

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ЭКСПЕРТНОЙ КОМИССИИ

по защите диссертации Агеева Максима Игоревича на тему: «Получение порошков жаропрочных никелевых сплавов и их применение в аддитивных технологиях», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, специальность 2.6.5 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы» и состоявшейся в НИТУ МИСИС 19 декабря 2023 года.

Диссертация принята к защите Диссертационным советом НИТУ МИСИС 11 сентября 2023 г., протокол №13.

Диссертация выполнена на кафедре порошковой металлургии и функциональных покрытий НИТУ МИСИС (ПМиФП).

Научный руководитель – Левашов Евгений Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой ПМиФП, директор НУЦ СВС, НИТУ МИСИС.

Экспертная комиссия утверждена Диссертационным советом НИТУ МИСИС (протокол № 13 от 11.09.2023 г.) в составе:

1. Штанский Дмитрий Владимирович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник НУЦ СВС, директор Научно-исследовательского центра «Неорганические наноматериалы», профессор кафедры ПМиФП, НИТУ МИСИС, – председатель комиссии;

2. Еремеева Жанна Владимировна, доктор технических наук, профессор кафедры ПМиФП, НИТУ МИСИС;

3. Кирюханцев-Корнесс Филипп Владимирович, доктор технических наук, заведующий лабораторией «In situ диагностика структурных превращений» НУЦ СВС, профессор кафедры ПМиФП, НИТУ МИСИС;

4. Шляпин Сергей Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технология обработки материалов», «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет (МАИ))».

5. Курганова Юлия Анатольевна, доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение», «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

В качестве ведущей организации утверждено федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»).

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

разработана научная концепция повышения физических и технологических

свойств **порошков жаропрочных никелевых** сплавов ЭП648 (ХН50ВМТЮБ) и ВЖ159 (ХН58МБЮ) для технологии прямого лазерного выращивания (ПЛВ) путем механической обработки в шаровых вращающихся мельницах, а также β -сплавов на основе CompoNiAl-M5-3 (base+) для технологии селективного лазерного сплавления (СЛС), в сочетании с горячим изостатическим прессованием (ГИП) и термообработкой (ТО), путем реализации интегральной технологической цепочки, включающей операции центробежного СВС-литья или синтеза из элементов, механического измельчения, воздушной классификации, плазменной сфероидизации, позволившая выявить качественно новые закономерности структурообразования на всех этапах получения, обеспечить высокий уровень свойств консолидированных материалов и максимальную приближенность геометрии образцов к цифровой 3D- модели.

предложены оригинальные суждения об увеличении механических свойств β -сплава base+15%Mo после СЛС+ГИП+ТО за счет формирования в матрице моноалюминид никеля когерентных межфазных границ зерен $(\text{Mo}_{0,8}\text{Cr}_{0,2})\text{xBy}$ и $\text{Cr}_3\text{Mo}_3\text{C}$, которые противодействуют полям упругих напряжений вокруг ядер дислокаций, препятствуя их скольжению, что выражается в деформационном упрочнении материала.

доказана перспективность применения овализованных распыленных порошков никелевых сплавов ЭП648 (ХН50ВМТЮБ) и ВЖ159 (ХН58МБЮ) в технологии ПЛВ (Акт об изготовлении от 23.08.2021 № 0111-533), что позволяет расширить границы их применимости в аддитивном производстве сложнопрофильных изделий (Разработанный способ механической обработки распыленных порошков в шаровой вращающейся мельнице рекомендован к применению на предприятиях АО «Русполимет»).

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

используя метод push-to-pull **доказаны положения** о том, что в β -сплаве с 1% Nb и 0,9% Hf упрочняющие фазы Лавеса Co_2Nb и Cr_2Nb , Гейслера Ni_2AlHf и карбида $(\text{Hf}_x\text{Nb}_y)\text{C}$ повышают временное сопротивление деформации при растяжении с 1360 МПа (образец с однофазной структурой) до 1870 МПа (образец с дисперсными выделениями упрочняющих фаз), а конгломераты этих фаз являются концентраторами напряжений и приводят к преждевременному разрушению образцов вследствие локализации напряжений на границах зерен.

