые деформируемые
сплавы», к.т.н.



Андрей
Аркадьевич
Селиванов

Заместитель начальника НИО
«Титановые, магниевые,
бериллиевые и алюминиевые
сплавы», к.т.н.



Михаил
Сергеевич
Оглодков

Начальник НИО «Титановые,
магниевые, бериллиевые и
алюминиевые сплавы», к.т.н.



Виктория
Александровна
Дуюнова

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ВИАМ),
Адрес: 105005, Россия, Москва, ул. Радио д.17
Телефон: +7 (499) 261-86-77
Адрес электронной почты: admin@viam.ru

Подписи Селиванова А.А., Оглодкова М.С., Дуюновой В.А. заверяю

Ученый секретарь
к.т.н., доцент




Данила
Сергеевич
Свириденко