

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УРАЛЬСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ПЕРВОГО
ПРЕЗИДЕНТА РОССИИ Б.Н. ЕЛЬЦИНА»

УДК 621.762-03

№ госрегистрации АААА-А16-116120510007-6



УТВЕРЖДАЮ
Ректор университета

В.А. Кокшаров

29 декабря 2017 г.

ОТЧЕТ

О ПРИКЛАДНЫХ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАЗРАБОТКАХ

Разработка технологии производства керамических узлов и деталей методом селективного лазерного сплавления с использованием инновационных методов диагностики процессов и полученных изделий

по теме:

Разработка технологии производства керамических деталей методом селективного лазерного сплавления на модернизированной аддитивной установки


(промежуточный)

Этап 2

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»

Соглашение о предоставлении субсидии от 03.10.2016 г. №14.578.21.0200

Руководитель проекта,
к.т.н.


А. С. Фефелов
(подпись, дата) 29.12.2017г.

Екатеринбург 2017

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель проекта,
канд. тех. наук



подпись

А.С. Фефелов
(введение, заключение)

Исполнители:

Заведующий сектором
прототипирования



подпись

Ю.А. Авраамов
(раздел 5)

Старший научный сотрудник,
канд. тех. наук



подпись

Д.К. Алёшин
(раздел 2)

Инженер-конструктор



подпись

И.А. Ананьин
(раздел 1, 2)

Инженер-конструктор



подпись

О.В. Бубнова
(раздел 2)

Инженер-химик
канд. хим. наук



подпись

А.В. Власов
(раздел 3, 4)

Ведущий специалист по
инновационной деятельности



подпись

С.С. Дмитриев
(раздел 11)

старший научный сотрудник



подпись

Н.Э. Дубини
(введение)

Инженер-конструктор



подпись

В.С. Дылдин
(раздел 2)

Специалист



подпись

В.С. Евдокимова
(раздел 3)

Ведущий специалист по
инновационной деятельности



подпись

И.В. Евдокимова
(раздел 5)

директор центра обеспечения и
развития инновационной
деятельности



подпись

А.А. Елисеева
(раздел 11)

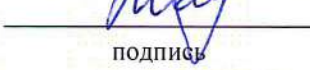
Доцент



подпись

А.С. Жилин
(раздел 6)

Доцент
канд. тех. наук



подпись

С.Н. Злыгостев
(раздел 3, 5)

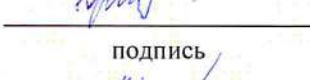
Инженер 2 категории, специалист
по инновационной деятельности



подпись

Р.А. Иванов
(раздел 7, 8, 6)

Заведующий сектором материалов



подпись

М.В. Ильиных
(раздел 8, 6)

Студент	 подпись	Д.А. Кириллов (раздел 7,8)
Инженер-конструктор	 подпись	С.В. Колмаков (раздел 2)
Начальник отдела канд. тех. наук	 подпись	В.Т. Комаров (раздел 10)
Ведущий специалист по инновационной деятельности	 подпись	С.В. Комаров (раздел 7)
Специалист по инновационной деятельности	 подпись	А.С. Копосова (раздел 2)
Начальник отдела продаж	 подпись	А.Ю. Лабырин (раздел 4,5)
Доцент канд. тех. наук	 подпись	М.А. Машковцев (раздел 10)
Руководитель отдела аддитивных технологий	 подпись	А.Г. Меркушев (раздел 11)
Ведущий программист	 подпись	Э.Р. Мухаметшин (раздел 9,6)
Инженер	 подпись	М.А. Никонов (раздел 6)
Старший научный сотрудник	 подпись	А.Н. Петрова (раздел 8, 11)
Начальник участка	 подпись	М.С. Плотников (раздел 7,8,10)
Научный сотрудник	 подпись	А.Ф. Терлыга (раздел 2)
Директор центра трансферта технологий	 подпись	Н.В. Феодосиади (раздел 2)
Инженер-конструктор	 подпись	Д.А. Фершт (раздел 2,3)
Специалист	 подпись	А.А. Мокрушин (раздел 10,11)
Специалист	 подпись	Ю.В. Мирошниченко (раздел 9)

Заведующий кафедры


подпись

Д.Б. Шульгин
(раздел 2)

Специалист


подпись

О.А. Чикова
(раздел 10)

Ведущий специалист


подпись

А.В. Афанасьев
(раздел 8)

Индустриальный партнер:

АО «ОКБ «НОВАТОР»
(разделы 12-22)

Руководитель работ от Индустри-
ального партнера


подпись

В.Н. Мельников

Зам. начальника отдела


подпись

С.А. Койтов

ВВЕДЕНИЕ

Перечень ключевых слов: ПОРОШКОВЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ПОРОШКОВЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, СЕЛЕКТИВНОЕ ЛАЗЕРНОЕ СПЛАВЛЕНИЕ, ТЕРМОСТОЙКОСТЬ, ПОРИСТОСТЬ, АДДИТИВНАЯ УСТАНОВКА УРАМ-150D.

Цель выполнения этапа:

Разработка технологии производства керамических деталей методом селективного лазерного сплавления на модернизированной аддитивной установке

Задачи этапа:

Разработать эскизную конструкторскую документацию на модернизацию аддитивной установки, изготовить и приобрести комплектующие, провести пуско-наладочные работы.

Изготовить пробную партию заготовок «пластина» не менее 15 шт.

Изготовить 100 заготовок «пластина».

Разработать и опробовать методику испытаний пробной партии заготовок, изготовленных на аддитивном оборудовании.

Место и роль работ отчетного этапа в выполнении проекта в целом:

Второй этап важен с точки зрения прикладного значения результатов, полученных на первом этапе ПНИЭР. Показаны научно-технологические исследования компонентов керамического состава, моделирующие базовые процессы имеющие существенное значение для аддитивных технологий и далее верифицированные множеством эмпирических итераций, декларированы ключевые подтверждения корреляции теоретических моделей и экспериментальных данных[1]. Согласно классическому правилу упаковки частиц сферической формы, добавление модифицирующего компонента в диапазоне 23-42 об. % может образовать непрерывный кластер и будет получен максимальный регистрируемый эффект изменения свойств в керамических композитах. Для анализа и выбора высокомодульной модифицирующей добавки, с целью уверенного создания непрерывного кластера в керамическом образце ZrO_2 , определен ряд методов исследований. Получение подобных данных для шихт различных составов с помощью методик термического анализа показано в работе [2]. Приводятся результаты экспериментальной оценки взаимодействия компонентов с оксидом циркония, выполненные с применением методов совмещенной сканирующей калориметрии и термогравиметрии. Термодинамическая оценка взаимодействия оксида циркония с алюминием, показала возможность образования Al_3Zr в условиях алюминотермического восстановления из оксидов при температурах выше $600^\circ C$. При увеличении концентрации ZrO_2 в шихте, т.е. при уменьшении содержания восстановителя температура процесса образования Al_3Zr незначительно сдвигается в область более высоких

температур, при этом энтальпия процесса возрастает. Данные рентгенофазового анализа продуктов восстановительной реакции обоих образцов показывают образование конгруэнтно устойчивого Al_3Zr , а также соединений Al_2O_3 , ZrO и следов AlZr .

Новым эффективным решением по сравнению с ранее проведенными разработками являются объективные преимущества композиции оксида циркония с высокомодульной модифицирующей добавкой. Данный путь позволяет получать наиболее приемлемые результаты в процессе послойного спекания модифицированных порошковых керамических материалов. Отработана композиция следующего состава: ZrO_2 с добавкой 42 об. % Al_2O_3 .

Изготовление модифицированного порошкового керамического материала для изготовления пробной партии заготовок «пластина», предназначенной для проведения испытаний на вариативность предполагает исследование комплекса свойств от компонентной базы вплоть до рабочих режимов элемента керамики. Создание керамических деталей, работающих в сверхжестких тепловых режимах нагружения накладывает ряд требований, выполнение которых неразрывно связано со всесторонним изучением базовых свойств составов для последующей стабилизации фаз компонентов керамики, оптимизации регулируемых параметров гетерогенного материала. Принцип передачи воздействия при характерных разрушениях для керамических материалов имеет сходный вид, что и для низко-модульного модифицирования. Распространяющаяся трещина в матричном компоненте в определенный момент попадает в область частицы-модификатора. Дальнейшее разрушение зависит от нескольких факторов взаимодействия порошка модификатора с матричным компонентом: адгезии между матрицей и модификатором, наличии дефектов в частице-модификаторе, температуры материала. Температура материала влияет косвенным образом, вектор влияния приходится на коэффициенты теплового расширения, как правило, различающиеся у материалов с разным модулем упругости. Одним из наиболее важных с этой точки зрения определяемых свойств является тепловой коэффициент объемного расширения, α_p . Для определения значения коэффициента объемного расширения используются две различные комбинации модельного псевдопотенциала: локальный вариант псевдопотенциала Анималу-Хейне с Тойго-Вудруффа и псевдопотенциал Краско-Гурского с Гелдарт-Воско. Используемые комбинации псевдопотенциала с обменно-корреляционной функцией отражают хорошее согласие с экспериментальными результатами [1]. В работе тепловые коэффициенты объемного расширения при $T=373\text{K}$ рассчитаны вариационным методом с системой сравнения аддитивных твердых сфер. Найдено, что модельный псевдопотенциал Краско-Гурского с обменно-корреляционной функцией Гелдарт-Воско дает несколько лучшее согласие с экспериментом, чем локальный модельный псевдопотенциал Анималу-Хейне с обменно-корреляционной функцией Тойго-Вудруффа. Точ-

ность анализа свойств элементарных компонентов фаз гетерогенной керамики позволяет ускорить переход к построению устойчивой модели поведения керамической детали в конструкции. Представленные в статьях [1,2,3,4] сходимости, позволили оптимизировать процессы подготовки компонентов и технологические режимы аддитивной установки. На этом этапе определяется принципиальная возможность получения пробной партии заготовок «пластина» на модернизированной аддитивной установке УРАМ-150D методом селективного лазерного сплавления из порошковых керамических материалов в соответствии с техническим заданием и планом графиком. Отрабатывается технология изготовления заготовок «пластина», стабильность работы аддитивной установки после модернизации и установки дополнительного модуля контроля параметров. Кроме этого на втором этапе определяются оптимальные режимы изготовления модифицированных керамических порошковых материалов для использования в качестве сырья для технологии селективного лазерного сплавления.

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. Разработка ТЗ на модернизацию аддитивной установки, включая её программное обеспечение (ПО).....	10
2. Разработка эскизной конструкторской документации на модернизацию аддитивной установки.....	14
3. Разработка ПО и программной документации на программное обеспечение модернизированной аддитивной установки	18
4. Приобретение комплектующих и материалов	19
5. Разработка программы и методики испытаний пробной партии заготовок «пластина».....	20
6. Проведение модернизации аддитивной установки.....	22
7. Изготовление пробной партии заготовок «пластина».....	24
8. Проведение испытаний пробной партии заготовок «пластина», анализ полученных результатов	34
9. Наладка модернизированной аддитивной установки и ПО.....	35
10. Изготовление партии заготовок «пластина» (не менее 100 шт.) для испытаний модернизированной аддитивной установки на вариативность	37
11. Составление промежуточного отчёта по этапу	47
12. Изготовление модифицированного порошкового керамического материала для изготовления пробной партии заготовок «пластина» и для изготовления партии заготовок «пластина», предназначенной для проведения испытаний на вариативность	48
13. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления модифицированных порошковых керамических материалов	50
14. Разработка программы и методики испытания модернизированной аддитивной установки на вариативность (стабильность получения результатов).	53

15. Разработка лабораторных методик: определения структурных составляющих керамических порошковых материалов и модифицированных керамических порошковых материалов; определения оптимального значения оптических параметров источника лазерного излучения для сплавления керамических порошковых материалов.....	56
16. Проведение испытаний модернизированной аддитивной установки на вариативность (стабильность получения результатов)	69
17. Разработка ТЗ на дополнительный модуль контроля параметров детали при построении для модернизированной аддитивной установки, включая ПО модуля.....	71
17.1. Разработка компонентов ПО дополнительного модуля контроля параметров детали при построении для модернизированной аддитивной установки.....	73
18. Разработка дополнительного модуля контроля параметров детали при построении для модернизированной аддитивной установки.....	75
19. Разработка эскизной конструкторской документации на экспериментальные образцы керамических деталей-представителей узлов и деталей ГЛА.....	78
20. Проведение мероприятий по популяризации результатов ПНИЭР	80
21. Отчет о дополнительных патентных исследованиях патентоспособности созданных РИД.....	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	84
Список использованных источников	85

1. Разработка ТЗ на модернизацию аддитивной установки, включая её программное обеспечение (ПО).

