



«УТВЕРЖДАЮ»

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251
тел.: +7(812)297 2095, факс: +7(812)552 6080
office@spbstu.ru

08.09.2020

№

63-Иллеллут

на №

от

Проректор по научной работе

ФГАОУ ВО «СПбПУ»

Сергеев В.В.



ОТЗЫВ

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на
диссертационную работу **Капланского Юрия Юрьевича**
«Получение узкофракционных сферических порошков жаропрочных сплавов на основе алюминидов никеля и их применение в технологии селективного лазерного сплавления», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы

Актуальность диссертационной работы

Диссертационная работа Капланского Ю.Ю. посвящена решению актуальной научно-технической проблеме современного материаловедения - разработка эффективных способов получения сферических узкофракционных порошков жаропрочных сплавов на основе моноалюминидов никеля.

Повышение рабочей температуры ответственных деталей и узлов газотурбинных установок и, как следствие, их тепловой эффективности при одновременном снижении выбросов парниковых газов в атмосферу требует разработки новых жаропрочных сплавов с улучшенными физико-механическими свойствами по сравнению с никелевыми суперсплавами. В качестве таких материалов рассматриваются легкие интерметаллические сплавы на основе моноалюминидов никеля (NiAl) с рабочей температурой до 1000 °С, обладающие превосходной теплопроводностью и стойкостью

000045

к окислению, низкой плотностью. В последние годы предложены различные комплексные подходы для улучшения эксплуатационных свойств литейных гетерофазных жаропрочных сплавов на основе NiAl путем уменьшения размера структурных составляющих и формирования иерархических многоуровневых структур с упорядоченным распределением упрочняющих выделений. Однако промышленное применение подобных сплавов в литом состоянии сдерживается их недостаточной пластичностью и трещиностойкостью при комнатной температуре по причине формирования крупнозернистой структуры, что исключает фрезерную обработку деталей для соблюдения необходимых допусков. Избежать указанные недостатки и обеспечить внедрение в производство турбин NiAl-сплавы возможно благодаря применению технологий селективного лазерного сплавления (СЛС) и горячего изостатического прессования (ГИП) при использовании узкофракционных сферических порошков, которые в качестве исходного материала используют сферические порошки регламентированного гранулометрического состава.

Актуальность диссертационной работы заключается в разработке эффективных способов получения сферических узкофракционных порошков жаропрочных сплавов на основе моноалюминидов никеля с иерархической структурой и оптимальных параметров аддитивной технологии послойного лазерного синтеза на подложке для теплонагруженных деталей перспективных газотурбинных установок с улучшенными показателями тепловой эффективности и удельной мощности.

Структура и содержание диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, выводов по работе, списка литературы и восьми приложений. Диссертация изложена на 252 страницах машинописного текста и содержит 125 рисунков, 34 таблицы, библиографический список из 229 литературных источников.

Во **введении** дана общая характеристика работы: её актуальность, основные цели и задачи, научная и практическая значимость полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу научных трудов, результатов экспериментальных и теоретических исследований способов получения и термомеханических свойств поликристаллического моноалюминидов никеля. Проведен анализ влияния различных легирующих добавок и технологий получения на однородность структуры и уровень механических свойств перспективных NiAl-сплавов.

Показана возможность повышения пластичности и сопротивления высокотемпературной деформации ползучести NiAl путем уменьшения размера зерна и формирования иерархической гетерофазной структуры. Рассмотрены способы получения узкофракционных сферических порошков на основе NiAl для метода СЛС. Показана перспективность применения методов ГИП и СЛС в промышленном освоении жаропрочных сплавов на основе NiAl для нужд энергетики и авиационно-космической техники.

По результатам анализа литературы в качестве основного объекта исследований автором обосновано выбран жаропрочный иерархически-структурированный сплав состава NiAl-12Cr-6Co-0,25Hf, ат. % (маркировка CompoNiAl-M5-3), а также предложены две технологии получения сферических порошков для аддитивных процессов синтеза на подложке, основанные на методах МА СВС, плазменной сфероидизации и центробежного плазменного распыления (ПЦР) литых электродов.

Во *второй главе* описаны используемые в работе исходные материалы, оборудование, применяемые производственные технологии и режимы получения материалов, методики экспериментальных исследований.

