

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Капланского Юрия Юрьевича на тему: «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 функциональные покрытия

Актуальность выдвигаемой на защиту работы Капланского Ю.Ю. не вызывает сомнения и определяется потребностью промышленности в разработке эффективных способов получения сферических узкофракционных порошков из перспективных жаропрочных сплавов на основе алюминидов никеля и технологических режимов лазерного синтеза теплонагруженных деталей турбинных установок для повышения их удельной мощности и тепловой эффективности, снижения выбросов парниковых газов.

В качестве основного объекта исследования обосновано выбран жаропрочный сплав  $\text{NiAl-12Cr-6Co-0,25Hf}$ , ат. % (маркировка  $\text{CompoNiAl-M5-3}$ ), а также получен новый железосодержащий жаропрочный сплав  $\text{Ni}_{27}\text{Fe}_{26}\text{Al}_{32}\text{Cr}_{10}\text{Co}_5$ . Сферические порошки указанных сплавов для методов селективного лазерного сплавления (СЛС) и горячего изостатического прессования (ГИП) были получены по двум предложенным технологическим схемам, одна из которых включала в себя: механическое активирование (МА) и самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) из элементов с получением пористых спеков, их переработку до состояния порошка целевой (20-45 мкм) фракции и последующую плазменную сфероидизацию; другая – центробежное СВС- литье полуфабрикатов из оксидного сырья, вакуумный индукционный переплав (ВИП) литых СВС- полуфабрикатов с отливкой длинномерных электродов в стальной трубе и последующее плазменное центробежное распыление (ПЦР) электродов. По второй технологии за один цикл получали два типа сферических порошков (композиционные состава  $\text{Ni}_{27}\text{Fe}_{26}\text{Al}_{32}\text{Cr}_{10}\text{Co}_5$  и интерметаллические из  $\text{CompoNiAl-M5-3}$ ) дисперсностью до 180 мкм, которые разделяли методом магнитной сепарации.

В работе представлены результаты по разработке технологического режима процесса лазерного синтеза моделей роторной лопатки турбины высокого давления при использовании сфероидизированного микропорошка сплава  $\text{CompoNiAl-M5-3}$ . Найдены оптимальные параметры СЛС обеспечивающие воспроизводимое построение моделей роторной лопатки турбины с уровнем остаточной пористости  $0,94 \pm 0,30$  %, отсутствием микротрещин и шероховатостью поверхности по Ra порядка 7 мкм, что было сделано впервые при использовании хрупких интерметаллических сплавов. Показано, что газостатическая постобработка СЛС-деталей способствует уменьшению пористости до  $0,25 \pm 0,08$  % и приводит к повышению рабочей температуры на 80-85 °С относительно исходного состояния и ГИП- образцов. Таким образом на примере сплава  $\text{CompoNiAl-M5-3}$  показана перспектива применения технологии СЛС для промышленного освоения жаропрочных интерметаллических сплавов.

В работе с применением передовых методов исследований изучена взаимосвязь между технологией получения, составом, микроструктурой и термомеханическими свойствами исследуемых сплавов. По результатам структурных исследований и испытаний полученных материалов на высокотемпературную ползучесть установлена их рабочая температура и обоснованы действующие механизмы вязкопластической деформации.

Научная значимость данной работы заключается в установленном эффекте повышения сопротивления ползучести в интервале 773-1073 К, двукратного роста



показателей пластичности и прочности при комнатной температуре при переходе от литейных технологий получения сплава CompoNiAl-M5-3 к ГИП узкофракционных сферических порошков в результате уменьшения на порядок размера зерен и формирования иерархической многоуровневой структуры с упорядоченным распределением упрочняющих выделений  $\alpha$ -Cr в матрице и фазы Гейслера состава  $\text{Ni}_2\text{AlHf}$  вдоль межзеренных границ. Высокий уровень механических свойств автор связывает с формированием иерархической структурой: 1й уровень – зерна NiAl размером менее 40 мкм с некогерентными микронными частицами  $\alpha$ -Cr вдоль межзеренных границ; 2й – упрочняющие субмикронные частицы  $\alpha$ -Cr, Hf и  $\text{Ni}_2\text{AlHf}$  внутри зерен NiAl; 3й – субзерна с когерентными нановыделениями  $\alpha$ -Cr диаметром менее 45 нм, что подтверждается результатами комплексного исследования структуры и механических свойств.

С помощью in-situ методов просвечивающей электронной микроскопии автором впервые показана стадийность образования когерентные выделения  $\alpha$ -Cr по двум механизмам: (1) гомогенная нуклеация и рост зон Гинье-Престона из пересыщенного твердого раствора путем спинодального распада твердого раствора в интервале температур 250-450 °C; (2) гетерогенная нуклеация и рост нанокристаллитов на дислокационных петлях в интервале 750 – 850°C.

