

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. - металлведение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

Актуальность диссертационной работы.

Жаропрочные сплавы на основе никеля широко применяются при изготовлении деталей газотурбинных агрегатов транспортного и энергетического назначения, а также применяемых в химической и в космической отраслях компонентов. Для повышения эксплуатационных характеристик подобные изделия получают по технологиям направленной кристаллизации, что способствует повышению сопротивления высокотемпературной ползучести. Современный основанный на жидкометаллическом охлаждении металлургический метод получения изделий с направленной структурой является многоэтапным и затратным по времени. Кроме того, он не всегда обеспечивает формирование необходимой направленной структуры материала. В настоящее время активно развиваются альтернативные технологические подходы, одним из которых является проволочное электронно-лучевое аддитивное производство. Преимущества данного метода заключаются в его высокой производительности, отсутствии загрязнений из окружающей среды (т.к. процесс протекает в вакууме), возможности прецизионно управлять процессами тепло- и массопереноса в ванне расплава. В диссертационной работе Гурьянова Д.А. впервые исследована взаимосвязь технологических параметров проволочного электронно-лучевого аддитивного производства образцов из сплава ЖС6У и его структурно-фазового состояния. Показана принципиальная возможность получения изделий с направленной структурой из материала, предназначенного для получения изделий с равноосной структурой. В связи с этим *диссертационная работа Гурьянова Д.А. является безусловно актуальной.*

ИФПМ СО РАН		
« 25 »	ОКТ	2023
201	г.	
вх. №	251023/9	
индекс		

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 представлена актуальность проводимого исследования, проведен очень краткий анализ современного состояния решаемой проблемы, сформулированы цели и задачи работы, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, а также положения, выносимые на защиту. Приведен перечень публикаций по теме диссертационной работы и перечень конференций, на которых были апробированы полученные результаты. Указан личный вклад автора, соответствие содержания диссертации паспорту специальности, приведены структура 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. Дана краткая справка по современным методам аддитивного производства металлических изделий, в том числе описаны особенности производства никелевых сплавов, состояние и перспективы их применения. Представлен сравнительный анализ 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. *Приведенный литературный обзор подтверждает обоснованность выбора технологии и материала, исследованных в работе.*

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

Отметим, что представлены методы исследования структуры и фазового состава, включающие в себя оптическую микроскопию, сканирующую и просвечивающую электронную микроскопии, рентгеновскую дифрактометрию. Также представлены методы исследования механических свойств в процессе статического одноосного растяжения при комнатной и повышенной температурах.

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

В третьем разделе рассмотрено влияние основных технологических параметров проволочного электронно-лучевого аддитивного производства (ускоряющее напряжение U , кВ; ток электронного пучка I , мА; скорость перемещения рабочего стола v , мм/мин) на заданную геометрию и макроскопические дефекты в формируемых образцах, а также их совокупное влияние. *Продемонстрирована возможность получения бездефектных изделий* в виде тонких стенок из жаропрочного никелевого сплава ЖС6У методом проволочного электронно-лучевого аддитивного производства. Подчеркнем, что *определены диапазоны значений технологических параметров аддитивного процесса (скорость перемещения рабочего стола, ток электронного пучка и погонная энергия)*. Рассмотрено влияние технологических параметров на образование дефектов. Установлено, что для получения бездефектного материала из сплава ЖС6У недостаточно обеспечивать экспоненциальное уменьшение погонной энергии по мере выращивания образцов, необходимо контролировать энергозатраты в процессе нанесения каждого слоя. Продемонстрирована возможность восстанавливать поврежденные изделия из сплава ЖС6У методом электронно-лучевого аддитивного производства, обеспечивая бездефектную структуру в переходной области. Предложены схемы снижения отвода тепла из ванны расплава.

В четвертом разделе показано, что при аддитивном методе получения образцов из сплава ЖС6У макроструктура материала имеет четыре характерные структурные области. Кратко данные области можно описать следующим образом: I – наличие планарной структуры; II – область формирования столбчатых дендритов с осями второго порядка; III – в данной области прекращается химическое влияние подложки; IV – область перехода от столбчатой структуры к равноосной. При этом область, содержащая основное структурно-фазовое состояние, занимает наибольший объем образцов. В случае «восстановленного» образца не наблюдается каких-либо структурных особенностей, при этом переходная область является гомогенной. Продемонстрировано отсутствие влияния подложки, состоящей из отличного от аддитивно формируемого материала, на кристаллографическую ориентацию, что позволяет использовать относительно доступные материалы в качестве подложек. *Важно отметить, что согласно полученным данным, величина температурного*

градиента при проволочном электронно-лучевом аддитивном производстве образцов из сплава ЖС6У достигает величин, свойственных современным методам направленной кристаллизации.