В работе использован современный и редко встречающийся in-situ метод просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМ ВР) для исследования эволюции структуры сплавов в процессе нагрева. Автором подробно описана методика оптимизации технологических параметров процесса лазерного синтеза моделей роторной лопатки турбины из сфероидизированного порошка и режимы их постобработки; методики определения физико-технологических свойств порошков. Для анализа внутренних дефектов структуры в СЛС- образцах и характера их распределения в объеме синтезированного материала применен современный метод микрокомпьютерной рентгеновской томографии (МКТ).

В *третьей главе* представлены результаты исследований взаимосвязи микроструктуры и термомеханического поведения сплавов CompoNiAl-M5-3 и Ni₂₇Fe₂₆Al₃₂Cr₁₀Co₅, полученных из центробежно-распыленных порошков с помощью ГИП и СЛС. Сферические порошки (композиционные состава Ni₂₇Fe₂₆Al₃₂Cr₁₀Co₅ (ат. %) и интерметаллические из сплава CompoNiAl-M5-3) дисперсностью до 180 мкм были получены в один производственный цикл по технологии ПЦР длинномерных электродов в стальной оболочке. Порошки разделяли методом магнитной сепарации. Впервые с помощью in-situ метода ПЭМ ВР в режиме нагрева тонкой фольги установлено и наглядно продемонстрирована стадийность гетерогенного

зародышеобразования и роста нанокристаллитов α -Cr длиной 7 – 40 нм на призматических дислокационных петлях в интервале 750 – 850 °C. Показано повышение пластичности и прочности сплава до значений $\varepsilon = 14,7 \pm 1 \%$ и $\sigma_b = 2420 \pm 96$ МПа для ГИП- образцов из центробежно-распыленных порошков по сравнению с литым состоянием ($\sigma_b = 1720 \pm 96$ МПа, $\varepsilon \approx 8 \%$) в результате оптимизации микроструктуры. Высокий уровень механических свойств сплава, полученного с помощью ГИП сферических порошков, автор объясняет формированием иерархической структуры: 1й уровень – зерна NiAl размером менее 40 мкм с некогерентными микронными частицами α -Cr вдоль межзеренных границ; 2й – упрочняющие субмикронные частицы α -Cr и Hf внутри зерен NiAl; 3й – субзерна с когерентными выделениями α -Cr диаметром менее 45 нм. Данные наблюдения подтверждаются результатами комплексного исследования микроструктуры и термомеханических свойств. По результатам испытаний на высокотемпературную ползучесть сплава после ГИП установлено, что накопление пластической деформации протекает путем скольжения и переползания дислокаций над выделениями избыточной фазы, а его рабочая температура составляет 890 °C. Из композиционного сферического порошка (110-180 мкм) состава $\text{Ni}_{27}\text{Fe}_{26}\text{Al}_{32}\text{Cr}_{10}\text{Co}_5$ методом ГИП с последующей термообработкой (закалка в воду с последующим старением) получен новый легкий сплав дисперсионно-твердеющего типа для статорных и роторных лопаток паровых турбин. Проведены испытания сплава на ползучесть в интервале 773 – 1573 К по результатам которых установлена доминантная роль механизма локального подъема дислокаций над когерентными выделениями α -Fe(Cr) при накоплении пластической деформации. Действию указанного механизма ползучести дано подробное теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение в виде результатов исследований дислокационной субструктуры сплава после деформации методом ПЭМ ВР (показан подъем матричной дислокации над частицей избыточной фазы и формирование субзерен). Согласно сделанным оценкам с использованием уравнения ползучести Аррениуса, рабочая температура сплава ограничена 700 °C, что на 100-200 °C выше, чем для жаропрочных сталей, используемых для роторных лопаток паровых турбин высокого давления. При использовании крупнозернистого композиционного порошка оптимизирован режим лазерного синтеза трехмерных объектов с пористостью менее 0,08 %. Полученные в данной главе результаты являются новыми, имеют высокую научную и практическую ценность.

