



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева»

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086
Тел.: +7 (846) 335-18-26, факс: +7 (846) 335-18-36
Сайт: www.ssau.ru, e-mail: ssau@ssau.ru
ОКПО 02068410, ОГРН 1026301168310,
ИНН 6316000632, КПП 631601001

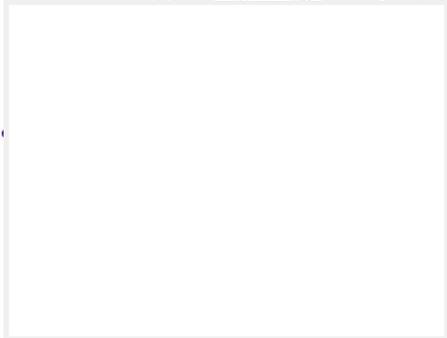
06 ИЮН 2022

№ 104-2411

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор –
проректор по научно-
исследовательской работе,



доцент
С.Ф.Фьев
2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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

Актуальность темы диссертационной работы

Интерес инженерного и научного сообществ к изучению «послойных»
3D-технологий обусловлен их бесконкурентной возможностью производить
сложные по конфигурации металлические детали, геометрия которых не может
быть воспроизведена с применением классических производственных
процессов. Однако, сложные тепловые поля, возникающие при выращивании
деталей, в значительной степени усложняют задачу по созданию конструкций
аддитивными технологиями. А использование сложных по составу материалов,
которые, зачастую, являются основой сложнопрофильных деталей, значительно
усложняет понимание структурных преобразований в материалах и, как
следствие, выбор рациональных режимов аддитивного процесса.
Диссертационная работа Рашковец М.В. сконцентрирована на
сложнолегированных никелевых сплавах, образующих при определенных

тепловых условиях ряд стабильных и метастабильных фаз, которые оказывают прямое влияние на качество формируемых материалов, а также на их конечные механические свойства. Автором рассмотрено три системы никелевых сплавов различного химического состава с проявлением твердорастворного (Ni-Cr-Mo) и дисперсионного (Ni-Co-Cr, Ni-Fe-Cr) механизмов упрочнения, а также влияние сформированной структуры на механические свойства сплавов при статическом, динамическом и циклическом нагружениях.

Учитывая вышеизложенное, диссертационное исследование Рашковец М.В. относится к **важному** и **актуальному** направлению современной инженерии, а полученные результаты имеют как научное, так и прикладное значение. Цель и задачи, поставленные в работе, в полной мере отражают логику исследования, а основные 6 глав работы – методологию, результаты и выводы проведенного исследования.

Анализ содержания диссертационной работы

Во введении автор обосновывает актуальность исследования, формулирует цель и задачи, представляет новизну результатов и положения, выносимые на защиту, а также теоретическую и практическую значимость проведенного исследования.

В главе 1 представлен литературный обзор, содержащий актуальную информацию по состоянию исследований в области аддитивных процессов и классических технологий производства металлических материалов, в частности, никелевых сплавов, а также подробно описаны фазовые составляющие никелевых сплавов и их влияние на механические свойства.

Во 2 главе дана характеристика структуры и фазового состава исходных порошковых сплавов, используемых в работе; подробно описан аддитивный процесс получения исследуемых образцов – прямое лазерное выращивание, а также используемые технологические параметры процесса; в полной мере изложены методы оценки микроструктуры, фазового состава и механических свойств сформированных никелевых сплавов при статическом, динамическом и циклическом нагружении, а также методика пробоподготовки образцов для

всех видов исследований.

В 3 главе работы автор уделяет внимание оценке дефектов микроструктуры, а также закономерностям формирования микроструктуры в материалах при использовании различных технологических параметров процесса прямого лазерного выращивания. Так, в соответствии с представленными экспериментальными данными, в структуре никелевых сплавов возникает направленный рост столбчатых дендритов с увеличением вводимой энергии лазерного излучения при шаге слоя 0,04 мм. Особенностью строения при использовании шага слоя 0,6 мм является присутствие характерных зон, обладающих зерненным строением, отличным от основной зоны слоя, которая представлена типичным для аддитивных процессов столбчатым строением. Автор идентифицирует отмеченные области как зоны сплавления, которые не оказывают влияния на механические свойства сформированных материалов. Пористость материалов закономерно уменьшается при введении в материал большего количества энергии при шаге слоя 0,04 мм и находится на уровне, не превышающем 1,1 %, при шаге слоя 0,6 мм и диапазоне вводимой энергии от 1300 до 1500 Вт.