Селективное лазерное сплавление (SLM, selective laser melting), одна из передовых и сравнительно широко используемых технологий 3d печати изделий из металлов, в последние годы вызывает большой интерес научного сообщества как перспективный вариант производства керамических изделий высокой плотности и управляемой структуры посредством процесса прямой обработки керамического порошка без связующего вещества, с незначительными затратами на постобработку [5]. Основная масса немногочисленных исследований, в области аддитивного производства изделий из керамики, посвящена материалам на основе оксида алюминия, оксида циркония, оксида кремния, а также, используемого для стабилизации, оксида иттрия. На данный момент уже отмечается рост прочностных характеристик, потенциальное уменьшение количества этапов производства конечных изделий, большой простор для геометрической индивидуализации, что сильно востребовано, к примеру, в стоматологии, а также возможность интегрирования сеточных каркасов [6].

Но стоит учитывать, что керамический порошок совершенно новый материал для аддитивного производства и селективного лазерного сплавления в частности, а также то, что процесс его структурообразования сильно отличается от металлических материалов в аналогичных процессах производства. Это приводит к тому, что построение моделей процессов плавления, разработка режимов и подбор состава порошка в большей мере должен основываться на данных хорошо исследованных традиционных методов производства изделий из керамики. В то время как стратегии обработки (карта треков сканирования) может разрабатываться по логике, используемой для селективного лазерного сплавления металлов.

В процессе эксплуатации аддитивной установки УрАМ-150D, при спекании керамических порошков, в некоторых механизмах возникла необходимость в улучшении для увеличения качества конечной продукции (детали). Конструкция дверки не позволяла полностью герметизировать рабочую камеру, что в свою очередь не позволяло достигнуть необходимого содержания кислорода в камере и необходимого давления. При сплавлении возникало окисление порошка, и сплавляемая поверхность получалась шероховатой. Крышка бункера дозатора была выполнена из пластмассы, что не позволяло полностью герметично закрывать ее, это приводило к разгерметизации камеры. В механизме дозирования корпус дозатора имел такую конструкцию, что не позволяло сцентрировать вал дозатора, находящийся внутри и при запуске механизма вал дозатора фиксировался и не происходило дозирование порошка. Для спекания керамического порошка необходимо

точное, ровное нанесение слоя порошка на рабочую поверхность, в несколько микрон. Существующая конструкция имела не жесткую структуру, что не позволяло точно и постоянно наносить один и тот же слой, от вибраций появлялись перекосы рабочего стола относительно зеркала столешницы. Для циркуляции инертного газа в системе была разработана фильтровально-охлаждающая станция. Существующая конструкция не позволяла полностью герметизировать систему и достичь необходимой температуры в рабочей камере, поэтому возникла необходимость в проведении мероприятий по улучшению конструкции аддитивной установки, а именно:

Модернизация фильтровально-охлаждающей станции необходима для уменьшения габаритов, увеличении производительности, герметизации системы воздухообмена.

Модернизация механизма дозирования необходима для точного позиционирования механизмов дозирования, для удобства при очистке бункера дозатора и для отсутствия протекания порошка.

Модернизация крышки бункера дозатора необходима для усиления конструкции и герметизации рабочей камеры, а также для удобства загрузки керамического порошка в бункер дозатора.

Модернизация дверки рабочей камеры необходима для усиления конструкции, для возможности визуальной регистрации процесса сплавления изделия и для герметизации рабочей камеры.

Модернизация механизма перемещения стола необходима для усиления конструкции, для улучшения точности позиционирования рабочего стола. Позволяет исключить перекосы плоскости стола относительно зеркала столешницы, что увеличивает качество конечного изделия. В соответствии с результатами, сформированными при выполнении работ по 1 этапу ПНИЭР, и учитывая литературные данные, коллектив исполнителей разработал техническое задание на модернизацию аддитивной установки.

Кроме этого для выполнения работ по сплавлению керамических порошковых материалов необходимо дополнительно обеспечить: полную регулировку в широких пределах всех кинематических и технологических параметров, а также и их контроль; регулировку скорости перемещения стола, ножевой балки и барабана в зависимости от режима работы и направления движения; регулировку циркуляции воздуха в зависимости от режима работы, направления движения и типа фильтра, регулировку и поддержание температуры стола и камеры, регулировку и поддержание давления газа и парциального давления в камере.

Для выполнения работ по обозначенной проблематике нами были сформулированы и оформлены в виде технического задания требования к модернизируемым узлам аддитивной установки УрАМ-150D.

Требования к Механизму дозирования:

Чтобы исключить попадания в керамический порошок иных включений, перед сборкой все детали механизма очистить от стружки и грязи;

Острые кромки притупить;

Сборку механизма и отдельных узлов выполнять на сборочной или контрольной плите;

Силиконовый профиль поз.3 дозатора, должен плотно прилегать к стенкам в отверстии корпуса дозатора, чтобы исключить просыпание керамического порошка.

Требования к Крышке бункера дозатора:

Крышка бункера дозатора должна плотно прилегать и быть герметичной;

Стык уплотнительного шнура должен быть плотно приклеен, чтобы исключить травления газа;

Требования к Дверке рабочей камеры:

Стык уплотнительного шнура должен быть плотно приклеен, чтобы исключить травление газа;

Допускается слесарная подгонка, для плотного прилегания дверки к лицевой панели рабочей камеры;

Требования к Механизму перемещения стола:

При сборке механизма детали поз. 5, 6, 17, 18, 22, 23, 24, 25, а также шаговый двигатель с редуктором серии FL86STH65-2808AG и муфтой поз. 59 использовать существующие (УрАМ-150.010.000.000СБ);

Рабочая величина перемещения механизма $H=200\text{мм}$;

Время перемещения механизма на расстояние 200 мм, $t=200\text{сек}$;

Для спекания керамических порошков шаг перемещения механизма должен составлять 15 мкм;

Для создания равномерного слоя керамического порошка направляющие механизма должны быть выставлены согласно черт. УрАМ-150.010.000.000СБ, чтобы исключить криволинейность перемещения.

Требования к Фильтровально-охладительной станции:

Разделку уплотнителя выполнить согласно эскизу (065001.000.000СБ);

Герметичность станции должна соответствовать ГОСТ 24054-80;

Система газооборота должна быть замкнутой;

Требования к Программному обеспечению:

Для выполнения работ по сплавлению керамических порошковых материалов необходимо дополнительно обеспечить:

Полная регулировка в широких пределах всех кинематических и технологических параметров, а также и их контроль.

Регулировка скорости перемещения стола, ножевой балки и барабана в зависимости от режима работы и направления движения.

Регулировка циркуляции воздуха в зависимости от режима работы, направления движения и типа фильтра, регулировка и поддержание температуры стола и камеры, регулировка и поддержание давления газа и парциального давления кислорода в камере.

Выводы по разделу:

Согласно требованиям ТЗ на выполнение ПНИЭР на данном этапе работ создан проект ТЗ на модернизацию аддитивной установки, включая ее программное обеспечение. Полностью текст ТЗ приведен отдельным документом к отчету второго этапа ПНИЭР.

Работа проведена в полном объеме и в соответствии с требованиями п. 3.13. технического задания. Разработано ТЗ на модернизацию аддитивной установки от 27.02.2017.

2. Разработка эскизной конструкторской документации на модернизацию аддитивной установки.

Для изготовления на аддитивной установке изделий из керамических порошков, обладающей меньшей дисперсностью, чем ранее используемые металлические порошки, необходимо было ее модернизировать. Для этого необходимо было добиться:

- нужной герметизации рабочей камеры (содержание кислорода 0,15 – 0,17%), т.к. большее содержание приводит к окислению порошка;

- необходимо было регулировать величину содержания водорода (H_2) и углекислого газа (CO_2) (не более 0,2%), т.к. это может привести к нестабильному спеканию керамических материалов;

- так как порошковый керамический материал имеет высокую дисперсность и меньшую плотность в сравнении с металлическими порошками, это приводит к появлению большого объема взвеси порошка во время спекания, поэтому было необходимо регулировать ламинарный поток нагнетаемого инертного газа над поверхностью платформы построения;

- по этой же причине, необходимо было изменить механизм подъема стола, чтобы он обеспечивал погрешность перемещения ± 1 мкм;

- необходимо было регулировать температуру стола ($300^\circ C$);

- необходимо было регулировать температуру в рабочей камере (не более $40^\circ C$);

- т.к. оптическая система не имела герметичного наружного кожуха, ее механизмы часто загрязнялись, что могло привести к погрешностям спекания и как следствие к дальнейшей поломке, поэтому было необходимо укрыть оптическую систему от воздействия внешней среды;

- т.к. предыдущая конструкция механизма дозирования имела корпус из алюминия, на поверхности взаимодействия с порошком образовывалась оксидная пленка, что приводило к поломке узла, поэтому было необходимо изменить конструкцию механизма дозирования для точной дозировки порошка.

Рабочая камера. Существующая конструкция декоративной дверки не позволяла полностью герметизировать рабочую камеру и достигнуть необходимого уровня содержания кислорода в камере и необходимого давления. Основная часть рабочей камеры установлена на перфорированном каркасе. Дверка имела три точки крепления, две на каркасе (петли), одна на передней панели рабочей камеры. Из-за конструктивных особенностей запорная дверка имела толщину 6 мм. Дверка являлась одновременно запорной и декоративной. Так как места крепления дверки находились на разных узлах установки, это не позволяло добиться параллельности сопрягаемых элементов (дверки и рабочей камеры), а также и при такой толщине дверка в процессе эксплуатации установки изгибалась, что

приводило к разгерметизации и к травлению газа из рабочей камеры и как следствие к потере давления. К тому же существующая дверка не имела смотрового окошка для визуальной регистрации за процессом сплавления изделий.

Было принято решение о разделении дверок. Декоративную дверку оставить, а запорную заменить. А также полностью переместить крепление дверки на переднюю панель рабочей камеры. Установить дверку на 3 петли и закрепить по периметру с помощью трех эксцентриковых зажимов черт. УрАМ-150.009.100 эксцентриковые зажимы, благодаря клинообразной конструкции, позволяют равномерно закрепить дверку в трех местах, что в свою очередь позволит равномерно прожать установленное в дверку резиновое уплотнение. В конструкцию дверки добавлено смотровое окно для визуальной регистрации за процессом сплавления изделий. Изменения конструкции дверки оформлены в черт. УрАМ-150.009.100.

Механизм дозирования (УрАМ-150.007.000.000). Крышка бункера дозатора была выполнена из пластмассы методом аддитивных технологий, что ввиду конструктивных особенностей не позволило прожать резиновое уплотнение и полностью герметично закрывать ее, это приводило к разгерметизации камеры. К тому-же загрузочное окно с запирающей крышкой располагалось внутри рабочего модуля, что затрудняло загрузку порошка в бункер дозатора.

Взамен была разработана крышка бункера дозатора (УрАМ-150.007.210) выполненная из нержавеющей стали. Узел представляет собой две сварных конструкции соединенных рукавом при помощи эксцентриковых хомутов, что полностью исключило протечку инертного газа из системы. С помощью рукава загрузочное окно в эскизно-конструкторской документации УрАМ-150.007.210 выведено на крышу рабочего модуля. Выбор материала обуславливался тем, что нержавеющая сталь химически инертна к используемым порошковым керамическим материалам.