В *четвертой главе* представлены результаты параметрических исследований МА СВС при использовании различных типов активаторов и схем смешивания исходных компонентов. Показано влияние режимов МА на масштаб гетерогенности реакционной смеси и продуктов синтеза. По результатам проведенных исследований найден наиболее эффективный и производительный способ МА СВС для получения CompoNiAl-M5-3 в виде пористых спеков, которые затем подвергались размолу и воздушной классификации, что позволило получить химически однородный, высокочистый порошок регламентированного гранулометрического состава (20-45 мкм) для последующей плазменной сфероидизации. Порошок обладал осколочной морфологией в следствии особенностей метода получения и хорошей текучестью (38 с) за счет отсутствия субмикронных частиц.

Пятая глава посвящена параметрическим исследованиям процесса сфероидизации СВС-порошка (20-45 мкм) CompoNiAl-M5-3 в потоке термической плазмы на промышленной индукционно-плазменной установке ТЕКSPHERO 200. Установлено, что увеличение мощности на плазмотроне со 150 до 160 кВт при одновременном снижении расхода СВС- порошка с 10 до 7 кг/ч способствует увеличению степени сферичности и улучшению его технологических свойств, при этом дальнейшее увеличение мощности ухудшает свойства порошка. Найден оптимальный режим плазменной обработки синтезированного порошка, который не приводит к изменению химического состава сплава, обеспечивает высокую степень сферичности около 98 %, высокие показатели текучести – 19 с и насыпной плотности – 4,1 г/см³. Кроме того, при использовании Ar-H₂ плазмы отмечен эффект рафинирования в процессе сфероидизации порошка по примесям: на 22 % по O₂ до 0,08 масс. % и на 108 % по N₂ до 0,0012 масс. %. Используя полученные результаты экспериментальных исследований разработан способ получения узкофракционных сферических порошков на основе алюминида никеля, патент РФ № 2681022, который был апробирован на предприятии индустриального партнера АО «Полема».

Шестая глава посвящена исследованию взаимосвязи структуры и термомеханического поведения сплава CompoNiAl-M5-3, полученного методом ГИП из сфероидизированного порошка фракции 20-45 мкм. Проведены предварительные исследования по оптимизации параметров ГИП сфероидизированного порошка и найден режим, обеспечивающий получение беспористых образцов с мелкозернистой гетерофазной структурой и наиболее высокими механическими свойствами ($\sigma_{0.2} = 1265 \pm 27$, $\varepsilon = 16 \pm 0,5$ %) на сжатие. Установлено, что использование

сфероидизированного мелкодисперсного порошка в технологии ГИП вместо центробежно-распыленного способствует уменьшению размера зерна до 8-25 мкм, образованию вдоль границ зерен упрочняющих частиц фазы Гейслера состава Ni_2AlHf и, как следствие, росту предела прочности сплава на 18 % (до 2870 МПа) и степени пластической деформации на 14% (до 16,8 %). В работе показано превосходство интерметаллического сплава над Inconel 718 по уровню теплопроводности ($\lambda = 19 - 32,5$ против $13 - 24$ Вт/(м·К)) в интервале 200 – 800 °С. Высокая теплопроводность сплава будет обеспечивать необходимую скорость отвода тепла и предотвращать перегрев деталей горячего тракта турбин, что создаст предпосылки для повышения температуры энергоносителя. С помощью in-situ исследования эволюции структуры сплава при нагреве установлен нехарактерный процесс фрагментации первичных выделений $\alpha\text{-Cr}$ субмикронного размера на нанокристаллиты размером 30-70 нм в интервале 650 – 850 °С, протекание которого, обусловлено увеличением скорости растворения α -фазы в матрице, что быстрее приводит систему к минимуму свободной энергии. Кроме того, наблюдался рост сопротивления пластической деформации при 700 °С на 56 % с 418 до 653 МПа, а рабочая температура сплава по данным анализа результатов испытаний на высокотемпературную ползучесть составила 940 °С в следствии оптимизации структуры и нуклеации частиц Ni_2AlHf . Представленные в данной главе результаты экспериментальных исследований, несомненно, имеют высокую практическую и научную значимость и могут быть использованы для решения научно-технических задач в области применения и разработки новых жаропрочных сплавов.

