

В ходе выполнения проекта по Соглашению о предоставлении субсидии от 03.10.2014г. № 14.626.21.0001 по теме «Исследования и разработка экспериментальных аддитивных технологий для изготовления и ремонта сложнопрофильных деталей газотурбинных двигателей (ГТД) с использованием металлических порошков жаропрочного сплава на основе никеля» с Минобрнауки России в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» на этапе 2 «Экспериментальные исследования изготовленных партий металлических порошков жаропрочных сплавов на основе никеля (МПЖСН)» в период с 01.01.2015 по 30.06.2015 выполнялись следующие работы:

- проведены исследования состава МПЖСН лабораторных партий;
- обоснованы оптимальные значения технологических параметров процесса атомизации для получения МПЖСН;
- разработана технологическая инструкция по изготовлению МПЖСН методом атомизации;
- разработаны технические условия на МПЖСН, применяемые для изготовления сложнопрофильных деталей ГТД методом послойного лазерного сплавления и для ремонта сложнопрофильных деталей ГТД методом лазерной газопорошковой наплавки;
- изготовлены по разработанной технологической инструкции экспериментальные партии МПЖСН;
- разработаны программы и методики исследований МПЖСН экспериментальных партий на соответствие требованиям технических условий;
- проведены исследования МПЖСН экспериментальных партий на соответствие требованиям технических условий;
- проведены сравнительные исследования состава МПЖСН экспериментальных партий и импортного МПЖСН промышленной серии;

- проведены сравнительные исследования технологических свойств МПЖСН экспериментальных партий и импортного МПЖСН промышленной серии;

- разработана математическая модель физических процессов послойного лазерного сплавления однокомпонентных и многокомпонентных МПЖСН;

- разработан алгоритм расчета параметров физических процессов послойного лазерного сплавления однокомпонентных и многокомпонентных МПЖСН;

- проведена верификация математической модели и алгоритма расчета параметров физических процессов послойного лазерного сплавления однокомпонентных и многокомпонентных МПЖСН;

- проведены расчеты параметров физических процессов послойного лазерного сплавления однокомпонентных и многокомпонентных МПЖСН экспериментальных партий и импортного МПЖСН промышленной серии.

В процессе работы были проведены исследования состава лабораторных партий МПЖСН, изготовленные на этапе 1. Установлено, что полученные лабораторные партии МПЖСН по химическому составу показали полное соответствие требованиям технических условий на сплавы ВКНА-1ВР, ЖС6К, ВЖЛ12У и паспорту на сплав ВЖ159. Содержание кислорода и азота по фракции 20-40 и 40-80 мкм во всех полученных лабораторных партиях МПЖСН удовлетворяет требованиям ТЗ (содержание кислорода – не более 0,01% массовых долей, содержание азота – от 0,005 до 0,01% массовых долей).

Проведено обоснование оптимальных значений технологических параметров процесса атомизации. На основании полученных результатов выбраны основные технологические параметры процесса атомизации.

На основании полученных результатов разработана и оформлена технологическая инструкция ТИ 1.595-16-797-2015 «Изготовление металлических порошков жаропрочных сплавов на основе никеля методом атомизации», содержащая в разделах 6.2.12 - 6.2.15 секрет производства

(ноу-хау) «Технологический процесс получение порошков жаропрочных сплавов марок ВКНА-1ВР-ВИ, ВЖЛ12У-ВИ, ЖС6К-ВИ, ВЖ159», обеспечивающая получение высококачественных металлических порошков жаропрочных сплавов на никелевой основе для изготовления деталей ГТД методом послойного лазерного сплавления и ремонта сложнопрофильных деталей ГТД методом лазерной газопорошковой наплавки.

Разработаны технические условия (ТУ 1-595-16-1513 «Металлический порошок из жаропрочного сплава на никелевой основе марки ВКНА-1ВР-ВИ», ТУ 1-595-16-1514 «Металлический порошок из жаропрочного сплава на никелевой основе марки ЖС6К-ВИ», ТУ 1-595-16-1515 «Металлический порошок из жаропрочного сплава на никелевой основе марки ВЖЛ12У-ВИ», ТУ1-595-16-1512-2015 «Металлический порошок из жаропрочного сплава на никелевой основе марки ХН58МБЮ (ВЖ159)» на МПЖСН, содержащие все необходимые требования к МПЖСН применяемых для изготовления сложнопрофильных деталей ГТД методом послойного лазерного сплавления и для ремонта сложнопрофильных деталей ГТД методом лазерной газопорошковой наплавки.

По разработанной технологической инструкции были изготовлены экспериментальные партии МПЖСН.

Разработана «Программа и методики исследований МПЖСН экспериментальных партий на соответствие требованиям технических условий» № 14.626.21.0001 03ПМ., обеспечивающая необходимый объём исследований для определения соответствия изготовленных экспериментальных партий МПЖСН техническим условиям и пригодности использования в технологии изготовления сложнопрофильных деталей ГТД методом послойного лазерного сплавления и технологии ремонта сложнопрофильных деталей ГТД методом лазерной газопорошковой наплавки.