В существующем механизме дозирования корпус дозатора был изготовлен по аддитивной технологии из алюминия с внутренними каналами для барбуляции металлического порошка. При взаимодействии с оксидом циркония алюминиевый корпус покрывался оксидной пленкой и заклинивал вал дозатора, что приводило к остановке машины. В процессе разработки эскизной конструкторской документации модернизацию аддитивной установки материал корпуса дозатора был заменён на нержавеющую сталь, а вал дозатора дополнили силиконовыми профилями для лучшего прилегания к корпусу и таким образом обеспечили точно дозированную подачу керамического порошка в зону сплавления. В конструкцию привода вала дозатора внесены изменения в части разработанной эскизно-конструкторской документации на дополнительный датчик обратной связи для точного поворота вала на заданный угол, что обеспечит отслеживание расхода керамического по-

рошка, а также точный расчет необходимого дозирования порошка для выбранного режима сплавления. Изменения конструкции механизма дозирования оформлены в эскизно-конструкторской документации черт. УрАМ-150.007.000.000.

Механизм перемещения стола (УрАМ-150.010.000.000). Для стабильного спекания керамического порошка необходимо точное, ровное нанесение слоя порошка на рабочую поверхность, с отклонением от заданного размера не более 2 мкм. Существующая конструкция имела недостаточно жесткую структуру, что не позволяло точно и постоянно наносить слой с отклонением заданного размера менее 2 мкм, от вибраций появлялись перекосы рабочего стола относительно зеркала столешницы.

При модернизации установлены дополнительно 4 высокоточные направляющие (поз. 63) диаметром 30 мм, обеспечивающие плавное перемещение стола. Данные направляющие уравнивают несоосность при своей особой конструкции. Это исключило перекося рабочего стола при перемещении, усилило конструкцию. Изменения конструкции механизма перемещения стола оформлены в черт. УрАМ-150.010.000.000.

Фильтровально-охлаждающая установка (065001.000.000). Недостатком существующей системы для процесса спекания керамики оказалась низкая теплоотдача радиатора охлаждения, что связано с увеличением температуры спекания керамики и температуры нагрева стола.

Для повышения теплообмена была разработана эскизно-конструкторская документация на специальный теплообменник (ч.т.д. 065001.000.001) имеющий сложную пространственную форму и внутренние перегородки для постоянного перемешивания слоя охлаждающей жидкости. Теплообменник состоит из набора идентичных зигзагообразных каналов эллипсоидной формы переменного сечения. Внутри каналов расположены ребра, закручивающие поток жидкости в вихрь, что обеспечивает срыв пограничного слоя с внутренней поверхности, более глубокое перемешивание жидкости и повышение уровня теплообмена в связке «газ – трубка – жидкость». Газ, проходя через межтрубное пространство, закручивается за счет зигзагообразной формы трубок. Переменное сечение каналов вызывает эффект пульсирования потоков газа и жидкости, что значительно повышает эффективность теплообменника, выделяя его из конкурентного ряда. Кроме того, установлен дополнительный насос с регулируемой производительностью, который позволит уменьшить шум при работе модернизированной аддитивной установки и обеспечить плавную циркуляцию газа в инертной камере со скоростью не превышающей 0,45м/сек по условию эффективной работы установленной механическим фильтром тонкой очистки. Изменения конструкции фильтровально-охлаждающей станции оформлены в эскизно-конструкторской документации черт. 065001.000.001.

Выводы по разделу:

В ходе выполнения работ разработана следующая эскизно-конструкторская документация на модернизацию аддитивной установки:

- чертеж общего вида (черт. УрАМ-150.009.000);
- монтажный чертеж (черт. УрАМ-150D);
- схема структурная (черт. УрАМ-150.000.000-Э ЭЗ);
- чертежи деталей (ЭКД_модернизация аддитивной установки_1;
ЭКД_модернизация аддитивной установки_2);
- ведомость покупных (ВП-УрАМ-150.000.000.000).

Работа выполнена в полном объеме в соответствии с требованиями к разрабатываемой документации п. 6.1.9 «Эскизная конструкторская документация на модернизацию аддитивной установки в составе:

- чертеж общего вида;
- монтажный чертеж;
- схема структурная;
- чертежи деталей;
- ведомость покупных.»

технического задания на выполнение ПНИЭР.

3. Разработка ПО и программной документации на программное обеспечение модернизированной аддитивной установки

Разработка ПО была выполнена для управления компонентами модернизированной аддитивной установки. Алгоритм функционирования установки определяется управляющей программой, записанной в память базового блока контроллера.

Изготовление изделий из керамических порошков наложило на систему управления в качестве одной из основных задач требование регулировки в широких пределах кинематических и технологических параметров, а также и их контроль.

Программное обеспечение должно позволять реализовать следующие дополнительные функции:

- 1) Мониторинг и контроль величины содержания водорода (H_2) и углекислого газа (CO_2). Для этого необходим модуль программного обеспечения, который позволяет сопрягать контроллер с дополнительно установленным газоанализатором, а также добавлено отслеживание и контроль за содержанием выделяющихся продуктов при построении изделия.
- 2) Мониторинг и контроль дозирования керамического порошка для формирования одного слоя. Для этого необходим модуль программного обеспечения, который позволяет сопрягать контроллер с дополнительно установленным в привод вала дозатора дополнительный датчик обратной связи для точного поворота вала на заданный угол в соответствии со сборочным чертежом УрАМ-150.007.000.000. В ПО необходимо было добавить отслеживание и контроль за положением вала дозатора относительно оси.
- 3) Мониторинг и контроль, а также управление за перемещением рабочего стола на величину в 15 мкм. Для этого были добавлены 4 высокоточных направляющих в соответствии со сборочным чертежом УрАМ-150.010.000.000 и в ПО необходимо было внести изменения отсчета оптической линейки для отслеживания и контроля положения.
- 4) Мониторинг и контроль температуры в рабочей камере. Для этого необходим модуль программного обеспечения, который позволяет сопрягать контроллер с дополнительно установленными двумя 2 датчиками температуры, установленные на входе и выходе в фильтровально-охлаждающей станции в соответствии со сборочным чертежом УрАМ-150.000.000.220.

Работа выполнена в полном объеме в соответствии с требованиями к разрабатываемой документации п. 6.1.11 технического задания на выполнение ПНИЭР.

4. Приобретение комплектующих и материалов

В соответствии с разработанной эскизной конструкторской документацией и ведомостью покупных, были проведены работы по статье «Приобретение оборудования» по запланированной Смете затрат на общую сумму 2300000 (два миллиона триста тысяч) рублей.

Учитывая высокую стоимость, точность и прочие серьезные требования к покупным и изготавливаемым изделиям, а также требования законодательства о проведении гос. закупок, были проведены конкурсные мероприятия по выбору поставщика оборудования и комплектующих для модернизации аддитивной установки УрАМ-150D, необходимой для сплавления керамических материалов.

В результате конкурсных процедур между УрФУ и ООО «ПищМаш» был заключен договор № 0000000007416N960002/43-12/A37-2017 от 04.12.2017 года на изготовление и поставку комплектующих для модернизации аддитивной установки УрАМ-150D в соответствии с Техническим заданием и чертежами Заказчика.

13 декабря 2017 года все комплектующие были поставлены, в частности, в поставку входил комплект изделий для модернизации следующих узлов:

1. Механизм дозирования УрАМ-150.007.000.000
2. Крышка бункера дозатора УрАМ-150.007.210
3. Дверка рабочей камеры УрАМ-150.009.100
4. Механизм перемещения стола УрАМ-150.010.000.000
5. Фильтровально-охлаждающая станция 065001.000.000
6. Измерительный модуль УрАМ-150D

Работа выполнена в полном объеме в соответствии с ЭКД и ведомостью покупных.

5. Разработка программы и методики испытаний пробной партии заготовок «пластина»

Техническим заданием на ПНИЭР предусмотрено разработать программу и методику проведения испытаний пробной партии заготовок «пластина» по наиболее критичным параметрам, определяемым п. 4.3.3, 4.3.4 ТЗ.

Цель испытаний

В первую очередь важно убедиться в возможности изготовления образцов требуемых размеров, с отклонениями, не превышающими 0,5 мм.

Проведение испытаний на термостойкость обусловлены параметрами рабочих условий отдельных элементов и узлов, зависящих от полётных режимов ГЛА, при которых изделия испытывают значительные тепловые нагрузки циклического типа.

Получение информации о пористости, выдержавшего испытания образца в значительной мере определяет сферу применимости материала – от деталей и частей наружного покрытия до элементов газо-регулирующей аппаратуры.

Требования к программе

Разработанная программа и методики проведения испытаний пробной партии заготовок пластина (КМ.02П.2017.ПМ) в полном объеме должна соответствовать требованиям разрабатываемой документации. Программа должна включать величины, введённые в ТЗ, которыми обязано обладать получаемое изделие, для того чтобы оценить полученные результаты и скорректировать дальнейшее направление ПНИЭР, а также входить в состав отчётной документации по этапу.

Также программа должна требовать обеспечения регулярности нормальных условий при проведении испытаний, а также соблюдения этапов подготовки образцов для обеспечения качественного сравнения, получаемых результатов при равных условиях. Таким образом, для этого, образцы сушат при температуре 110 - 135 °С до постоянной массы. Массу считают постоянной, если результат последующего взвешивания, проведенного не менее чем через 2 ч сушки, отличается от предыдущего не более чем на 0,1%. Допускается проводить сушку образцов в течение 1 ч с последующим взвешиванием, если результаты взвешивания отличаются не более чем на 0,1 %.

Испытания проводятся в спецодежде с защитой органов дыхания: лабораторный халат, респиратор и перчатки. Требования безопасности при проведении испытаний должны соответствовать ГОСТ 12.2.007.9.

Необходимо структурирование результатов данных испытаний, для этого вводят таблицу, в которой отражены результаты измерений.

Критическими отклонениями для образцов является сохранение размеров и целостности. Таким образом, выдержавшим испытания, считается образец, который по окончании испытаний соответствует размерам заданным ТЗ, не имеет на поверхности дефектов или следов разрушения, определяемых визуально (трещины, каверны, сколы и т.д.).

Средства испытаний

Средства испытаний состоят из 4-х блоков, некоторые из которых могут находиться в нескольких блоках одновременно. Первый — подтверждение размеров образца: штангенциркуль, весы лабораторные. Второй — подготовка образцов: сушильный шкаф, весы лабораторные. Третий — оценка пористости: ареометр, термометр, устройство для гидростатического взвешивания, эксикатор, насыщающая жидкость: питьевая вода комнатной температуры или соответствующая органическая жидкость для материалов, взаимодействующих с водой, секундомер. Четвёртый — испытание термической стойкости: печь электрическая, с автоматическим регулированием температуры. А также вспомогательный лабораторный инвентарь.

Порядок проведения испытаний соответствует номеру блока.

Методы испытаний

Процесс испытаний является стандартизированным и соответствует гостам:

1. Проверка по пункту 4.1.1 Программы выполняется в соответствии с ГОСТ 473.4-81;
2. Проверка по п. 4.1.2 Программы выполняется в соответствии с ГОСТ 473.5-81;
3. Проверка по пункту 4.1.3 Программы выполняется в соответствии с ГОСТ 26433.1-89.

Образцом, выдержавшим испытания, считается образец, который по окончании испытаний соответствует размерам заданным ТЗ, не имеет на поверхности дефектов или следов разрушения, определяемых визуально (трещины, каверны, сколы и т.д.).

Разработанная программа и методики проведения испытаний пробной партии заготовок пластина (КМ.02П.2017.ПМ) в полном объеме соответствует требованиям п.6.1.8 (второе упоминание в ТЗ) технического задания ПНИЭР. Программа позволяет оценить полученные результаты и скорректировать дальнейшее направление ПНИЭР, входит в состав отчётной документации по этапу.

6. Проведение модернизации аддитивной установки

Работа проведена в соответствии с требованиями, разработанной конструкторской документации на модернизацию аддитивной установки.