Седьмая глава посвящена экспериментальным исследованиям, направленным на оптимизацию процесса лазерного синтеза моделей роторной лопатки турбины высокого давления при использовании сфероидизированного микропорошка сплава CompoNiAl-M5-3, а также изучению влияния режимов постобработки изделий на структуру и термомеханическое поведение материала при испытаниях на ползучесть и осадку в диапазоне температур 600 – 1100 °С. Получены зависимости влияния объемной плотности энергии лазерного луча на пористость материала. Автором установлено, что увеличение мощности лазера оказывает более высокое влияние на усадку изделий при сплавлении порошкового слоя, чем изменение скорости сканирования. Также показана возможность одновременного повышения производительности процесса лазерного синтеза на подложке и свойств конечных изделий за счет увеличения скорости сканирования в некотором диапазоне при оптимальном значении энергии лазера. По результатам проведенных исследований найден режим СЛС, обеспечивающий

воспроизводимое построение моделей роторной лопатки с уровнем остаточной пористости $0,94 \pm 0,30$ %, отсутствием микротрещин и шероховатостью поверхности по Ra порядка 7 мкм. Результаты трехмерной МКТ-визуализации модели лопатки, показали преимущественное распределение пор в приповерхностном слое, что было вызвано относительно большой толщиной наносимого слоя порошка (50 мкм) и требует дополнительной оптимизации режима для контура детали.

Автором установлено формирование характерной кристаллографической текстуры роста зерен в направлении вектора остаточных напряжений, вызванных градиентом термических напряжений вдоль оси z , как результат отжига (старения) СЛС-моделей лопатки. Для оптимизации структуры, уменьшения количества дефектов и повышения свойств материала применялась газостатическая постобработка изделий, которая снизила уровень остаточной пористости до $0,25 \pm 0,08$ % и способствовала устранению текстуры. Проведенные ПЭМ исследования позволили подтвердить образования ранее упомянутой иерархической структуры с упорядоченным распределением упрочняющих частиц α -Cr, (Hf) и Ni_2AlHf , повышающих термомеханические свойства сплава.

Получены экспериментально-расчетные зависимости предельно допустимых температурно-силовых условий эксплуатации построенных изделий после старения и ГИП-обработки в течение 100 000 часов до накопленной пластической деформации не более 1 %. Постобработка СЛС-деталей с помощью ГИП способствовала увеличению рабочей температуры на 80-85 °С в результате устранения кристаллографической текстуры и роста зерен (замедляет диффузионную ползучесть Кобла), гомогенизации сплава и выделения частиц избыточной фазы, что сопровождалось увеличением эффективной энергии активации ползучести и сменой доминирующего механизма (скольжение) ползучести в состаренном материале на переползание дислокаций над упрочняющими выделениями. Таким образом, для повышения эксплуатационных свойств деталей из сплавов на основе моноалюминидов никеля, полученных по технологии лазерного синтеза на подложке, необходимо применение операции газостатической постобработки. Полученные модели роторной лопатки турбины высокого давления прошли испытания в АО «Композит» (г. Королев) на соответствие геометрических размеров, механических и теплофизических свойств, остаточной пористости по результатам которых, разработанный материал рекомендован для изготовления теплонагруженных изделий, в том числе сопловых лопаток двигательных установок и камер сгорания газотурбинных установок.

В целом, работа изложена технически грамотным языком. Каждая Глава содержит важные результаты научных исследований автора и сопровождается развернутыми выводами. Общее оформление работы соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Научная новизна полученных результатов

Работа содержит ряд новых научных результатов, полученных в ходе исследований и имеющих важное значение для науки и производства:

- установлены два механизма формирования в сплаве $\text{Co}_{90}\text{Ni}_{10}\text{Al}-\text{M5-3}$ выделений упрочняющих наночастиц $\alpha\text{-Cr}$: (1) гомогенная нуклеация и рост зон Гинье-Престона из пересыщенного твердого раствора по механизму спинодального превращения в интервале температур 250-450 °С; (2) гетерогенная нуклеация и рост нанокристаллитов на дислокационных петлях в интервале 750 – 850 °С;

- установлен эффект уменьшения скорости деформации, увеличения сопротивления ползучести в интервале температур 773-1073 К, двукратного роста показателей пластичности и прочности при комнатной температуре при переходе от литейных технологий получения сплава $\text{Co}_{90}\text{Ni}_{10}\text{Al}-\text{M5-3}$ к ГИП узкофракционных сферических порошков в результате уменьшения на порядок размера зерен и формирования иерархической многоуровневой структуры с упорядоченным распределением дисперсных выделений $\alpha\text{-Cr}$ в матрице и фазы Гейслера состава Ni_2AlHf вдоль межзеренных границ;

