

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Рашковец Марии Владимировны «Структура и свойства никелевых
сплавов, полученных по аддитивной технологии с использованием метода
прямого лазерного выращивания», представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – «Материаловедение»

Диссертационная работа Рашковец М.В. посвящена анализу структуры, фазового состава и свойств опытных образцов никелевых сплавов, полученных аддитивным методом прямого лазерного выращивания из порошкового материала сплавов. Проведенные исследования позволили установить закономерности формирования структурных составляющих в процессе прямого лазерного выращивания образцов никелевых сплавов на основе систем Ni-Cr-Mo, Ni-Co-Cr и Ni-Fe-Cr, а также выявить их влияние на комплекс механических свойств.

Современные аддитивные методы и технологии в настоящее время находятся на пике активного изучения и разработки, что позволит значительно повысить производительность и снизить расход материалов при изготовлении сложнопрофильных деталей, а точное воспроизведение сложной геометрии сократит последующую механическую обработку готовых изделий.

Преимуществом рассматриваемой в диссертационном исследовании аддитивного метода прямого лазерного выращивания является возможность получения крупногабаритных сложнопрофильных деталей, востребованных в таких областях промышленности как авиа- и ракетостроение, где одним из наиболее используемых материалов являются никелевые сплавы. Отмеченные материалы зачастую содержат в своем составе порядка десяти элементов и характеризуются сложным фазовым составом, обладающим широкой номенклатурой формирующихся структур.

Сложность изготовления деталей аддитивными методами обусловлена неоднократным термоциклированием, возникающим от повторного прохождения лазера при выращивании деталей, что приводит к ряду фазовых и структурных превращений, значительно отличающихся от возникающих при классических технологиях обработки материалов. Учитывая высокую чувствительность никелевых сплавов к воздействию температуры, формирующиеся структуры могут как положительно, так и отрицательно сказываться на свойствах конечной детали, выполненной из сложнолегированных никелевых сплавов.

В связи с этим, изучение влияния технологических параметров в процессе выращивания детали с целью определения закономерностей формирования структурно-фазовых составляющих в никелевых сплавах является необходимым и актуальным направлением.

Анализ содержания диссертационной работы. Диссертационное исследование Рашковец М.В. изложено на 164 страницах и содержит шесть глав, введение, заключение, список литературы (247 наименований) и два приложения.

Во введении диссертационной работы соискатель раскрывает актуальность темы исследования, на основе которой формулирует цель и задачи, приводит научную новизну, теоретическую и практическую значимость результатов выполненной работы, основные положения, выносимые на защиту, а также представляет методы исследования.

Первая глава диссертационной работы посвящена детальному анализу отечественной и зарубежной научно-технической литературы, связанной с никелевыми сплавами и аддитивными методами и технологиями. Подробно описаны структурные составляющие никелевых сплавов и их влияние на механические свойства. Рассмотрены классические и аддитивные методы получения изделий из никелевых сплавов, а также влияние технологических параметров на структуру никелевых сплавов при классическом и аддитивном получении. Сделаны выводы о перспективности проводимого исследования.

Во второй главе автором диссертационного исследования описаны параметры исходных порошковых материалов, а также результаты их фазового и структурного анализа. Описан аддитивный метод формирования исследуемых материалов методом прямого лазерного выращивания, а также технологические режимы рабочей установки. Представлены методы исследования структуры и механических свойств.

В третьей главе диссертации представлены результаты структурных исследований методами световой и электронной микроскопии. Проведена оценка пористости сформированных образцов из сплавов. В результате выполненных исследований автором выявлены пределы параметров и режимов, позволяющие получать материалы с минимальной пористостью, не превышающей 1,1 %, и необходимой структурой. Анализ влияния различных режимов и параметров на структуру и фазовый состав формируемых материалов подкреплено численным моделированием температурных полей.

В четвертой главе описаны результаты проведенных структурных и фазовых исследований никелевых сплавов на основе систем Ni-Cr-Mo, Ni-Co-Cr, Ni-Fe-Cr с использованием методов электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Автором диссертационной работы выявлены особенности формирования фаз, в частности, морфология формирующейся фазы Ni_3Al в сплаве Ni-Co-Cr с дисперсионным механизмом упрочнения, выделение пластинчатых частиц δ -фазы на границах зерен сплава Ni-Cr-Mo, а также установлено, что основной упрочняющей фазой в сплаве Ni-Fe-Cr после дополнительной термической обработки является фаза Ni_3Al , так как устойчивые к высокотемпературному нагреву карбонитриды (Nb,Ti)NC удерживают значительную долю ниобия, необходимого для формирования Ni_3Nb фазы, являющейся для данного сплава основной.

Пятая глава посвящена анализу механических свойств сформированных образцов по схеме статического, динамического и циклического нагружения, в частности, на примере сплава Ni-Fe-Cr показано, что многочисленные дендритные границы, ориентированные перпендикулярно направлению внешних усилий при

динамическом и циклическом нагружениях, представляют собой эффективные структурные барьеры, приводящие к дополнительным затратам энергии, необходимой для разрушения материалов.

В шестой главе приведены сведения об апробации полученных результатов. Представлен акт внедрения результатов в ИТПМ СО РАН для реализации аддитивных процессов, а также акт использования результатов диссертационного исследования в учебном процессе НГТУ.

В заключении работы представлены выводы, сформулированные по результатам, полученным при выполнении диссертационного исследования.