Модернизация аддитивной установки УрАМ-150D для сплавления на ней керамических порошковых материалов, проводится путем демонтажа модернизируемых узлов, изготовления (приобретения) и монтажа следующих новых основных узлов:

- Механизм дозирования УрАМ-150.007.000.000

Полностью меняется конструкция механизма дозирования для равномерного нанесения слоя керамического порошкового материала, при разработке узла дозирования применено новое научно-техническое решение, оформленное в заявке полезной модели №2017146290 от 27.12.2017г.:

- Изменен корпус, материал корпуса заменен с алюминия на нержавеющей сталь, т.к. алюминий вступал в реакцию с оксидом циркония и на поверхности образовывалась оксидная пленка, что приводило к поломке узла. Нержавеющая сталь инертна к оксиду циркония.
- Изменена конструкция корпуса. Корпус выполнен литым, неразборным для установки в нем Вала дозатора Поз. 1 УрАМ-150.007.000.000СБ с подшипниками Поз. 15 УрАМ-150.007.000.000СБ для обеспечения центрирования конструкции.
- Изменен вал дозатора. Вал выполнен из нержавеющей стали в котором вырезаны 6 продольных пазов, для установки в них силиконовых профилей Поз. 3, тем самым образуя 6 рабочих емкостей для дозирования порошка. Силиконовый профиль плотно прилегает к стенкам отверстия корпуса дозатора, что исключает просыпание керамического порошка.
- Добавлен кронштейн Поз. 2 УрАМ-150.007.000.000СБ в котором установлен датчик и втулка Поз. 12 УрАМ-150.007.000.000СБ в которой установлены ответные части датчика, для отслеживания угла поворота вала дозатора чтобы точно определить величину дозирования порошка для формирования одного слоя.
- Изменен кожух, с добавлением дополнительного датчика для отслеживания поворота вала дозатора появилась необходимость вывода дополнительного кабеля. Необходимо было в конструкции кожуха изменить положение выходного отверстия.
- Изменена конструкция ножа УрАМ-150.008.040. В пластине Поз. 1 вырезан паз для установки в нем съемных лезвий, а также силиконовых профилей.

- Крышка бункера дозатора УрАМ-150.007.210

Кардинально изменена конструкция:

- Изменен материал крышки с Полиамида на Нержавеющую сталь для более плотного прилегания к бункеру дозатора и лучшей герметизации.
- Добавлен рукав для соединения элементов, для вывода окна загрузки на крышу рабочего модуля.
- Для удобства при чистке, детали выполнены съемными.
- Дверка рабочей камеры УрАМ-150.009.100

Кардинально изменена конструкция:

- Дверка выполнена отдельно от декоративной;
- Для большей герметичности добавлено 3 эксцентриковых зажима Поз. 11;
- Для визуальной регистрации за процессом, добавлено смотровое окно Поз. 2;
- Петли установлены на лицевой панели рабочей камеры Поз. 3.
- Механизм перемещения стола УрАМ-150.010.000.000

Конструкция изменена:

- Добавлены направляющие Поз. 63, для более точного позиционирования стола;
- Конструкция усилена;
- Изменено устройство теплоизоляции рабочего стола. Для изготовлений деталей из керамических порошков необходимо было увеличить температуру нагрева стола для этого необходимо было разработать жаростойкий узел теплоизоляции. При разработке узла рабочего стола применено новое научно-техническое решение, оформленное в заявке полезной модели №2017146288 от 27.12.2017г
- Изменен корпус.

По завершению работы оформлен акт модернизации аддитивной установки от 17 октября 2017 г. № 1

Работа выполнена в полном объеме в соответствии с требованиями эскизной конструкторской документацией на модернизацию аддитивной установки по п.6.1.9 «Эскизная конструкторская документация на модернизацию аддитивной установки в составе:

- чертеж общего вида;
- монтажный чертеж;
- схема структурная;
- чертежи деталей;
- ведомость покупных.»

технического задания на выполнение ПНИЭР.

7. Изготовление пробной партии заготовок «пластина»

Исходя из литературного обзора, а также экспериментальной работы, проводимой на первом этапе ПНИЭР были определены следующие значения параметров процесса селективного лазерного сплавления:

- заполнение камеры - аргон,
- мощность лазера (рабочая) - 200 Вт,
- диаметр лазерного пятна - 200 мкм,
- стратегия штриховки - параллельная с обратным ходом, четырёхкратное прохождение границ, четырёхкратное прохождение по поверхности, нет смены направления на следующем слое,
- расстояние между центрами дорожек - 250 мкм,
- толщина слоя - первый слой - 175 мкм; последующие слои - 120 мкм,
- скорость сканирования - 150 мм/сек,
- температура подогрева рабочего стола – 150 градусов.

Производство образцов осуществляется методом селективного лазерного сплавления (СЛС) — послойная реализация объёмных объектов путём последовательного сканирования лазерным излучением тонких (20-100 мкм) плёнок металлического, мелкодисперсного, сферодизированного порошка, преобразуя определенную его часть в геометрию сечения производимого объекта.

Работа выполняется на модернизированной аддитивной установке УрАМ-150D. Установка имеет в качестве источника лазерного излучения Nd: YAG-лазер с максимальной выходной мощностью 300 Вт, фокусированным пятном 50-200 мкм. Для нанесения порошка использовался металлический нож.

Производство пробной партии заготовок «пластина» состоит из следующих этапов.

Выбор порошкового сырья

Состав порошка был определён на этапе №1: $Al_2O_3(42\%)$ $ZrO_2(53,8\%)$ $Y_2O_3(4,2\%)$. Вид частиц порошка приведен на рисунке 1. Для получения изображения использовался электронный микроскоп ЦКП «Современные нанотехнологии».

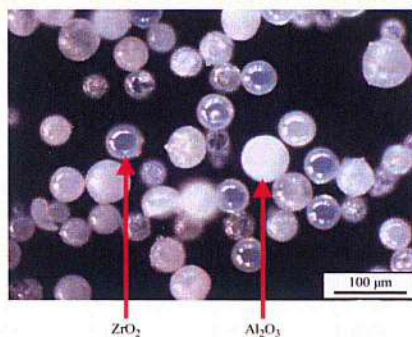


Рис.1

Проектирование образца «пластина»

Образцы, согласно п. 4.3.3 ТЗ, являются параллелепипедами и имеют габариты 50x50x5мм. Проектирование осуществляется с помощью САПР и в результате мы получаем цифровую трехмерную модель образца «пластина» рисунок 2.

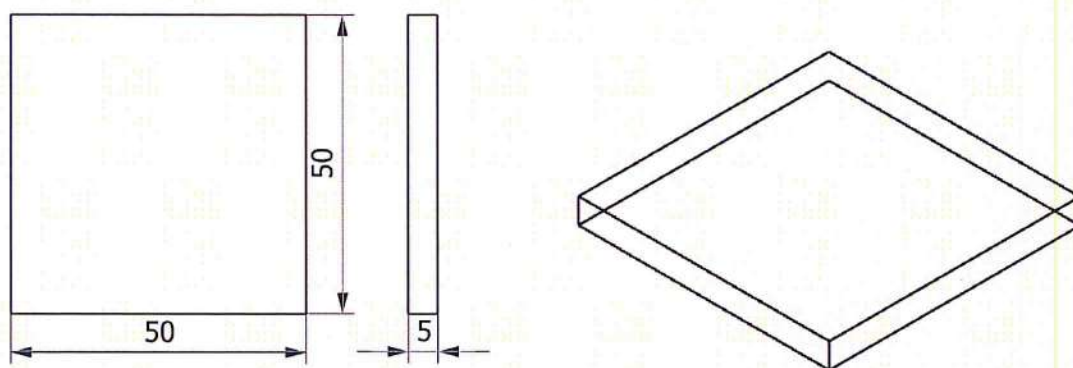


Рис.2

Расположение образцов на платформе построения изображено на рисунке 3.

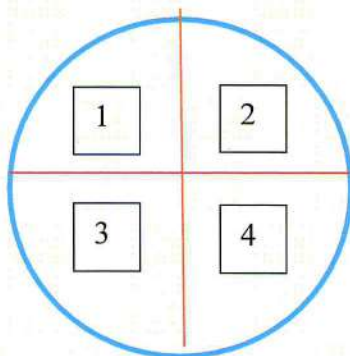


Рис. 3

После определения расположения изделий, они делятся на сечения в соответствии с выбранным режимом и стратегией сканирования.

Выбор режимов лазерного сканирования

На этапе №1 ПНИЭР были определены рамки оптимальных режимов сканирования. Вследствие этого, для производства пробной партии заготовок «пластина» использовались следующие режимы:

Скорость сканирования	200 - 400 мм/с
Мощность сканирования	240-285 Вт (шаг 15 Вт)
Толщина слоя	500 мкм
Диаметр фокусного пятна	100мкм

Выбор стратегии лазерного сканирования

Стратегия сканирования также использует за основу результаты этапа №1 ПНИЭР. Образец формируется путём штрихования сегментов сечения шириной 5 мм, как показано на рисунке 4.

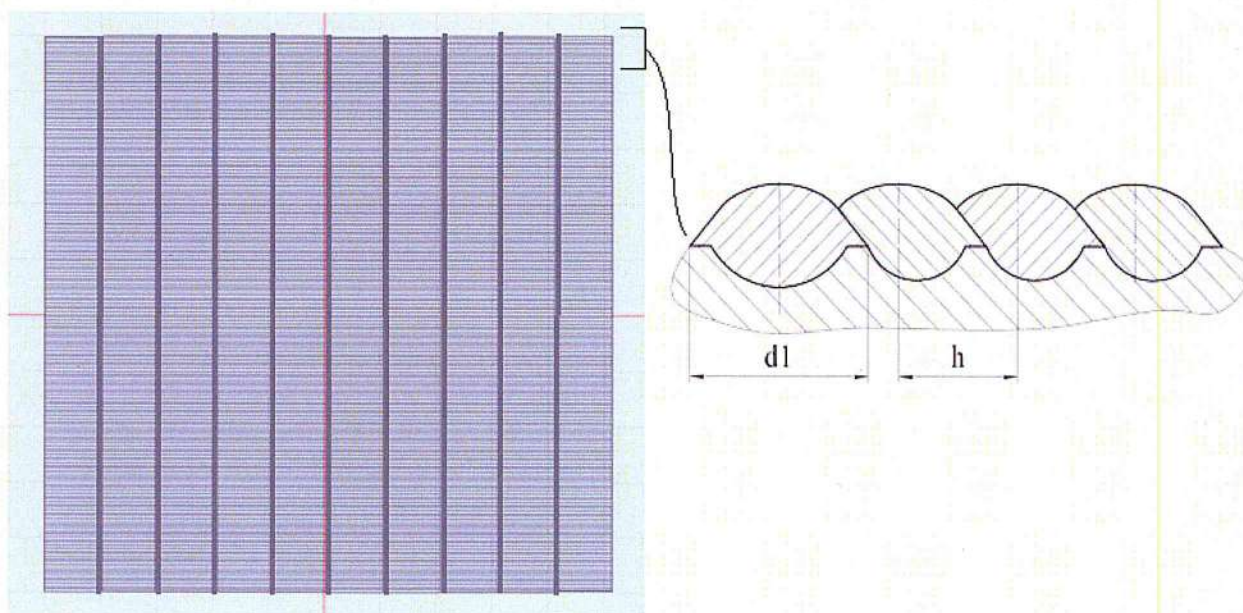


Рис. 4

В разных партиях образцов варьировалось расстояние между треками сканирования высотой от 70 до 150 мкм.

Включение оборудования и программ управления

Включение УрАМ-150D происходит по следующим стадиям:

1. Включение питания.
2. Чистка и обезжиривание поверхностей камеры построения (рисунок 5).

