

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Хакимова Алексея Мунировича «Структура и свойства жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ при изготовлении крупногабаритных деталей ГТД по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения металлов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17 – Материаловедение.

### **Актуальность диссертации**

Развитие современного авиастроения требует создания крупногабаритных корпусных деталей ГТД из жаропрочных конструкционных материалов. В частности, при создании авиадвигателя нового поколения перспективными к применению являются современные сложнолегированные сплавы на основе никеля, поскольку они обладают рядом положительных характеристик: высокой жаростойкостью, хорошей жаропрочностью и высоким сопротивлением окисляемости при температурах эксплуатации. Фактором, сдерживающим промышленное применение сложнолегированных сплавов в производстве крупногабаритных деталей традиционными способами является сложность достижения в них сбалансированных механических свойств - сочетания высокой прочности, жаропрочности, жаростойкости при температурах эксплуатации, что связано прежде всего с неоднородностью структуры и анизотропией свойств материалов, при применении традиционных технологий таких как литье, проката и сварка.

Эффективное управление структурой с целью повышения комплекса механических свойств достигается использованием современных технологий, связанных с аддитивными процессами. Данное направление соответствует приоритетным направлениям стратегии научно-технологического развития Российской Федерации до 2035 года и стратегии развития аддитивных технологий в Российской Федерации на период до 2030 года.

В этой связи диссертационная работа Хакимова Алексея Мунировича, в которой предлагается применение аддитивной технологии прямого лазерного нанесения для изготовления крупногабаритных деталей ГТД из сложнолегированного жаропрочного сплава для получения наиболее сбалансированных механических свойств, является весьма актуальной, а ее результаты способствуют развитию технологии изготовления изделий из жаропрочных материалов, например, корпусных деталей и лопаток турбин газотурбинного двигателя.

### **Анализ диссертации по главам.**

Работа состоит из введения, шести глав, выводов и списка литературы из 61 наименования. Общий объем диссертации составляет 147 страниц, в том числе 111 рисунков и 24 таблицы, 2 приложения.

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы ее цель, научная новизна и практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выявлены требования к свойствам материала, таким как жаропрочность и жаростойкость, а также к структуре (выявление и прирост  $\gamma$ -фазы), рассмотрены методы производства металлопорошковых композиций (МПК), традиционные и аддитивные технологии получения металломатричных материалов. Автор выполнил качественный литературный обзор опыта и фактов применения аддитивной печати металлами, а также показал развитие аддитивной технологии как таковой, это следует относить к достоинствам работы, так как разрешает массу вопросов, затрагиваемых в диссертации.

Во второй главе описаны материалы, методы и методики исследований. Представленная работа включает в себя ряд технологических и исследовательских этапов прямого лазерного нанесения материала. Изложены методические особенности исследования параметров качества исходной МПК, структуры и свойств материала из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ, полученного аддитивной технологией прямого лазерного нанесения, проведения термической обработки и изготовления опытной заготовки детали «Корпус» выходного устройства перспективного изделия, а также представлены технические характеристики используемой установки гибридного комплекса с многоканальным соплом.

Автором отработана методика изготовления образцов из МПК посредством подбора стабильных режимов прямого лазерного нанесения опытным путем, скорректированы скорость и подача МПК с целью нивелирования разницы расстояний до и после запуска программы.

В третьей главе исследованы исходные МПК из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ двух производителей: ФГУП «ВИАМ» (газовая атомизация) и АО «Композит» (центробежное распыление). В ходе работы, автором были изучены следующие базовые показатели: - морфология частиц; - химический состав; - оценка структуры на наличие пор; - гранулометрический состав исследуемых партий. Однако помимо них еще для более глубокого исследования качества МПК, были выполнены замеры текучести, насыпной плотности и содержания влаги. Согласно анализу, выполненному автором, выявлена разница между двумя МПК, полученными различными способами и выбран наиболее предпочтительный способ получения МПК – центробежное распыление.

В четвертой главе исследовано влияние процесса прямого лазерного нанесения и термической обработки на структуру и свойства образцов из жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ. Автором были установлены стабильные режимы, выявлены и проанализированы дефекты, выявлены закономерности изменения микроструктуры от мощности лазерного излучения. Трещины, трековая структура и пористость были изучены достаточно прецизионно, что позволило также установить причинно-следственную связь их возникновения.

В пятой главе разработана технология получения опытной заготовки детали «Корпус» с помощью аддитивной технологии прямого лазерного нанесения металлов. Автором была

оптимизирована конструкция заготовки детали «Корпус» для аддитивной технологии прямого лазерного нанесения. Автор опытным путём установил предельный угол наклона профильной стенки шпангоута относительно вертикали, так, как с превышением определенного значения ( $30^\circ$ ) стенка будет падать с места наплавки. Далее была создана управляющая программа и в результате чего разработан маршрутный технологический процесс изготовления.