Проведены исследования МПЖСН экспериментальных партий на соответствие требованиям технических условий. Установлено, что полученные экспериментальные партии МПЖСН по химическому составу

показали полное соответствие требованиям разработанных технических условий. Содержание газовых примесей – кислорода и азота в экспериментальных партиях МПСЖН находится на весьма низком уровне и также соответствует требованиям разработанных ТУ на данные полуфабрикаты. Во всех исследованных образцах гранулы порошка, независимо от марки сплава, имеют правильную сферическую форму с малым количеством дефектных гранул, что соответствует требованиям технических условий (гранулы порошка должны иметь округлую форму). МПЖСН экспериментальных партий обладают способностью свободного протекания через воронку с отверстием 2,5 мм. Текучесть порошков всех четырёх сплавов характеризуется близкими значениями времени протекания порошка (для фракций 20-40 и 10-50 мкм время протекания порошка не превышает 15,0 с, для фракции 40-80 мкм не превышает 18,0 с).

Экспериментальные партии МПЖСН в каждом классе крупности однородны по размеру и имеют высокие процент содержание основной фракции – от 81,4 до 95,4 %, что соответствует требованиям технических условий (не менее 80%).

Проведены сравнительные исследования состава и технологических свойств МПЖСН экспериментальных партий и импортного МПЖСН промышленной серии. Установлено, что количество гранул менее 10 мкм в МПСЖН экспериментальных партий и импортного МПЖСН промышленной серии для фракций 20-40 мкм и 40-80 мкм находится на весьма низком уровне и не превышает 2%, что свидетельствует о высокой эффективности, предварительно проведенной газо-динамической сепарации для удаления особо тонких частиц. При этом количество пылевой фракции для порошков сплавов ВКНА-1ВР-ВИ, ВЖЛ12У-ВИ, ВЖ159 размером 20-40 мкм ниже, чем у порошка импортного производства Inconel 718. Измеренные показатели гранулометрического состава порошков крупной фракции (40-80 мкм) сплавов ВКНА1ВР-ВИ и ВЖЛ12У-ВИ показали, что количество гранул менее 10 мкм в этой фракции также ниже, чем у импортного порошка Inconel 718. Металлические порошки сплавов ВКНА1ВР-ВИ, ВЖЛ12У-ВИ и ВЖ159

размером 10-50 мкм характеризуются близкими значениями по количеству пылевой фракции, тогда как измерения пылевой фракции в порошке сплава ЖС6К-ВИ показывает наличие большего количества частиц тонкой фракции, однако пробное нанесение слоев в рабочем режиме на установке ConceptLaser показало, что это не препятствует нормальному формированию слоя при штатном режиме работы установки селективного лазерного сплавления. Содержание газовых примесей – кислорода и азота в экспериментальных партиях МПСЖН и импортного МПЖСН промышленной серии находятся на весьма низком уровне. Содержание кислорода в порошке импортного производства по фракциям 20-40 и 10-50 мкм незначительно выше, чем у порошков МПЖСН экспериментальных партий.

Текучестью обладают все экспериментальные партии МПСЖН, в том числе порошок импортного производства промышленной серии.

Гранулы МПСЖН экспериментальных партий и импортного МПЖСН промышленной серии имеют правильную сферическую форму. В порошках отечественного и зарубежного производства присутствуют единичные гранулы с наличием на поверхности сателлитов, сколов и гранулы, которые имеют аморфную оболочку (т.н. аморфный панцирь) и вытянутую овальную форму. При этом на порошке импортного производства Inconel 718 во всех трех фракциях присутствует наибольшее количество дефектов по сравнению с МПСЖН экспериментальных партий, что также подтверждает преимущество разработанной технологии получения МПЖСН по сравнению с отечественными и зарубежными аналогами

Разработаны математическая модель ЛС порошков ЖПНС, включающие в себя сопряженные нестационарные процессы тепломассопереноса- и гидродинамическую расплава, а также кинетику гетерогенного кристаллообразования в расплаве. При математическом описании задачи также учитывались взаимодействия: а) лазерное излучение – подложка; б) лазерное излучение – частицы; в) частицы – подложка.

Сформулирован алгоритм расчета ЛС и обоснован метод дискретизации исходных уравнений. Выбран метод распараллеливания расчета для высокопроизводительных вычислительных систем кластерной архитектуры с распределенной памятью. Показана целесообразность использования открытого пакета вычислительных библиотек OpenFOAM для решения задачи расчета процессов при ЛС.

Для верификации разработанных вычислительных моделей и алгоритмов решена серия тестовых задач по изучению теплопереноса при одновременном протекании ФП в процессе лазерного сплавления частиц однокомпонентного порошка. Влияние движения жидкости из-за сил Марангони на перенос тепла (конвективная теплопроводность) моделируется введением эффективного значения теплопроводности в области расплава. Обоснование этого предположения проведено путем решения модельной задачи для согласованных полей температуры и конвективных течений.

Рассчитана эволюция распределения температуры и профилей спеченных слоев для различных параметров процесса и характеристик ЛИ. Полученные расчетные кривые демонстрируют значительное влияние потока массы частиц, мощности ЛИ и скорости сканирования на динамическое поведение расплава в зоне спекания, геометрические характеристики спеченного слоя (глубина и ширина зоны проплавления, высота наплавленного слоя).

Проведенное моделирование позволило получить информацию о процессах, вызванных мощным лазерным воздействием на ультрадисперсные порошковые системы при ЛС: описать 3D процессы установления тепловых, гидродинамических полей, а также объемных долей превратившихся фаз в зависимости от энергетических характеристик ЛИ и параметров потока инжектируемых частиц порошка. Проведен также расчет таких наиболее значимых характеристик процесса ЛС как: высота наплавленного валика, глубина проплавления, а также профиль спеченных материалов.