- показано, что термическая обработка жаропрочного сплава $\text{Ni}_{27}\text{Fe}_{26}\text{Al}_{32}\text{Cr}_{10}\text{Co}_5$, полученного по технологии ГИП из порошка размером 110-180 мкм, увеличивает пластичность при комнатной температуре на 56 % и сопротивление вязкопластическому течению более, чем на 100 МПа при 973 К, в результате уменьшения на порядок размера когерентных выделений избыточной $\text{Fe}(\text{Cr})$ фазы, увеличения их объемной доли и образования частиц ТПУ $\sigma\text{-FeCr}$ фазы по границах зерен;

- установлено, что одним из эффективных механизмов повышения сопротивления ползучести в сплаве $\text{Ni}_{27}\text{Fe}_{26}\text{Al}_{32}\text{Cr}_{10}\text{Co}_5$ является ингибирование роста субзерен частицами σ -фазы и гафния вследствие закрепления матричных дислокаций на их границах. Обосновано возникновение пороговых напряжений при деформации сплава в результате локального подъема дислокаций $a/2[\bar{1}11]$ над высокодисперсными когерентными выделениями избыточной фазы;

- установлено, что ГИП обработка сложнопрофильных СЛС изделий приводит к смене доминирующего механизма вязкопластического течения путем скольжения

дислокаций на их переползание, что увеличивает рабочую температуру на 80-85 °С за счет устранения текстуры роста зерен и выделения высокодисперсных частиц избыточной α -Cr фазы.

Практическая значимость полученных результатов

К наиболее значимым практическим результатам диссертационного исследования следует отнести следующее:

- разработан способ получения узкофракционных сферических порошков регламентированного фракционного состава из жаропрочных иерархически-структурированных сплавов на основе алюминидов никеля (патент РФ № 2681022 от 26.06.2018);

- установлены оптимальные технологические режимы СЛС, обеспечивающие воспроизводимое построение сложнопрофильных моделей роторной лопатки турбины высокого давления из сплава CompoNiAl-M5-3 с минимальной остаточной пористостью и отсутствием микротрещин (ноу-хау № 05-340-2018 от 19 июля 2018 г.). Результаты интеллектуальной деятельности переданы промышленному партнеру АО «Полема» для промышленного освоения и коммерциализации;

- получен новый сплав Ni₂₇Fe₂₆Al₃₂Cr₁₀Co₅ дисперсионно-твердеющего типа для ответственных деталей паровых турбинных установок с повышенной на 200 К рабочей температурой (973 К при нагрузке 100 МПа) по сравнению с жаропрочными мартенситными 9-12 %Cr сталями X22CrMoV 12 1 и X18CrMoVNbV 91;

- зарегистрированы технологические условия ТУ 24.45.30-041-11301236-2020 «Узкофракционные СВС-порошки из жаропрочных сплавов на основе моноалюминидов никеля». Разработана технологическая инструкция ТИ 48-11301236-2019 на процесс изготовления узкофракционных СВС-порошков из сплавов на основе моноалюминидов никеля;

- проведены испытания моделей роторной лопатки турбины высокого давления из сплава CompoNiAl-M5-3, изготовленных методом СЛС, на соответствие геометрических размеров, механических и теплофизических свойств, остаточной пористости.

Достоверность и обоснованность результатов

Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, достаточно обоснованы и экспериментально проверены. Достоверность и обоснованность

результатов диссертационной работы подтверждаются большим объемом экспериментальных данных, их корректной статистической обработкой, применением широкого спектра современного экспериментального и исследовательского оборудования, глубоким анализом полученных результатов в полном соответствии с современными концепциями материаловедения порошковых и композиционных материалов.

Анализ содержания диссертационной работы и опубликованных работ показал, что все научные положения, выносимые на защиту, принадлежат диссертанту.

Оценка содержания диссертации

Объем и содержание диссертационной работы по степени научной новизны и практической значимости удовлетворяет требованиям ВАК Российской Федерации, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Анализ содержания диссертационной работы убеждает в ее завершенности. Содержание диссертации изложено грамотно, в логической последовательности, а принятая терминология и стиль изложения соответствуют общепринятым нормам. Диссертационная работа соответствует специальности 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы и ее основные положения.