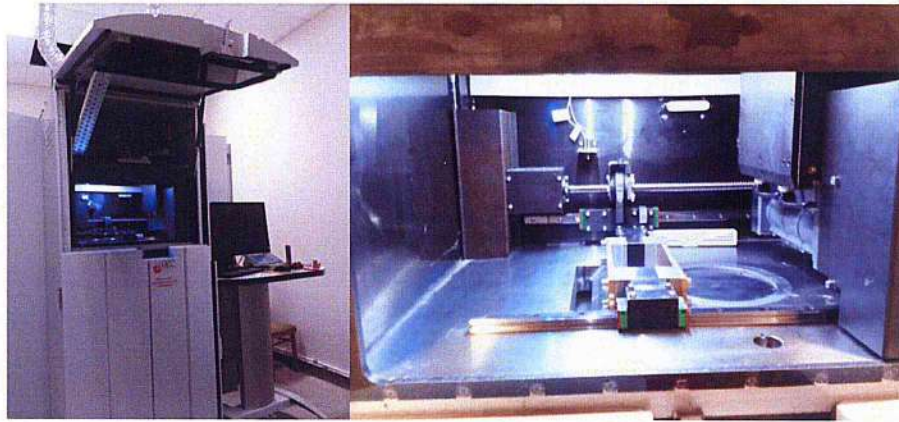


Рис. 5

3. Проверка подвижности механизма выравнивающего ножа (рисунок 6)



Рис. 6

4. Включение лазерной системы и управляющего компьютера, убедиться, что они связаны (рисунок 7)

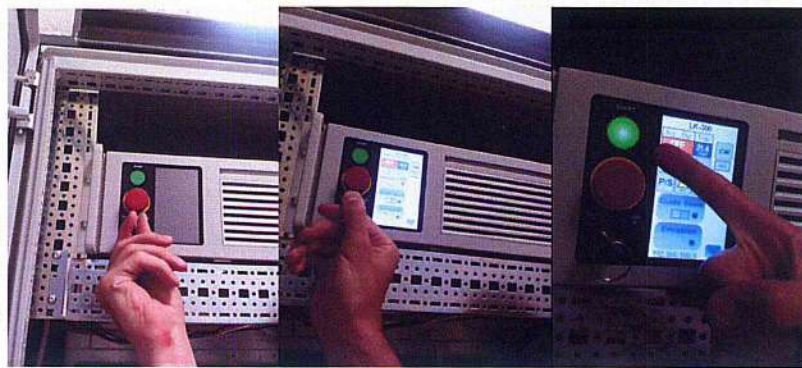


Рис. 7

5. Включение системы управления состоянием УрАМ-150D (рисунок 8)



Рис. 8

6. Включение оборудования температурного баланса агрегатов (рисунок 9)

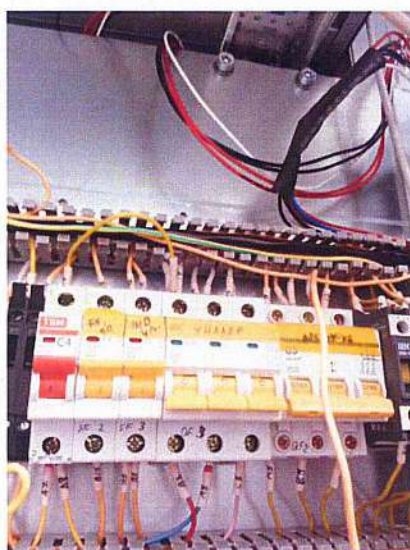


Рис. 9

7. На управляющем компьютере включить видеоконтроль рабочего объёма камеры построения.

Установка и калибровка (юстировка) платформы построения

Установка и юстировка происходит по следующим этапам:

1. Термопара нагревателя помещается в углубления платформы построения
2. Закручиваются крепёжные и регулировочные болты
3. Нож в положение «В исх»
4. Устанавливаем платформу (рисунок 10)

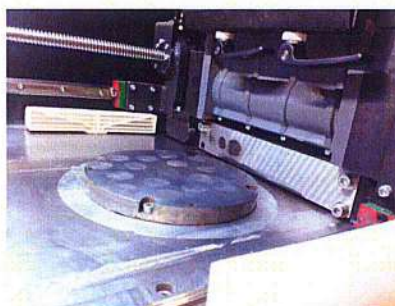


Рис. 10

5. Устанавливаем щупы толщиной 100 мкм и опускаем платформу до выравнивания с общей поверхностью (рисунок 11)

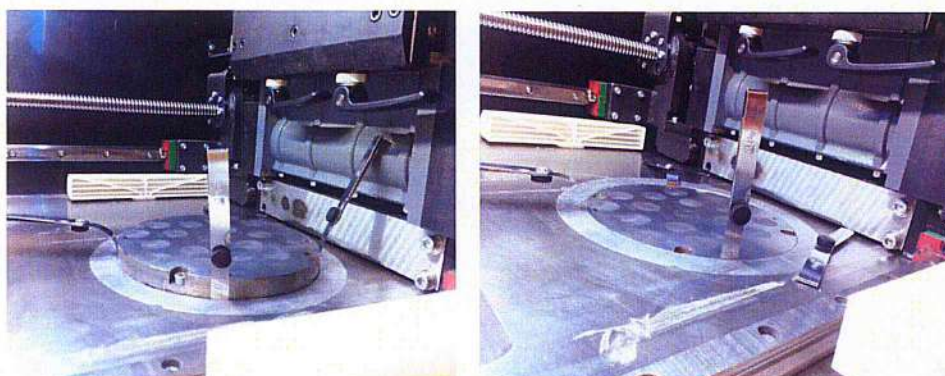


Рис. 11

6. Выставляем «0» платформы построения, путём настройки регулировочными винтами, результат проверяем лекальной линейкой и щупами 100 мкм (рисунок 12)

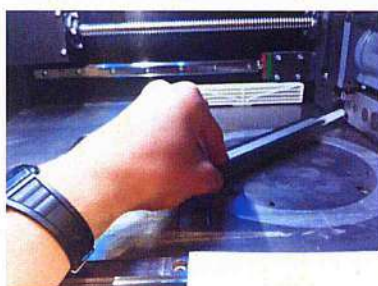


Рис. 12

7. Опускаем платформу на 3 слоя (рисунок 13)



Рис.13

8. Выставляем механизм ножа в центральное положение, не затягивая винтами, закрепляем ножи

9. Поднимаем платформу до толщины одного слоя
10. Проверяем щупами расстояние между платформой построения и выравнивающим ножом, передвигая механизм нанесения порошка над платформой
11. Затягиваем крепление ножа

Нанесение слоя

Колбу с порошком интенсивно встряхиваем и загружаем в механизм нанесения. Не закрывая камеру наносим 1 слой порошка (рисунок 14)

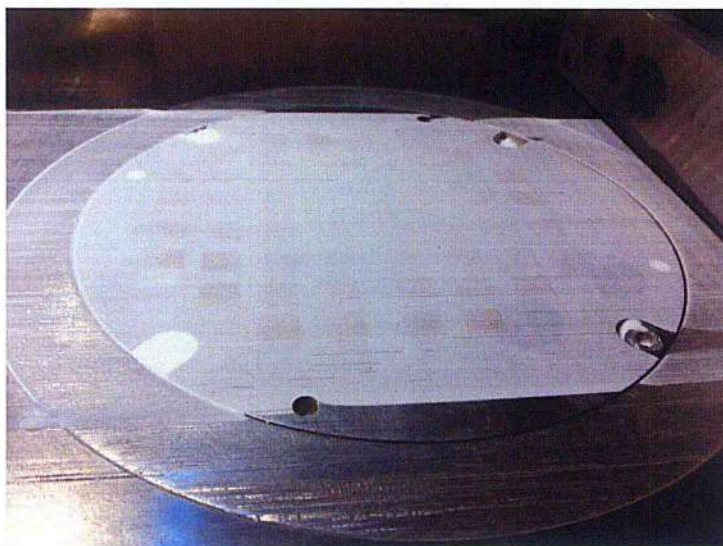


Рис. 14

Если визуальных дефектов нет — камера построения закрывается для дальнейшей подготовки.

Подготовка камеры

В подготовку камеры входит: создание инертной атмосферы и подогрев стола. Подготовка происходит по следующим этапам:

1. Нагрев платформы (включение нагревательного элемента и датчика отслеживания температуры) (рисунок 15)



Рис. 15

2. Установление давления в системе подачи азота до 0,6 МПа (рисунок 16)



Рис. 16

3. Открытие каналов камеры построения (рисунок 17)

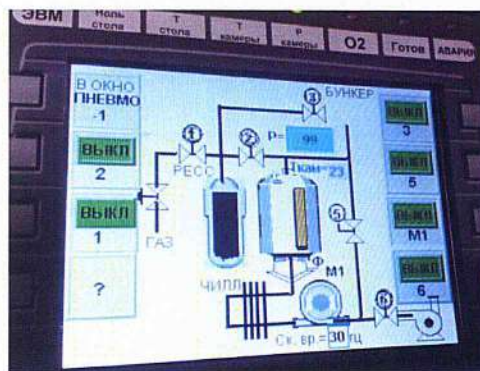


Рис. 17

4. Для начала работы лазера содержание кислорода в камере должно составлять не более 300 ед. (рисунок 18)



Рис. 18

Загрузка стратегии построения и Проверка обратной связи оборудования

1. Включение ПО управления лазерной системой
2. Проверка обратной связи и положения фокусного пятна (рисунок 19)

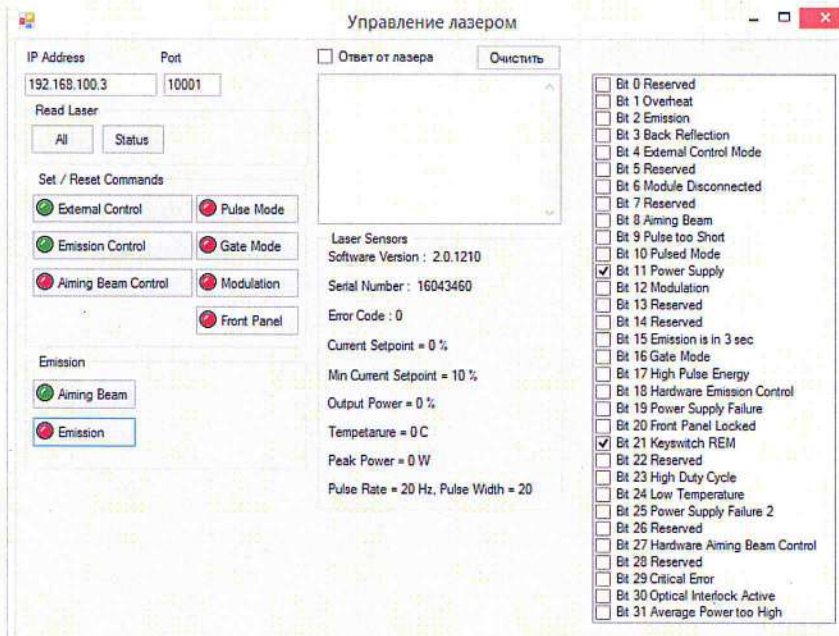


Рис. 19

Установка связи с программой построения (рисунок 20)



Рис. 20

Запуск процесса

После успешного выполнения предыдущих стадий осуществляется запуск. Сплавление первого сечения изделия осуществляется путём сканирования первого слоя порошка, нанесённого вручную. Последующие слои наносятся автоматически, до тех пор, пока все сечения детали не будут выполнены.

Задача оператора - отслеживать показания датчиков температуры и кислорода, а также визуально наблюдать за процессом через видеочкамеру наблюдения, изображение процесса на рисунке 21



Рис. 21

Работа выполнена в полном объеме в соответствии с требованиями п.4.3.3 технического задания на выполнение ПНИЭР. Изготовлены 15 штук заготовок «пластина», оформлен акт №3 от 11.12.2017г.

8. Проведение испытаний пробной партии заготовок «пластина», анализ полученных результатов

Работа проведена в соответствии с требованиями разработанной программой и методикой проведения испытаний пробной партии заготовок «пластина» КМ.02П.2017.ПМ. Испытания проводились на партии заготовок «пластина» в количестве 15 штук. В процессе испытаний были определены характеристики заготовок в части геометрических размеров, пористости и стойкости к циклам изменения температуры.

