

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Гурьянова Дениса Андреевича «Структурно-фазовое состояние и механические свойства никелевого жаропрочного сплава, полученного методом электронно-лучевого аддитивного производства», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1. - металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

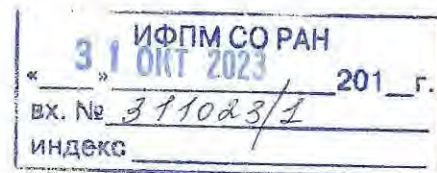
Актуальность диссертационной работы.

Аддитивные технологии являются широко распространенным объектом современных научных исследований. Несмотря на разнообразие имеющихся подходов к аддитивному производству, большинство авторов сосредоточены на методах, использующих в качестве исходного материала порошки, а в качестве теплового источника лазерный луч. Это создает недостаток исследований, описывающих влияние технологических параметров на формирование структурно-фазового состава и свойств материалов, полученных иными аддитивными методами. В работе Гурьянова Д.А. рассматривается электронно-лучевая аддитивная технология, при которой исходный материал может подаваться в ванну расплава в виде прутка или проволоки. В качестве исследуемого материала выступает жаропрочный никелевый сплав первого поколения ЖС6У. В настоящее время нет работ, сочетающих в себе такую комбинацию технологии и материала. Несмотря на то, что сплав ЖС6У относится к сплавам первого поколения и не содержит дорогостоящих легирующих элементов (в сравнении со сплавами последующих поколений), он всё же является дорогим материалом, и снижение его отходов в производственном цикле является актуальной задачей. Кроме того, не менее актуальной проблемой является восстановление поврежденных изделий из жаропрочных никелевых сплавов, что также может быть реализовано с помощью рассматриваемой аддитивной технологией. Полученные данные об особенностях формирования структуры, фазового состава и механических свойств позволят в дальнейшем перейти к применению более дорогих современных никелевых сплавов. Кроме того, получение направленной структуры в изделии из сплава первого поколения покажет перспективность проволоочной электронно-лучевой аддитивной технологии как метода направленной кристаллизации. В связи с этим диссертационная работа Гурьянова Д.А. является актуальным исследованием.

Анализ содержания диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, 6 разделов, выводов, списка литературы из 120 наименований. Всего 143 страницы, в том числе 53 рисунка и 20 таблиц.

Во введении подчеркивается актуальность темы и рассмотрены текущие исследования в этой области. Также были сформулированы цели и задачи работы, описана научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Представлены положения, выносимые на защиту. В работе также указан список публикаций и конференций, где результаты работы были представлены. Автор указал свой личный вклад, соответствие работы требованиям специальности, а также описал структуру и объем диссертации.



В первом разделе приведен литературный обзор научных публикаций по теме диссертационной работы. Рассмотрены особенности химического, фазового и структурного состава жаропрочных никелевых сплавов; современные технологии и методы, применяемые при получении изделий из данных сплавов. Описаны фазовые составляющие, которые могут присутствовать в жаропрочных никелевых сплавах и условия их формирования. Рассмотрены современные методы аддитивного производства металлических изделий, в том числе описаны особенности производства касательно направленной кристаллизации никелевых сплавов и перспективы их применения. Представлено сравнение механических свойств и характерных дефектов аддитивных изделий из никелевых сплавов, полученных посредством различных аддитивных технологий.

Изложенный материал проиллюстрирован снимками и схемами, что упрощает его восприятие. Всего рассмотрено примерно 80 публикаций, из которых 90% работ опубликованы за последние 5 лет, что свидетельствует об актуальности диссертационной работы. Приведенный литературный обзор подводит к обоснованию выбора технологии и материала, исследованных в работе Гурьянова Д.А.

Во втором разделе описаны материалы и методы диссертационной работы. Приведена методика получения образцов изделий упрощенной формы в виде тонких стенок из прутков сплава ЖС6У методом электронно-лучевого аддитивного производства. Описана методика проведения эксперимента по имитации восстановления поврежденного изделия, который проводился с целью оценки сохранения структурной стабильности и механических свойств, аддитивно сформированных изделий.

Были изложены методы прямого изучения структуры и фазового состава, включающие оптическую микроскопию, сканирующую и просвечивающую электронную микроскопию, а также рентгеновскую дифрактометрию. Также были проведены исследования механических свойств путем одноосного растяжения при комнатной и повышенной температурах.

Разделы с третьего по шестой являются оригинальными и отражают основные новые результаты проведенного исследования.

Третий раздел посвящен подбору технологических параметров проволоочного электронно-лучевого аддитивного производства образцов изделий из сплава ЖС6У. Так как сочетание материала и технологии исследовалось впервые, то были установлены технологические режимы обеспечивающие получение тонких стенок с заданной геометрией и не содержащих макроскопических дефектов.

Установлено, что для получения бездефектного материала из сплава ЖС6У недостаточно контролировать величину погонной энергии по мере увеличения высоты образцов, что связано с увеличивающимся вкладом радиационного рассеяния тепла. Данный эффект приводит к необходимости контроля величины погонной энергии в начале и конце каждого наносимого слоя. В ходе проведения эксперимента по восстановлению поврежденного изделия показано, что переходная область не имеет каких-либо отличий по структуре и фазовому составу (в сравнении с исходной и восстановленной областью).