Подтверждение основных результатов диссертации в научной печати

Основные результаты и положения диссертации Капланского Ю.Ю. прошли апробацию на различных научно-технических конференциях и семинарах. По материалам диссертации опубликованы 22 научные работы, в том числе 7 работ в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и входящих в международные базы цитирования WoS и Scopus.

Замечания по диссертационной работе

Диссертационная работа выполнена на высоком научно-методическом уровне. В тоже время, по диссертации имеются следующие замечания:

1. Для значений термомеханических свойств (предел прочности, условный предел текучести и др.) исследуемых жаропрочных сплавов не указан доверительный интервал.

2. Для сплава CompoNiAl-M-5-3 проведены термомеханические испытания только по схеме одноосного сжатия. Следовало бы провести испытания в условиях растягивающих напряжений в интервале температур 700-900 °С.

3. Для СЛС-образцов из сплава CompoNiAl-M-5-3 после различных видов постобработки исследовались механические свойства в интервале 600-1100 °С. Однако не приведены результаты испытаний при комнатной температуре.

4. Для чего применяли в работе две технологии (плазменное центробежное распыление и плазменная сфероидизация) получения сферических порошков, если детали лопатки турбины строили только из мелкодисперсного сфероидизированного СВС- порошка?

5. Известно, что малое количество ТПУ фаз оказывают негативное влияние на механические свойства жаропрочных сплавов, приводя к зарождению дефектов в виде микротрещин, и тем самым сокращая срок службы теплонагруженных деталей. В данной диссертации выделения σ -FeCr фазы, образованные в результате термической обработки, повышают термомеханические свойства жаропрочного сплава $\text{Ni}_{27}\text{Fe}_{26}\text{Al}_{32}\text{Cr}_{10}\text{Co}_5$. Однако не приведено объяснение данного эффекта.

6. В главе 3 следовало бы придерживаться единой системы измерения температуры.

7. По тексту диссертации и автореферата встречается термин «призматические дислокации», что не совсем корректно в контексте представленной работы. Правильное название – призматические дислокационные петли.

Однако отмеченные недостатки не снижают теоретической и практической значимости выполненных исследований, а полученные в диссертации результаты соответствуют поставленным целям.

Заключение

Диссертационная работа Капланского Юрия Юрьевича является завершенной научно-квалификационной работой на актуальную тему, содержащая решение актуальной научно-практической задачи создания эффективного способа получения сферических порошков на основе моноалюминида никеля и их применение в технологии селективного лазерного сплавления (СЛС).

Работа является актуальной, полученные результаты обладают научной новизной, обоснованы на современном научном уровне. Достоверность изложенных в работе результатов, полученных с использованием современного высокотехнологичного

аналитического и испытательного оборудования, подтверждается их согласованностью и воспроизводимостью.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года. Диссертация является научно-квалифицированной работой, в которой содержится решение задачи разработки эффективных способов получения сферических узкофракционных порошков жаропрочных сплавов на основе моноалюминида никеля с иерархической структурой, в том числе их апробации в СЛС-технологии. Автор диссертации, Капланский Юрий Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы.

Диссертационная работа рассмотрена и обсуждена на заседании Высшей школы физики и технологии материалов Института машиностроения, материалов и транспорта. Присутствовало на заседании 35 человек. Результаты голосования: «ЗА» - 35 чел., «ПРОТИВ» - 0 чел., «ВОЗДЕРЖАЛОСЬ» - 0 чел. Протокол №1 от 1.09.2020 г.

Директор Высшей школы физики и
технологии материалов, к.х.н.

А.В. Семенча

Отзыв составили:

Профессор Высшей школы физики и
технологии материалов, д.т.н.

А.А. Попович

Доцент Высшей школы физики и
технологии материалов, к.т.н.

Е.В. Борисов

Попович Анатолий Анатольевич, доктор технических наук, специальность 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы, профессор Высшей школы физики и технологии материалов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

Тел. 8 (812) 294-46-20

e-mail: director@immet.spbstu.ru

Борисов Евгений Владиславович, кандидат технических наук, специальность 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы, доцент Высшей школы физики и технологии материалов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29

Тел. 8 (911) 290-88-13

e-mail: evgenii.v.borisov@gmail.com