Основываясь на литературных данных и результатах настоящего исследования, предложены схемы, демонстрирующие влияние направлений отвода тепла на формирование структуры при аддитивном выращивании

Пятый раздел содержит данные о микросегрегациях и выделении вторичных фаз в сплаве ЖС6У после проволочного электронно-лучевого аддитивного процесса. Описывается фазовый состав аддитивно сформированных образцов, в том числе особенности распределения химических элементов. *Установлено, что сложная термическая история не приводит к формированию хрупких фаз вроде фазы Лавеса по всей высоте аддитивного материала. В то же время те же особенности аддитивного процесса приводят к измельчению всех структурно-фазовых составляющих: γ' - фазы, карбидов и γ/γ' - эвтектики. Отмечено благоприятное распределение химических элементов между γ - и γ' - фазами.*

Шестой раздел посвящен исследованию механических свойств получаемого материала. Установлено, что механические свойства материала аддитивного полученного образца из жаропрочного никелевого сплава ЖС6У не уступают свойствам исходного материала в литом состоянии как при комнатной, так и при повышенной температуре 800°C. *Более того, при близкой к температуре эксплуатации изделия температуре 900°C, свойства аддитивного полученного образца из жаропрочного никелевого сплава ЖС6У превосходят свойства исходного материала.* Предложено соответствующее объяснение: периодическое термическое воздействие и достигнутые значения величины температурного градиента приводят к тому, что структурно-фазовое состояние аддитивно полученного материала соответствует состоянию отожженного литого материала.

Подводя итоги оригинальных разделов, сформулированы **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. Полученные результаты могут являться научной основой разработки способов формирования структурно-фазового состава жаропрочного сплава в процессе изготовления методом проволочного

электронно-лучевого аддитивного производства. Установленные особенности формирования структуры вносят существенный вклад в понимание кристаллизации жаропрочного сплава в условиях аддитивного производства, характеризующегося локальностью процессов кристаллизации и охлаждения. Важно, что определенные диапазоны параметров проволочного электронно-лучевого аддитивного производства, которые могут быть использованы в дальнейшем.

Показана принципиальная возможность получения методом проволочного электронно-лучевого аддитивного производства бездефектных изделий с направленной структурой из литейного жаропрочного никелевого сплава ЖС6У. Установлены особенности аддитивного процесса, обеспечивающие достижения высоких механических свойств исследуемого материала.

Практическая значимость заключается в том, что показана возможность производства сложно профильных изделий из никелевых сплавов, что позволяет существенно снизить трудоемкость и материалоемкость производства по сравнению с традиционно применяющейся технологией.

Использование полученных экспериментальных данных позволяет получать бездефектные изделия методом проволочного электронно-лучевого аддитивного производства. При этом возможно существенно упростить подбор технологических параметров.

Существенно, что принципиально возможна направленная кристаллизация в аддитивно получаемом изделии без применения монокристаллических подложек.

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

По диссертационной работе есть и ряд замечаний:

1. Цель диссертационной работы, которая «...заключается в экспериментальном установлении особенностей формирования направленной структуры и фазового состава жаропрочного сплава ЖС6У в процессе проволочного электронно-лучевого аддитивного производства, реализующем условия локальной металлургии, и их влиянии на механические свойства» шире поставленных задач.

2. Некорректно сформулирована задача «*Определить **оптимальные** значения технологических параметров (ускоряющее напряжение, скорость перемещения рабочего стола, ток электронного пучка) проволочного электронно-лучевого аддитивного производства, обеспечивающих получение бездефектных образцов из жаропрочного сплава с заданными геометрической формой и направленной структурой*», так как понятие оптимальные означает «Наиболее благоприятный, наилучший» (см. Словарь русского языка: В 4-х т. / РАН, Ин-т лингвистич. исследований; Под ред. А. П. Евгеньевой. — 4-е изд., стер. — М.: Рус. яз.; Полиграфресурсы, 1999; (электронная версия): Фундаментальная электронная библиотека). Фактически же автор подразумевает наилучшие в определенных условиях, а не вообще наилучшие для любых случаев. Как следствие, Выводы используют тот же термин **ОПТИМАЛЬНЫЕ**.

3. При определении технологических параметров, обеспечивающих формирование бездефектного материала, были рассмотрены ускоряющее напряжение, ток электронного пучка, скорость перемещения рабочего стола, траектория печати и угол подачи прутка относительно траектории движения электронного пучка. Однако не были рассмотрены такие аспекты аддитивного процесса как размеры и геометрия подаваемого прутка, а также частота и форма развертки электронного пучка.

4. В заключении говорится о том, что структурно-фазовый состав аддитивно полученного материала близок к исходному литому материалу, подвергнутому термической обработке, что и обеспечивает высокие механические свойства. Считаю, что следовало провести стандартную термическую обработку аддитивно полученных образцов для подтверждения данного утверждения.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Гурьянова Д.А., а рецензируемая работа 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. – Metalловедение 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 - Metalловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки).

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

Профессор кафедры общей и экспериментальной физики
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский государственный университет»,
доктор физико-математических наук,
профессор,
научная специальность:
01.04.07. – Физика конденсированного состояния

А.И. Потееаев

Подпись д.ф.-м.н., профессора А.И. Потееаева заверяю.



Подпись удостоверяю
Ведущий документовед
Андреевко И.В.