изложены доказательства формирования в разработанных β -сплавах трехуровневой иерархической структуры и дисперсионного упрочнения за счет когерентных нановыделений в матрице и на границах зерен, обеспечивающих высокий уровень прочности при сжатии для сплава base+1%Nb-0,9%Hf: $\sigma_{\text{в}}^{20} = 2570$ МПа, $\sigma_{0,2}^{20} = 1150$ МПа, $\varepsilon^{20} = 9,0$ %, $\sigma_{\text{в}}^{900} = 575$ МПа, $\sigma_{0,2}^{900} = 498$ МПа, $\varepsilon^{900} = 28,0$ % и сплава base+15%Mo: $\sigma_{\text{в}}^{20} = 2318$ МПа, $\sigma_{0,2}^{20} =$

970 МПа, $\varepsilon^{20} = 7,0 \%$, $\sigma_B^{900} = 272$ МПа, $\sigma_{0.2}^{900} = 250$ МПа, $\varepsilon^{900} = 28,0 \%$.

изложены условия обработки распыленных порошков жаропрочных никелевых сплавов марок ЭП648 (ХН50ВМТЮБ) и ВЖ159 (ХН58МБЮ), обеспечивающие удаление и пластическую деформацию сателлитов, рост насыпной плотности и текучести порошка.

Применительно к проблематике диссертации с получением обладающих новизной результатов **использован комплекс** современных инструментальных методов исследования (растровая и просвечивающая электронная микроскопия, рентгеноструктурный фазовый анализ).

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

осуществлена апробация овализованных распыленных порошков никелевого сплава ВЖ159 (ХН58МБЮ) в технологии ПЛВ в АО «Русполимет»; построены модельные образцы турбинной лопатки 5-й ступени с литой бездефектной структурой, остаточной пористостью менее 0,5 % и точным геометрическим соответствием цифровой модели. Разработанный способ обработки распыленных порошков в шаровой вращающейся мельнице рекомендован к применению на предприятиях АО «Русполимет».

Разработана и зарегистрирована технологическая инструкция на процесс изготовления узкофракционных сферических СВС-порошков из сплавов на основе моноалюминиды никеля (ТИ 59-11301236-2023).

В депозитарии НИТУ «МИСИС» зарегистрировано ноу-хау № 10-732-2021 ОИС от 02 июля 2021 г «Состав иерархически-структурированного жаропрочного сплава на основе моноалюминиды никеля и способ получения узкофракционного порошка сочетанием методов центробежного СВС-литья и плазменной сфероидизации»

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных исследований использовано современное технологическое и аналитическое оборудование. Оценка полученных результатов произведена с использованием статистических показателей. Идея работы основывается на анализе общемирового опыта в области теории и практики получения сферических порошков и производства изделий методом аддитивных технологий.

Личный вклад соискателя состоит в анализе научно-технической литературы по теме исследования, получении и обработке экспериментальных данных, анализе и обобщении результатов исследований. Обсуждение и интерпретация полученных результатов проводились совместно с научным руководителем и соавторами публикаций. Основные положения, научная новизна, практическая значимость и выводы диссертационной работы сформулированы совместно с научным руководителем.

По материалам диссертации имеется 17 публикаций, в том числе 6 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК и входящих в базы данных Scopus, Web of Science, а также 1 «Ноя-хау». Результаты диссертационной работы Агеева М.И. обсуждались на международных научно-технических конференциях.

Пункт 2.6 Положения присуждения ученой степени кандидата наук НИТУ МИСИС соискателем ученой степени не нарушен.

Диссертация Агеева Максима Игоревича соответствует критериям п. 2 Положения о порядке присуждения ученых степеней в НИТУ МИСИС, так как в ней на основании выполненных автором исследований, включающих механическую обработку распыленных порошков и ПЛВ, а также центробежное СВС-литье/ СВС из элементов, механическое измельчение, воздушную классификацию, плазменную сфероидизацию порошков, СЛС и постобработку (ГИП+ТО), решена задача изготовления сложнопрофильных деталей из жаропрочных никелевых сплавов с использованием аддитивных технологий.

Экспертная комиссия приняла решение о возможности присуждения Агееву Максиму Игоревичу ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.5 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Результаты голосования: при проведении тайного голосования экспертная комиссия в количестве 5 человек, участвовавших в заседании, из 5 человек, входящих в состав комиссии, проголосовали: за 5, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель Экспертной комиссии



Штанский Д.В.

19.12.2023