Испытания проводились последовательно в четыре этапа:

Первый — подтверждение размеров образца, при этом использовались следующие инструменты: штангенциркуль, весы лабораторные.

Второй — подготовка образцов с помощью сушильного шкафа и весы лабораторные.

Третий — оценка пористости, при этом использовали ареометр, термометр, устройство для гидростатического взвешивания, эксикатор, насыщающая жидкость: питьевая вода комнатной температуры или соответствующая органическая жидкость для материалов, взаимодействующих с водой, секундомер.

Четвёртый — испытание термической стойкости с помощью печи с автоматическим регулированием температуры. А также вспомогательный лабораторный инвентарь.

Методы испытаний

Процесс испытаний является стандартизированным и соответствует:

4. Проверка по пункту 4.1.1 Программы выполняется в соответствии с ГОСТ 473.4-81;
5. Проверка по п. 4.1.2 Программы выполняется в соответствии с ГОСТ 473.5-81;
6. Проверка по пункту 4.1.3 Программы выполняется в соответствии с ГОСТ 26433.1-89.

Образцом, выдержавшим испытания, считается образец, который по окончании испытаний соответствует размерам заданным ТЗ, не имеет на поверхности дефектов или следов разрушения, определяемых визуально (трещины, каверны, сколы и т.д.). Проводя анализ полученных результатов можно сделать вывод, что все 15 объектов исследования выдержали проводимые испытания, режимы сплавления керамического порошкового материала подобраны корректно.

Выводы по разделу:

Работа выполнена в полном объеме в соответствии с перечнем научных и научно-технических результатов по п. 2.11 технического задания на выполнение ПНИЭР.

9. Наладка модернизированной аддитивной установки и ПО

Работа проведена в соответствии с требованиями разработанной эскизной конструкторской документации на модернизацию аддитивной установки.

1) Установка дверки рабочей камеры чтд. УрАМ-150.009.100 проведена в следующем порядке:

- сборка узла;
- сверление отверстий в передней панели рабочей камеры;
- сверление отверстий в столешнице для установки кронштейна;
- установка кронштейна для закрепления дверки рабочей камеры эксцентриковым зажимом;
- юстировка дверки относительно передней панели рабочей камеры для обеспечения плотного прилегания и обеспечение герметичности соответственно.

2) Установка механизма дозирования чтд. УрАМ-150.007.000.000:

- сборка узла;
- установка дополнительного датчика обратной связи для точного поворота вала на заданный угол для обеспечения точного дозирования керамического порошка в зону сплавления;
- прокладка кабелей;
- установка разъемов;
- юстировка вала дозатора относительно корпуса дозатора до плотного прилегания силиконовых профилей к корпусу;
- установка кожуха;
- внесение исправлений в ПО для отслеживания и контроля угла поворота вала дозатора;

3) Установка крышки бункера дозатора чтд. УрАМ-150.009.210 проведена в следующем порядке:

- сборка узла;
- установка крышки на бункер дозатора;
- сверление отверстий в крыше рабочего модуля;
- установка ответной части крышки бункера дозатора в крыше рабочего модуля;

- установка соединительного рукава;
- юстировка узла для полного прилегания крышки бункера дозатора для обеспечения герметизации.

4) Установка механизма перемещения стола чтд. УрАМ-150.010.000.000:

- демонтаж заменяемого узла;
- сборка нового узла;
- установка механизма перемещения стола;
- установка уплотнения стола;
- установка и подключение датчиков контроля температуры;
- установка и подключение нагревателя;
- юстировка механизма до обеспечения погрешности не более 2 мкм;
- внесение исправлений в ПО для обеспечения перемещения рабочего стола на величину в 15 мкм;
- внесение исправлений в ПО для контроля температуры рабочего стола;
- внесение исправлений в ПО для регулирования мощности нагревателя.

Выводы по разделу:

Работа выполнена в полном объеме в соответствии с эскизно-конструкторской документацией на модернизацию аддитивной установки и программной документацией.

10. Изготовление партии заготовок «пластина» (не менее 100 шт.) для испытаний модернизированной аддитивной установки на вариативность

Исходя из литературного обзора, а также экспериментальной работы, проводимой на первом этапе ПНИЭР, были определены следующие значения параметров процесса селективного лазерного сплавления:

- заполнение камеры - аргон,
- мощность лазера (рабочая) - 200 Вт,
- диаметр лазерного пятна - 200 мкм,
- стратегия штриховки - параллельная с обратным ходом, четырёхкратное прохождение границ, четырёхкратное прохождение по поверхности, нет смены направления на следующем слое,
- расстояние между центрами дорожек - 250 мкм,
- толщина слоя - первый слой - 175 мкм; последующие слои - 120 мкм,
- скорость сканирования - 150 мм/сек,
- температура подогрева рабочего стола – 150 градусов.

Производство образцов осуществляется методом селективного лазерного сплавления (СЛС) — послойная реализация объёмных объектов, путём последовательного сканирования лазерным излучением тонких (20-100 мкм) плёнок керамического, мелкодисперсного, сферодизированного порошка, преобразуя определенную его часть в геометрию сечения производимого объекта.

Работа выполняется на модернизированной аддитивной установке УрАМ-150D. Установка имеет в качестве источника лазерного излучения Nd: YAG-лазер с максимальной выходной мощностью 300 Вт, фокусировочным пятном 50-200 мкм. Для нанесения порошка использовался металлический нож.

Производство пробной партии заготовок «пластина» состоит из следующих этапов.

Выбор порошкового сырья

Состав порошка был определён на этапе №1: $\text{Al}_2\text{O}_3(42\%)$ $\text{ZrO}_2(53,8\%)$ $\text{Y}_2\text{O}_3(4,2\%)$. Вид частиц порошка приведен на рисунке 22. Для получения изображения использовался электронный микроскоп ЦКП «Современные нанотехнологии».

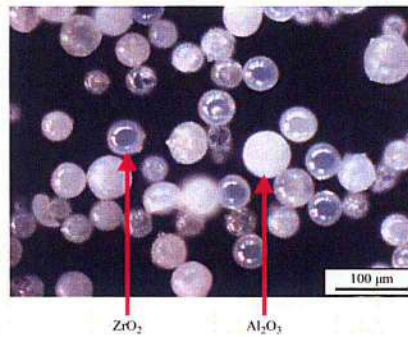


Рис.22

Проектирование образца «пластина»

Образцы, согласно п. 4.3.4 ТЗ, являются параллелепипедами и имеют габариты 50x50x5мм. Проектирование осуществляется с помощью САПР и в результате мы получаем цифровую трехмерную модель образца «пластина» рисунок 23.

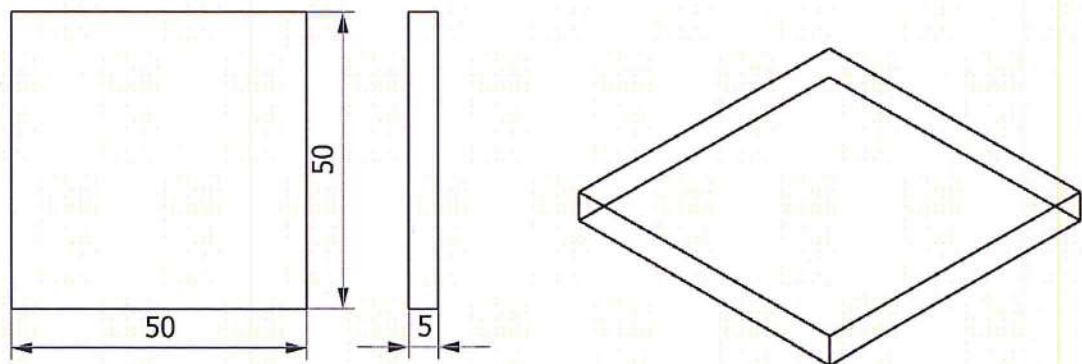


Рис.23

Расположение образцов на платформе построения изображено на рисунке 3.

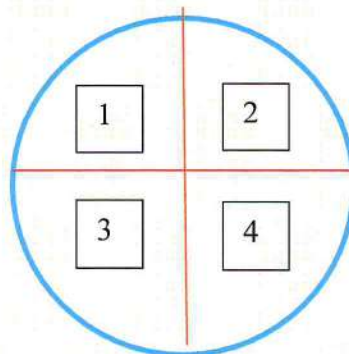


Рис. 24

После определения расположения изделий, они делятся на сечения в соответствии с выбранным режимом и стратегией сканирования.

Выбор режимов лазерного сканирования

На этапе №1 ПНИЭР были определены рамки оптимальных режимов сканирования. Вследствие этого, для производства пробной партии заготовок «пластина», использовались следующие режимы:

Скорость сканирования -	200 - 400 мм/с
Мощность сканирования-	240-285 Вт (шаг 15 Вт)
Толщина слоя -	500 мкм
Диаметр фокусного пятна -	100мкм

Выбор стратегии лазерного сканирования

Стратегия сканирования также использует за основу результаты этапа №1 ПНИЭР. Образец формируется путём штрихования сегментов сечения шириной 5 мм, как показано на рисунке 25.

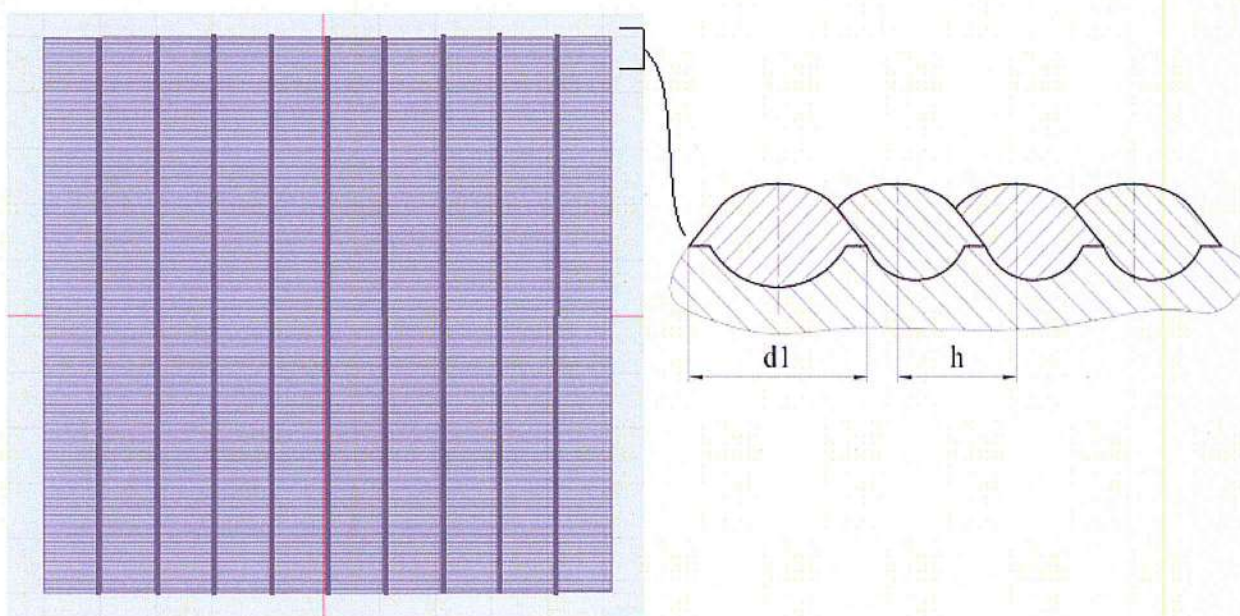


Рис. 25

В разных партиях образцов варьировалось расстояние между треками сканирования высотой от 70 до 150 мкм.

Включение оборудования и программ управления

Включение УрАМ-150Д происходит по следующим стадиям:

1. Включение питания.
2. Чистка и обезжиривание поверхностей камеры построения (рисунок 26).