В 4 главе Рашковец М.В. обширно представляет структурно-фазовые преобразования, происходящие в каждом отдельном сплаве с применением различных параметров процесса прямого лазерного выращивания. В целом следует отметить, что подробные структурные исследования с применением методов РЭМ, ПЭМ и РФА, представленные в данной главе, выполнены на высоком уровне и достаточно ясно отражают объяснения автора. Например, Рашковец М.В. установила, что форма (от округлой до близкой к кубической) и размер частиц (от 20 до 45 нм) интерметаллидного соединения $Ni_3(Al,Ti)$ в дисперсионно-твердеющем никелевом сплаве системы Ni-Co-Cr (ЭП741) изменяются с повышением значения вводимой энергии. Так, минимальный размер 20 нм и округлая форма формируются в сплаве при введении наименьшего значения энергии лазерного излучения 12 Дж/мм², тогда как кубические частицы с размером 45 нм образуются при 24 Дж/мм². Переход к

сферической форме частиц при повышении вводимой энергии до 32 Дж/мм^2 автор объясняет перераспределением основных элементов с выделением в междендритных пространствах бóльшего количества первичных карбидов.

В 5 главе представлены результаты оценки механических свойств сформированных материалов при их статическим, динамическом и циклическом нагружении. Автор отмечает, что многочисленные границы столбчатых дендритов, расположенных перпендикулярно движению трещины, являются эффективными барьерами при ее распространении. Так скорость роста усталостной трещины dl/dN в образцах, испытанных с приложением циклической нагрузки перпендикулярно росту дендритов, выше, чем в образцах с приложением нагрузки вдоль роста дендритных зерен при аналогичном уровне размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK .

В 6 главе и в Приложениях А, Б отражено практическое использование результатов диссертационного исследования для решения производственных задач, а также применение в учебном процессе на кафедре материаловедения в машиностроении НГТУ.

В Заключение сформулированы выводы, полученные в результате диссертационного исследования.

Научная значимость. Полученные автором результаты позволяют существенно улучшить понимание природы никелевых сплавов различного химического состава, получаемых современными аддитивными процессами. С использованием методов электронной микроскопии и рентгенофазового анализа установлена зависимость структурно-фазового состояния никелевых сплавов от применяемых технологических режимов аддитивного процесса прямого лазерного выращивания, проведена корреляция структурных состояний с механическими свойствами.

С научной точки зрения следует отметить следующие **новые научные результаты**: экспериментально установлено влияние эффективной энергии лазерного излучения на форму и размеры выделившихся частиц в дисперсионно-твердеющем сплаве системы Ni-Co-Cr. Образование массивных

игольчатых частиц δ -фазы, снижающих механические свойства сплава системы Ni-Cr-Mo, при формировании его аддитивным методом прямого лазерного выращивания в диапазоне энергии лазерного излучения не развивается. С использованием методов просвечивающей электронной микроскопии в никелевом сплаве системы Ni-Fe-Cr зафиксировано формирование частиц фазы Ni_3Al , окончательное выделение которой происходит при дополнительной термической обработке.

Практическая значимость работы. Результаты исследований структурно-фазового состояния «послойно» сформированных никелевых сплавов и комплекса их механических свойств способствуют решению прикладных задач, актуальных для машиностроительного производства с применением новых аддитивных технологий. Микроструктурные исследования сформированных никелевых сплавов показали отсутствие трещин. В том числе результаты оценки пористости выращенных материалов показали, что повышение энергии лазерного излучения при формировании слоя с фиксированной высотой 0,04 мм является эффективным техническим решением, обеспечивающим формирование качественных материалов, а выращивание никелевого порошка с шагом слоя 0,6 мм в диапазоне эффективной энергией лазерного луча более 21,2 Дж/мм² позволяет производить материалы с пористостью, не превышающей 1,1 %. Режимы, используемые автором работы при получении образцов, апробированы в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН и используется для оптимизации аддитивных технологических процессов.

Результаты проведенных исследований используются в учебном процессе НГТУ при реализации образовательной программы бакалавриата по направлению 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов».

Достоверность научных положений, результатов и выводов, приведенных в диссертационной работе, подтверждается использованием современных методов исследования на испытательном и аналитическом оборудовании, уровень которого соответствует передовым лабораториям в

области материаловедения. Представленные в работе экспериментальные данные и их анализ не противоречат имеющимся в научном сообществе представлениям о структурно-фазовом состоянии и свойствах никелевых сплавов. Полученные результаты **опубликованы** в рецензируемых научных журналах с докладами на научно-технических семинарах и конференциях различного уровня представляют большую научную ценность.

Автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертационной работы.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты и выводы диссертации рекомендуется использовать в научных коллективах учебных заведений и проектных организаций, занимающихся вопросами аддитивных технологий. К ним относятся Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Самарский университет, Московский авиационный институт, Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Сибирский государственный индустриальный университет, Уфимский государственный авиационный технический университет и др.

Рекомендуется использование результатов и выводов диссертации на предприятиях машиностроительного профиля и в учебном процессе при подготовке студентов и аспирантов по укрупненным группам направлений 15.00.00 Машиностроение, 22.00.00 Технологии материалов.

Замечания по работе:

1. Автор параллельно использует два термина при описании используемого технологического режима: «мощность лазерного излучения» и «эффективная энергия лазерного излучения», что затрудняет восприятие информации.

2. Диапазоны рабочих режимов используемого в работе аддитивного технологического процесса были подобраны на основе предварительных экспериментов, проведенных специалистами Санкт-Петербургского

государственного морского технического университета на установке прямого лазерного выращивания. Поскольку одной из задач исследования был анализ влияния технологических параметров на формирование структуры высоколегированных никелевых сплавов при реализации аддитивного процесса методом прямого лазерного выращивания, чем может быть объяснен выбор различных технологических параметров аддитивного процесса по схеме прямого лазерного выращивания? В частности, почему в сплавах Ni-Cr-Mo и Ni-Co-Cr скорость сканирования одинакова, а в сплаве Ni-Fe-Cr отличается? Возможно, для улучшения понимания влияния технологических параметров аддитивного процесса на формирование структуры никелевых сплавов, было бы полезно расширить обоснование выбора тех или иных параметров.

3. На рисунке 3.13 рукописи не указано, какой мощности лазерного излучения соответствуют изображения.

4. В работе сказано, что «Полученные в процессе лазерной наплавки «многослойные» материалы характеризуются высоким уровнем когезионной прочности». Как рассчитывалась когезионная прочность и есть ли какие-либо численные данные, подтверждающие ее высокий уровень?

Отмеченные замечания и недостатки не снижают научной и практической значимости выполненных исследований, а полученные в диссертации результаты соответствуют поставленной цели.

Заключение

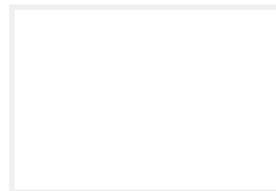
Работа содержит новые научно-обоснованные результаты, внедрение которых окажет существенный вклад в развитие машиностроительной отрасли и экономики страны в сфере получения деталей новыми аддитивными технологиями из никелевых сплавов. Публикации в научных журналах и автореферат достаточно подробно отражают основное содержание диссертационного исследования.

Представленная к защите диссертация Рашковец М.В. «Структура и свойства никелевых сплавов, полученных по аддитивной технологии с использованием метода прямого лазерного выращивания» является

законченной научно-квалификационной работой, отвечает критериям, предъявляемым к кандидатским диссертациям соответствует (п. 9...11, 13, 14 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. в ред. от 11.09.2021 г.), а её автор, Рашковец Мария Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. Материаловедение.

Отзыв на диссертацию Рашковец М.В. «Структура и свойства никелевых сплавов, полученных по аддитивной технологии с использованием метода прямого лазерного выращивания» подготовлен заведующим кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения кандидатом технических наук, доцентом Носова Екатериной Александровной (диссертация защищена по специальности 05.02.01 – Материаловедение (машиностроение), обсужден и утвержден на заседании кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет), протокол № 11 от 06.06.2022 г.

Заведующий кафедрой технологии металлов
и авиационного материаловедения,
доцент, кандидат технических наук



Носова Е. А.

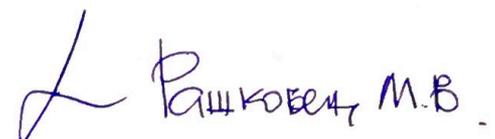
Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева».

Сокращенное наименование: Самарский университет
Почтовый адрес: 443086 г. Самара, Московское шоссе, 34
Телефон: 8(846) 267-4640, E-mail: nosova.ea@ssau.ru
официальный сайт организации <http://www.ssau.ru>

Поступил в совет 10.06.2022

 / Носова Е. А.

С ОТЗЫВОМ ОЗНАКОМЛЕНА 14.06.2022

 Рашковец М.В.