В шестой главе проведена апробация разработанной технологии получения опытной заготовки детали «Корпус» с помощью аддитивной технологии прямого лазерного нанесения металлов. В ходе проделанной работы изготовлена опытная заготовка детали «Корпус», контроль за процессом изготовления выполнялся автором лично. После получения заготовки методом прямого лазерного нанесения, она подверглась термической обработке и на этапе технологического контроля дефектов не было выявлено. Полученная геометрия заготовки полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям для опытной детали.

В заключении сосредоточены основные научные и практические результаты, достигнутые в ходе выполнения диссертационной работы.

#### **Новизна исследования и значимость полученных результатов.**

В диссертации А.М. Хакимова впервые получен ряд новых и интересных результатов. К таковым в первую очередь следует отнести следующие:

1. Установление влияния режимов прямого лазерного нанесения на структуру и механические свойства жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ, полученного по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения;
2. Определение оптимального режима прямого лазерного нанесения, обеспечивающего однородные механические свойства в продольном и поперечном сечениях исследуемого материала;
3. Определение влияния термической обработки на структуру и свойства жаропрочного сплава ХН50ВМТЮБ, полученного по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке комплекса исследований для создания заготовки детали «Корпус» по аддитивной технологии прямого лазерного нанесения, который может быть внедрен в серийное производство после получения результатов типовых испытаний. Также необходимо отметить изготовление опытного образца заготовки ДСЕ «Корпус», прошедшего апробацию. Представленные в работе результаты являются новыми и существенно расширяют существующие представления о возможностях применения аддитивных технологий для изготовления крупногабаритных изделий. Содержание диссертации и основные выводы соответствуют поставленной цели и задачам исследования.

### **Достоверность и обоснованность результатов.**

Все научные положения диссертации и сделанные по работе выводы логично опираются на достоверные экспериментальные результаты, полученные современными методами структурного анализа и измерения механических свойств. Достоверность результатов и их новизна подтверждается также высоким уровнем научных публикаций, а также апробацией работы на отечественных конференциях.

### **Соответствие работы требованиям, предъявляемым к диссертациям.**

Диссертация соискателя характеризуется единой направленностью, подчинена общей цели и объединена научной идеей. Полученные результаты относятся к ряду нерешенных до этого проблем в области разработки способа изготовления крупногабаритных деталей и методов их термической обработки. Положения и результаты диссертации обладают научной новизной и практической значимостью. Публикации имеют достаточно высокий уровень и отражают содержание диссертации. Основное содержание диссертации опубликовано в 10 работах, включая 7 статей в рецензируемых научных журналах (5 из перечня ВАК). Содержание диссертации и автореферата соответствуют друг другу.

Учитывая вышесказанное, новизна и практическая значимость работы, а также достоверность полученных диссертантом результатов выглядят неопровержимыми.

В качестве замечаний и рекомендаций необходимо отметить следующее:

1. В названии диссертации следовало написать «механические свойства», поскольку в работе исследовался целый комплекс механических свойств, а иные свойства, например, физические, не исследовались.
2. В практической значимости работы указано, что термическая обработка положительно влияет на микроструктуру и свойства (имелось ввиду механические). Это известный факт для любых никелевых сплавов.
3. «Подобрана термическая обработка», была проведена одна термическая обработка – по одному режиму, и подбора или разработки режима термической обработки в работе нет.
4. «При анализе химического состава частиц МПК» почему-то выявлено «равномерное распределение фазовых составляющих» (стр.56). О каких фазах идет речь?
5. Нет методики подсчета размера зерен. Как был проведен расчет размера зерен столь причудливых форм? Размер зерен (стр.69) представлен в «мм<sup>2</sup>».
6. В выводах, в результатах не указано напряжение при проведении испытаний на длительную прочность, которое является обязательным при представлении таких результатов.
7. В 6 главе заготовка при промежуточном контроле не имела дефектов, без указания метода определения дефектов.
8. На стр. 134 указано, что отклонения размеров изготовленной детали составляют «до 2,5 мм», далее... «до 5,2 мм» и «до 4,7 мм». Непонятно, эти размеры ушли в плюс или в минус? То есть

требуемая серийная деталь получится, из изготовленной заготовки или нет? Припуск 2- 5 мм можно допустить?

Высказанные замечания и рекомендации не снижают ценности представленной работы и не влияют на общую положительную оценку. Диссертационная работа Хакимова Алексея Мунировича является законченным научным исследованием, которое соответствует специальности 2.6.17 – Материаловедение. По объему выполненных исследований и полученных результатов, новизне, актуальности и практической значимости, представленная диссертационная работа соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Хакимов А.М. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник  
федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт проблем  
сверхпластичности металлов Российской академии наук»  
Специальность, по которой защищена диссертация:  
01.04.07 Физика конденсированного состояния  
Адрес: 450001, г. Уфа, ул. Степана Халтурина 39  
Телефон: +7 (347) 223-64-07  
E-mail: [gfkorznikova@gmail.com](mailto:gfkorznikova@gmail.com)

Корзникова Галия Фердинандовна

Подпись д.т.н. Корзниковой Галии Фердинандовны \_\_\_\_\_ удостоверяю

Зам. директора по \_\_\_\_\_

А.А. Мозаров  
08.11.2022г.