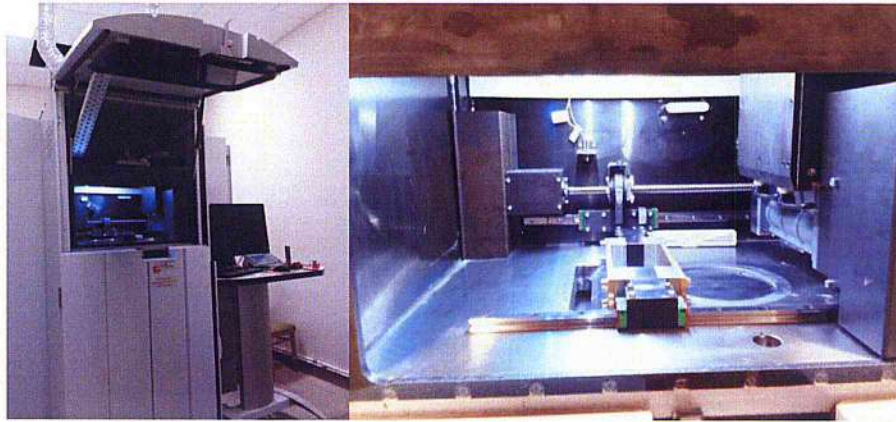


Рис. 26

3. Проверка подвижности механизма выравнивающего ножа (рисунок 27)

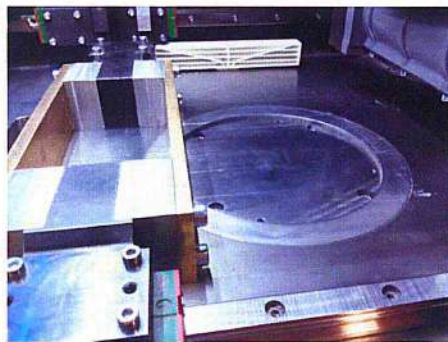


Рис. 27

4. Включение лазерной системы и управляющего компьютера, убедиться, что они связаны (рисунок 28)

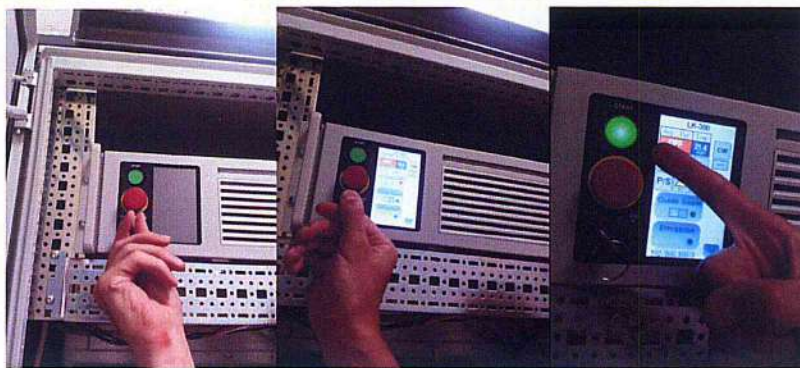


Рис. 28

5. Включение системы управления состоянием УрАМ-150D (рисунок 29)

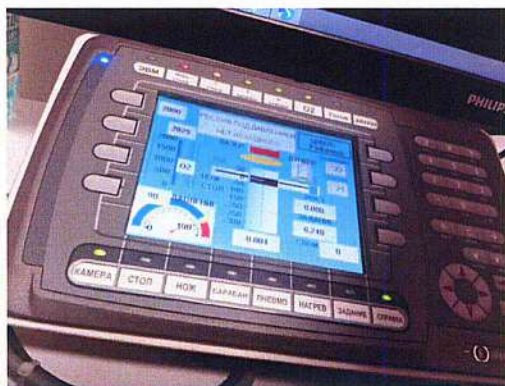


Рис. 29

6. Включение оборудования температурного баланса агрегатов (рисунок 30)

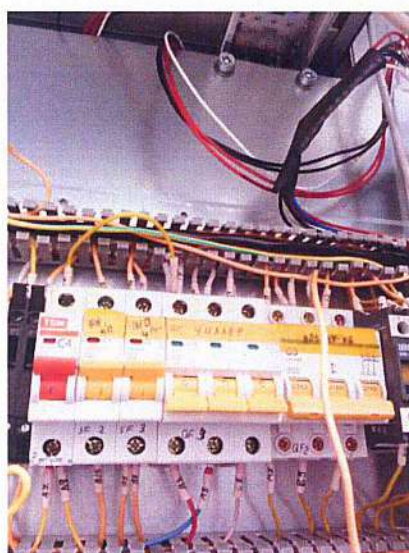


Рис. 30

7. На управляющем компьютере включить видеоконтроль рабочего объёма камеры построения.

Установка и калибровка (юстировка) платформы построения

Установка и юстировка происходит по следующим этапам:

1. Термопара нагревателя помещается в углубления платформы построения
2. Закручиваются крепёжные и регулировочные болты
3. Нож в положение «В исх»
4. Устанавливаем платформу (рисунок 31)



Рис. 31

5. Устанавливаем щупы толщиной 100 мкм и опускаем платформу до выравнивания с общей поверхностью (рисунок 32)

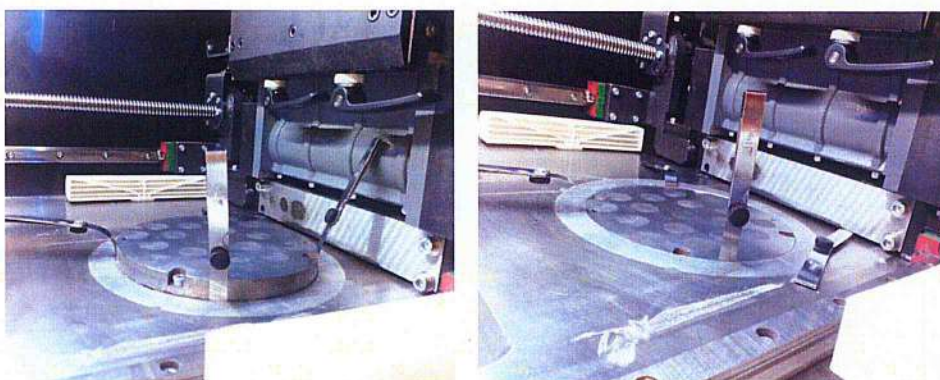


Рис. 32

6. Выставляем «0» нулевое положение платформы построения, путём настройки регулировочными винтами, результат проверяем лекальной линейкой и щупами 100 мкм (рисунок 33)

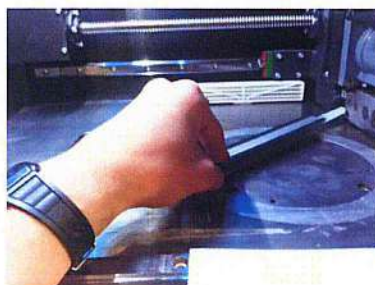


Рис. 33

7. Опускаем платформу на 3 слоя (рисунок 34)



Рис.34

8. Выставляем механизм ножа в центральное положение, не затягивая винтами, закрепляем ножи

9. Поднимаем платформу до толщины одного слоя

10. Проверяем щупами расстояние между платформой построения и выравнивающим ножом, передвигая механизм нанесения порошка над платформой

11. Затягиваем крепление ножа

Нанесение слоя

Колбу с порошком интенсивно встряхиваем и загружаем в механизм нанесения. Не закрывая камеру, наносим 1 слой порошка (рисунок 35)

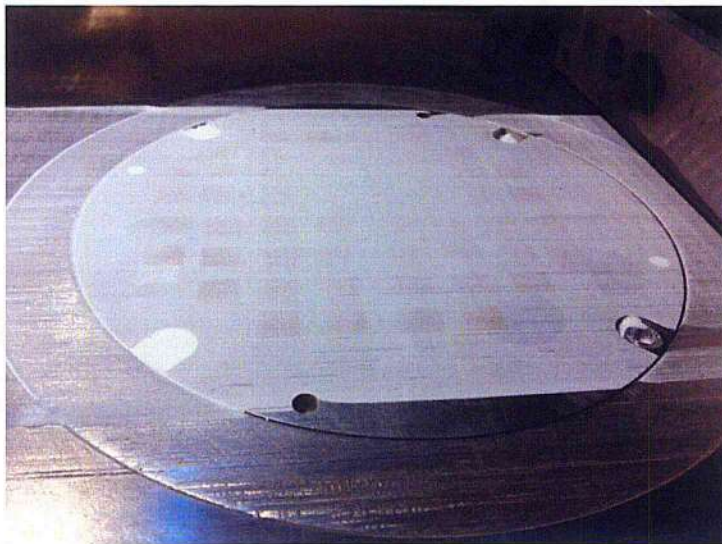


Рис. 35

Если визуальных дефектов нет — камера построения закрывается для дальнейшей подготовки.

Подготовка камеры

Подготовка камеры состоит из следующих операций: создание инертной атмосферы и подогрев стола:

1. Нагрев платформы (включение нагревательного элемента и датчика отслеживания температуры) (рисунок 36)

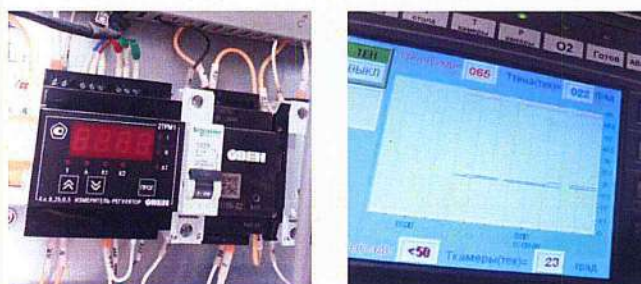


Рис. 36

2. Установление давления в системе подачи азота до 0,6 МПа (рисунок 37)



Рис. 37

3.Открытие каналов камеры построения (рисунок 38)

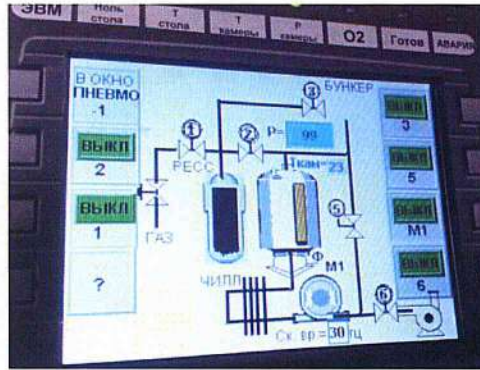


Рис. 38

4. Для начала работы лазера содержание кислорода в камере должно составлять не более 300 ед. (рисунок 39)



Рис. 39

Загрузка стратегии и Проверка обратной связи оборудования

1. Включение ПО управления лазерной системой
2. Проверка обратной связи и положения фокусного пятна (рисунок 40)

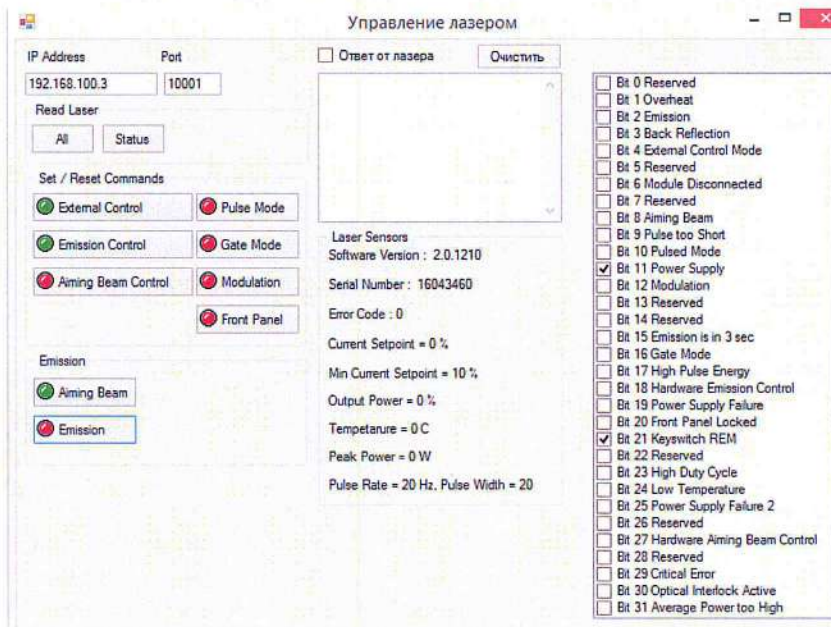


Рис. 40

Установка связи с программой построения (рисунок 41)



Рис. 41

Запуск процесса

После успешного выполнения указанных стадий осуществляется запуск. Сплавление первого сечения изделия осуществляется путём сканирования первого слоя порошка, нанесённого вручную. Последующие слои наносятся автоматически, до тех пор, пока все сечения детали не будут выполнены.