Научная новизна. В ходе выполнения диссертационной работы с применением структурных методов исследования установлена взаимосвязь между режимами аддитивной установки прямого лазерного выращивания и формируемым структурно-фазовым состоянием образцов из никелевых сплавов систем Ni-Cr-Mo, Ni-Co-Cr и Ni-Fe-Cr. Выявлено, что для сплава системы Ni-Cr-Mo не происходит образования игольчатых частиц δ -фазы, снижающих механические свойства материала, морфология отмеченных частиц – пластинчатая. Показана зависимость между формируемой морфологией упрочняющей Ni₃Al-фазы в дисперсионно-твердеющем сплаве системы Ni-Co-Cr и применяемыми режимами, а именно характерное выделение округлых по форме частиц размером в интервале 20–40 нм при использовании энергии лазерного луча на уровне 12–16 Дж/мм² и формирование частиц кубической морфологии (со средним размером 45 нм) при увеличении энергии до 24 Дж/мм². В образцах никелевого сплава системы Ni-Fe-Cr, полученных при энергии лазерного излучения 21,2–23,6 Дж/мм², зафиксировано выделение частиц Ni₃Al-фазы; полное выделение Ni₃Al-частиц происходит с применением дополнительной термической обработки, что способствует двукратному увеличению прочностных характеристик и повышению ударной вязкости образцов сплава Ni-Fe-Cr в 1,5 раза.

Достоверность результатов диссертационной работы. Достоверность полученных в процессе диссертационного исследования результатов обеспечивается комплексом взаимодополняющих методов исследования с использованием современного оборудования, соответствующего стандартам для мировых материаловедческих лабораторий. Полученные соискателем данные не противоречат сведениям, представленным в отечественной и зарубежной литературе по теме исследования. Основные результаты исследования неоднократно докладывались на международных научно-технических мероприятиях, а также отражены в 12-ти научных работах, две из которых опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, а восемь – в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus.

Использование комплексного подхода к изучению структуры и фазового состава методами просвечивающей электронной микроскопии, которое позволило определить структурно-фазовые преобразования в никелевых сплавах при послойном формировании образцов из них, является весомым теоретическим и научным вкладом. Теоретические результаты диссертационной работы

используются в учебном процессе Новосибирского государственного технического университета при проведении практических занятий по дисциплинам, связанным с технологией конструкционных материалов, а также с физическими методами исследования материалов.

Практическая значимость работы заключается в установлении зависимостей между технологическими режимами аддитивной установки прямого лазерного выращивания и формирующемся структурно-фазовым состоянием в образцах никелевых сплавов на основе систем Ni-Cr-Mo, Ni-Co-Cr и Ni-Fe-Cr.

По тексту диссертации имеются замечания.

1. В качестве энергетического показателя, используемого при получении образцов, в работе используется эффективная энергия лазерного излучения или плотность энергии лазерного излучения (Дж/мм²), однако в Заключение используется уже мощность лазерного излучения (Вт), как основной варьируемый параметр. Отмеченное создает некоторое неудобство при анализе результатов работы.
2. В таблице 3.1 для результатов пористости не приведены доверительные интервалы.
3. В работе не поставлена задача оценки влияния термической обработки на структуру и свойства материалов, однако рассматривается термически обработанный сплав на основе системы Ni-Fe-Cr.
4. Следует отметить, что в работе автор получает методом аддитивного лазерного сплавления не сплавы, а образцы из порошков соответствующих сплавов.

Отмеченные замечания носят уточняющий и рекомендательный характер и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Рашковец М.В.

Таким образом, содержание диссертационной работы «Структура и свойства никелевых сплавов, полученных по аддитивной технологии с использованием метода прямого лазерного выращивания» Рашковец М.В. соответствует пунктам 1, 2, 5 научной специальности 2.6.17 – «Материаловедение» (в соответствии с предыдущей редакцией номенклатуры паспорту специальности 05.16.09 – «Материаловедение (в машиностроении)»).

Текст автореферата полностью соответствует содержанию диссертационного исследования и опубликованным автором работам.

Учитывая вышеизложенное, объем выполненного исследования, основные выводы и их научное и практическое значение, новизну полученных результатов, считаю, что диссертационная работа Рашковец М.В. «Структура и свойства никелевых сплавов, полученных по аддитивной технологии с использованием метода прямого лазерного выращивания» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему. Решение задач, поставленных в диссертационном исследовании, имеет не только научное значение, но и обладает практическим вкладом для развития современного аддитивного производства изделий конструкций из никелевых сплавов.

Представленная работа полностью соответствует всем требованиям к кандидатским диссертациям, предъявляемым п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК РФ (Постановление Правительства 842 от 24 сентября 2013 г.). Автор диссертационной работы Рашковец Мария Владимировна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – «Материаловедение».

Даю свое согласие на обработку моих персональных данных и включение их в аттестационное дело Рашковец М.В.

Шаркеев Юрий Петрович, доктор физико-математических наук (01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»), профессор, главный научный сотрудник и заведующий лабораторией физики наноструктурных биокomпозитов, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН) Адрес: 634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4, e.mail: sharkeev@ispms.ru, тел.: +7 9138062814.

Главный научный сотрудник лаборатории физики наноструктурных биокomпозитов ИФПМ СО РАН

Ю.П. Шаркеев

Подпись Шаркеева Ю.П. заверяю

Ученый секретарь ИФПМ (кандидат физ.-мат. наук)
06.06.2022

Н.Ю. Матолыгина

Проставлен в совет 10.06.2022 (Подпись) / Тоцкий А.Р.

С отзывом ознакомлена / Рашковец М.В.

10.06.2022