Особое интерес вызывает обоснование доминантной роли механизма локального подъема дислокаций  $a/2[\bar{1}11]$  над высокодисперсными когерентными выделениями избыточной  $\alpha$ -Fe(Cr) фазы при деформации ползучести сплава  $\text{Ni}_{27}\text{Fe}_{26}\text{Al}_{32}\text{Cr}_{10}\text{Co}_6$ , что вызывает пороговые напряжения в интервале 873-1073 К, а также предложенная регрессионная модель ползучести, позволяющая спрогнозировать скорость деформации и рабочую температуру сплава в зависимости от приложенного напряжения.

Практическая значимость работы заключается в разработанном способе получения узкофракционных сферических порошков регламентированного фракционного состава из жаропрочных иерархически-структурированных сплавов на основе алюминидов никеля, в получении нового сплава  $\text{Ni}_{27}\text{Fe}_{26}\text{Al}_{32}\text{Cr}_{10}\text{Co}_5$  дисперсионно-твердеющего типа для ответственных деталей паровых турбинных установок с повышенной на 200 К рабочей температурой (700 К при нагрузке 100 МПа) по сравнению с жаропрочными мартенситными 9-12 %Cr сталями X22CrMoV 12 1 и X18CrMoVNbB 91, а также в разработанных технологических параметрах процесса СЛС, обеспечивающих воспроизводимое построение сложнопрофильных моделей роторной лопатки турбины высокого давления из сплава CompoNiAl-M5-3 с минимальной остаточной пористостью и отсутствием микротрещин.

Материалы диссертации представлены на Международных конференциях, опубликованы в научных журналах, рекомендованных ВАК и входящих в базы Scopus и Web of Science. По результатам исследований получен один патент и зарегистрировано одно ноу-хау, две технологических инструкции и дони технические условия, что подтверждает актуальность, научную новизну и практическую значимость диссертационной работы.

По автореферату имеется следующее замечания и вопросы:

1. Было бы интересно провести испытания на растяжение исследуемого сплава после ГИП и СЛС при температуре 800-900 К.

2. С какой целью в работе применялось две технологии получения сферических порошков,

3. Многие исследователи отмечают, что малые количества ТПУ фаз оказывают вредное влияние на свойства сплавов. Как можно объяснить утверждение автора о том, что термическая обработка жаропрочного сплава  $\text{Ni}_{27}\text{Fe}_{26}\text{Al}_{32}\text{Cr}_{10}\text{Co}_5$  ... увеличивает пластичность ... в результате ... образования частиц ТПУ  $\sigma$ -FeCr фазы по границам зерен?

Указанные замечания не снижают ценность работы. По актуальности, научной и практической значимости полученных результатов, подтвержденной зарегистрированными патентами и базами данных, полноте их освещенности на Международных конференциях и в научных статьях, диссертационная работа «Получение узкофракционных сферических порошков жаропрочных сплавов на основе алюминидов никеля и их применение в технологии селективного лазерного сплавления» полностью удовлетворяет требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней (№842 от 24.09.2013 г.), а ее автор – Капланский Юрий Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – Порошковая металлургия и функциональные покрытия.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный индустриальный университет»

Зав. кафедрой естественнонаучных дисциплин  
им. профессора В.М. Финкеля, д.ф.-м.н.  
(специальность 01.04.07 – физика  
конденсированного состояния), профессор,  
Заслуженный деятель науки РФ, Лауреат  
премии Правительства РФ в области  
науки и техники,  
Лауреат премии РАН им. И.П. Бардина  
21.05.2018

Громов  
Виктор Евгеньевич

К.т.н. (специальность 01.04.07 – физика  
конденсированного состояния), доцент,  
Доцент кафедры естественнонаучных  
дисциплин  
им. профессора В.М. Финкеля  
21.05.2018

Невский  
Сергей Андреевич

Подписи В.Е. Громова и  
С.А. Невского удостоверяю  
Начальник ОК ФГБОУ ВО «СибГИУ»



Миронова  
Татьяна Анатольевна

Адрес: 654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова 42, СибГИУ, каф. естественнонаучных дисциплин им. проф. В.М. Финкеля. Телефон (3843) 46-22-77, факс (3843) 46-57-92, E-mail gromov@physics.sibsiu.ru, snevskiy@bk.ru

Даем свое согласие на обработку персональных данных и включение их в аттестационное дело Капланского Юрия Юрьевича