В четвертом разделе продемонстрированы изменения структуры образцов по мере увеличения их высоты. Отмечается, что область, содержащая основное структурно-фазовое состояние, занимает наибольший объем образцов. Указано, что размеры областей с нежелательной структурой (вблизи подложки и у поверхности образцов) не зависят от размеров получаемых образцов, следовательно, объемная доля «необходимой» структуры

увеличивается с увеличением размеров формируемого изделия. Установлено, что при использовании подложки без направленной или монокристаллической структуры происходит формирование направленной структуры аддитивно полученного материала с преимущественной кристаллографической ориентацией. По измеренным расстояниям между осями дендритов первого порядка установлено, что в области с направленной структурой диапазон величин температурного градиента соответствует современным методам направленной кристаллизации. По итогам проведения структурных исследований были предложены схемы влияния отвода тепла и формы фронта кристаллизации на формирования микроструктуры при аддитивном выращивании.

Пятый раздел посвящен исследованиям фазового состав аддитивно сформированных образцов, а также особенностям распределения химических элементов. Показано, что повторное плавление и нагрев аддитивно сформированных слоев не приводит к формированию нежелательных хрупких фаз по всей высоте аддитивного материала. Установлено измельчение всех структурно-фазовых составляющих на разных масштабных уровнях. Отмечено повышенное содержание химических элементов с атомным радиусом больше радиуса никеля в γ - фазе, что является благоприятным эффектом.

Шестой раздел посвящен механическим свойствам исследуемого материала. Установлено, что механические свойства материала аддитивного образца из жаропрочного никелевого сплава ЖС6У не уступают свойствам исходного материала в литом состоянии при комнатной температуре и при повышенной температуре 800°C, а при температуре 900°C, близкой к эксплуатационной, превосходят свойства исходного материала. Предложено объяснение такого поведения, заключающееся в том, что периодическое термическое воздействие и достигнутые значения величины температурного градиента приводит к тому, что структурно-фазовое состояние аддитивного материала соответствует состоянию отожженного литого материала.

После оригинальных разделов сформированы **выводы**, обобщающие проведенные исследования.

Научная новизна заключается в том, что впервые были исследованы особенности и закономерности формирования структурно-фазового состава и свойств сплава ЖС6У, подаваемого в виде прутков при электронно-лучевом аддитивном производстве. Показана принципиальная возможность получения направленной структуры в сплаве, предназначенном для равноосного литья. Установлены особенности аддитивного процесса, обеспечивающие достижения механических свойств исследуемого материала, превосходящих свойства исходного материала.

Практическая значимость заключается в возможности производства сложнопрофильных изделий из никелевых сплавов, что позволяет существенно снизить трудоемкость и материалоемкость производства по сравнению с традиционно применяющейся технологией.

Автореферат диссертационной работы полностью соответствует и отражает основное содержание диссертационной работы.

Замечания:

1. В диссертационной работе неоднократно упоминается мисфит – несоответствие параметров кристаллических решеток γ - и γ' -фаз. В разделе 5 анализируется

микросегрегация легирующих элементов, приводящая к изменению мисфита. Вместе тем в диссертации не приводятся значения параметров кристаллических решеток этих фаз.

2. В третьем разделе сделано заключение о необходимости применения экспоненциального снижения тока электронного пучка, а также о необходимости применения послойного контроля погонной энергии и приводятся отдельные графики данных процессов. На одном графике указана зависимость тока пучка от номера слоя (или высоты аддитивно формируемого образца), на втором графике приводится зависимость тока пучка от длины слоя. Однако для большей наглядности было бы желательнее привести зависимость тока пучка от времени аддитивного процесса, тем самым совместив два вышеописанных графика.

3. В работе не выдержано однообразное обозначение направлений аддитивного выращивания изделий и траектории сканирования. Например, на рисунке 4.1 эти направления обозначены как АВ и НП, тогда как на большинстве рисунков и в тексте диссертации использованы обозначения ВD и ST, соответственно.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Гурьянова Д.А., а работа в целом производит хорошее впечатление.

Заключение

Диссертационная работа Гурьянова Д.А. «Структурно-фазовое состояние и механические свойства никелевого жаропрочного сплава, полученного методом электронно-лучевого аддитивного производства» является законченным научным исследованием. Выполненная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов, технические науки (паспорт специальности, п. 2, п. 6, п. 9) и всем требованиям п. II 11 и 13 Положения о присуждении учёных степеней ВАК, а Гурьянов Д.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.1 - Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки).

Согласен на включение своих персональных данных в документах, связанных с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Заведующий кафедрой физики, химии и теоретической механики
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения
высшего образования «Томский государственный архитектурно-
строительный университет»,
доктор физико-математических наук,
доцент,
научная специальность:
01.04.07. – Физика конденсированного состояния



Ю.В. Соловьева

Подпись Юлии Владимировны Соловьевой заверяю.
Ученый секретарь Ученого совета ФГБОУ ВО ТГАСУ



Ю.А. Какушкин