Задача оператора отслеживать показания датчиков температуры и кислорода, а также визуально наблюдать за процессом через видеокамеру наблюдения, изображение процесса на рисунке 42

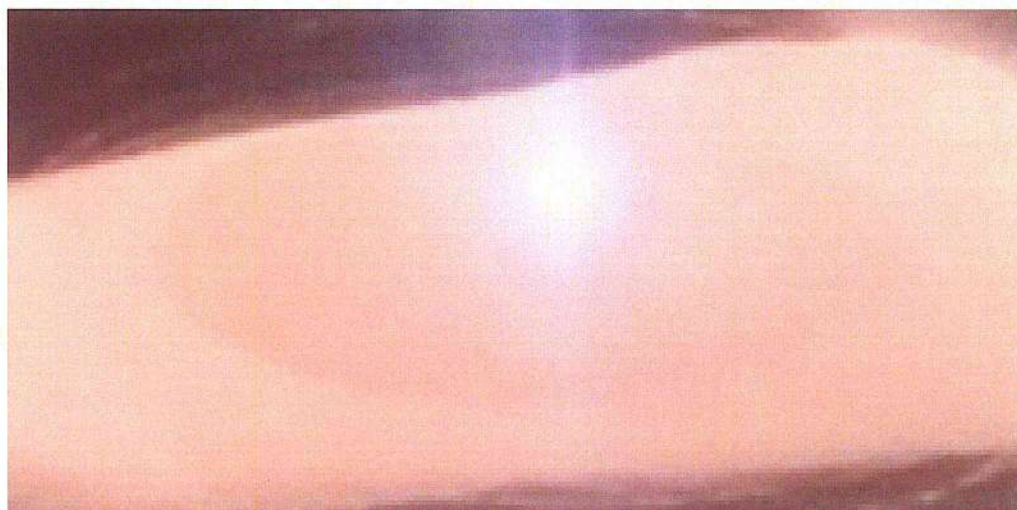


Рис. 42

Изготовленные заготовки «пластина» приведены на рисунке 43.



Рис. 43

Работа выполнена в полном объеме в соответствии с требованиями п.2.12.1 технического задания на выполнение ПНИЭР. Количество изготовленных заготовок «пластина» 100 штук в соответствии с актом №4 от 28.12.2017г.

11. Составление промежуточного отчёта по этапу

Работа по составлению Отчета представляет собой сложный организационный процесс. Были задействованы все специалисты-исполнители. Наибольшую сложность при составлении Отчета представляет разнообразие нормативных материалов, отсутствие методологического опыта в оформлении Отчета, а также большое количество обрабатываемой информации и коммуникаций в процессе составления Отчета.

Непосредственное руководство составлением Отчета осуществлял Руководитель проекта, Директор ИВЦ «Региональный инжиниринговый центр» УрФУ (ИВЦ УрФУ «РИЦ»), кандидат технических наук Фефелов Алексей Сергеевич распределяя обязанности между членами команды. Организовал выполнение работ по второму этапу ПНИЭР, а также составление промежуточного отчета.

Ответственные исполнители, отвечающие за конкретные этапы работ, представляли данные о проведенных исследованиях и результатах работ, которые объединялись начальником отдела аддитивных технологий ИВЦ УрФУ «РИЦ» Меркушевым Алексеем Геннадьевичем в единый документ, составляющий промежуточный отчет.

Формирование отчетной документации осуществлялось в несколько этапов, в соответствии с Планом-графиком, на протяжении всего периода выполнения работ.

Отчет предоставлен в установленный срок. Работа проведена в соответствии с требованиями технического задания и плана-графика выполнения работ по ПНИЭР.

Работы выполнены в полном объеме в соответствии с требованиями п.6.1.2. Технического задания на ПНИЭР.

12. Изготовление модифицированного порошкового керамического материала для изготовления пробной партии заготовок «пластина» и для изготовления партии заготовок «пластина», предназначенной для проведения испытаний на вариативность

Новым решением по сравнению с ранее проведенными разработками являются объективные преимущества композиции оксида циркония с высокомодульной модифицирующей добавкой. Это позволяет получать наиболее приемлемые результаты в процессе послойного спекания модифицированных порошковых керамических материалов. Состав композиции следующего состава: ZrO_2 с добавкой 42 об.% Al_2O_3 .

Согласно классическому закону упаковки сферических частиц, добавка модифицирующего компонента в пределах 23-42 об.% может привести к созданию непрерывного кластера из частиц модификатора, таким образом будет получен максимальный регистрируемый эффект изменения свойств в керамических образцах. В качестве высокомодульной модифицирующей добавки, для уверенного создания непрерывного кластера в керамическом образце ZrO_2 , на основе данных раздела 1 отчета первого этапа ПНИЭР, был выбран оксид алюминия.

Механизм передачи механического воздействия при характерных разрушениях для керамических материалов (растрескивание) имеет подобный принцип, что и для низкомодульного модифицирования. Распространяющаяся трещина в матричном компоненте материала в некоторый момент попадет в область частицы-модификатора (частица с более высоким значением модуля упругости). Дальнейшее ее развитие (трещины) зависит от нескольких факторов внутреннего взаимодействия порошка модификатора с матричным компонентом: адгезионные свойства между матрицей и модификатором, наличие дефектов в частице-модификаторе, температуры материала. Температура материала влияет косвенным образом, вектор влияния приходится на коэффициенты теплового расширения, как правило, различающиеся у материалов с разным модулем упругости.

Согласно Опытно-промышленного технологического регламента изготовлен состав с добавкой модификатора керамического порошка оксида алюминия в матрицу оксида циркония стабилизированного оксидом иттрия: ZrO_2 с добавкой 42 об.% Al_2O_3 .

Требования, предъявляемые к модифицированным порошковым материалам не отличаются от требований к микронным порошкам, крупность микронной фракции не должна превышать 60 мкм, а форма частиц должна быть максимально приближена к шарообразной (если это возможно). Дополнительно для модифицированных порошковых

материалов необходимо равномерное распределение, которое обеспечивается во время изготовления модифицированных порошков.

Аппаратурное оформление методов модифицирования включает в себя ультразвуковой генератор, стеклянные и металлические стаканы-емкости смешения, поддоны для просушки порошков после смешения. При необходимости ускорить процесс сушки порошков можно использовать сушильные шкафы. Необходимо обратить внимание, что при использовании сушильных шкафов не допускается использовать легко воспламеняющиеся жидкости.

Керамические порошковые материалы модифицировали согласно методике модифицирования порошковых керамических материалов.

Вывод по разделу:

За счёт привлечения собственных средств индустриальный партнер изготовил модифицированные керамические материалы для проведения работ по изготовлению пробной партии заготовок «пластина» и партии заготовок «пластина», предназначенной для проведения испытаний на вариативность, согласно акту изготовления модифицированных порошковых керамических материалов №10 от 07.12.2017г. Работы выполнены в полном объеме в соответствии с требованиями п.2.1 технического задания на выполнение ПНИЭР.

13. Разработка опытно-промышленной технологии изготовления модифицированных порошковых керамических материалов

Для изготовления модифицированного порошкового керамического материала с модифицирующей добавкой Al_2O_3 разработана опытно-промышленная технология изготовления.

Объектом опытно-промышленной технологии являются образцы смесей порошковых материалов Al_2O_3 ТУ 6-09-426-75 и ZrO_2 ГОСТ 21907-76.

Целью создания является получение модифицированного состава керамического порошка на основе оксида алюминия и диоксида циркония.

Место проведения работы - ОКБ «Новатор», отдел 41.

Принципиальная блок-схема опытно-промышленной технологии изготовления модифицированных порошковых керамических материалов выглядит следующим образом (рисунок 44): формирование навески модифицированного состава из чистого керамического порошка ZrO_2 и 42% порошка модификатора Al_2O_3 , независимые операции входного контроля, смешение порошковых материалов, послеоперационный контроль смеси, формирование готовой продукции.



Рис. 44

Входной контроль материалов

Входной контроль материалов проводить в соответствии с ГОСТ или ТУ на материалы.

При входном контроле порошковых материалов проверяется:

- насыпная плотность;
- влажность;
- гранулометрический состав.

Насыпная плотность порошковых материалов определяется по ГОСТ 27801-93.

Влажность порошков определяется по ГОСТ 2642.1-86. Влажность порошков не более 3 %.

Гранулометрический состав микропорошков определяется просеиванием через набор вибросит. Доля частиц размером 50 мкм должна быть не менее 90 %. Гранулометрический состав нанопорошков не проверяется.

Получение модифицированных порошков

В соответствии с таблицей 1 взять необходимую навеску компонентов.

Таблица 1 – Масса компонентов для модифицированного состава

№ п/п	Состав смеси	Масса основного компонента, г	Масса компонента модификатора, г	Масса смеси, г
1	ZrO ₂ +42 % Al ₂ O ₃	162,64	137,36	300

Поместить навеску основного компонента и компонента модификатора в ультразвуковую мешалку. Частота перемешивания 44 кГц, интенсивность выставить вручную до появления максимального эффекта кавитации (кипящего слоя) частиц, перемешивание производить в течении 10 минут с момента настройки.

После смешения готовую смесь просушить и взвесить. Смесь пересыпать в пластиковую банку и закрыть крышкой. На баночной бирке указать состав смеси из основного компонента и модификатора, их соотношение и вес смеси.

Очистить колбу смесителя сжатым воздухом.

Провести цикл операций для каждой смеси.

Послеоперационный контроль

При входном контроле порошковых материалов проверяется:

- насыпная плотность;
- влажность;

- гранулометрический состав;
- фазовый состав.

Насыпная плотность порошковых материалов определяется по ГОСТ 27801-93.

Влажность порошков определяется по ГОСТ 2642.1-86. Влажность порошков должна быть не более 3 %.

Гранулометрический состав микропорошков определяется просеиванием через набор вибросит. Доля частиц размером 50 мкм должна быть не менее 90 %. Фазовый состав композиции проверяется рентген фазометрическим методом.

Требования безопасности

Требования безопасности при проведении исследования согласно ГОСТ 12.2.007.9.

Вывод по разделу:

За счёт привлечения собственных средств индустриальный партнер разработал опытно-промышленный технологический регламент изготовления модифицированных порошковых керамических материалов КМ.03.2017.ОР. Работы выполнены в полном объеме в соответствии с требованиями 6.1.17 технического задания на выполнение ПНИЭР.

14. Разработка программы и методики испытания модернизированной аддитивной установки на вариативность (стабильность получения результатов).

Для проверки модернизированной аддитивной установки УрАМ-150D необходимо установить, что оборудование работает стабильно в процессе изготовления заготовок с высокой степенью повторяемости результатов и в соответствии с техническим заданием на модернизацию аддитивной установки. Так как именно этот параметр будет определяющим при изготовлении деталей с высокой серийностью.

Целью разработки программы и методики проведения испытаний модернизированной аддитивной установки на вариативность является проверка соответствия технических характеристик, изготовленных с помощью модернизированной аддитивной установки заготовок «пластина» требованиям, установленным к этим заготовкам в ТЗ.

В целях определения повторяемости результатов производства модернизированной аддитивной установки УрАМ-150D предполагается провести испытания изготовленных в процессе испытания модернизированной аддитивной установки УрАМ-150D на вариативность экспериментальные образцы заготовок «пластина» в количестве 100 штук. Эти экспериментальные образцы заготовок «пластина» должны соответствовать п. 4.3.4 ТЗ по габаритным размерам 50x50x5 мм с отклонением +0,5 мм.

Положительный результат испытаний подтвердит стабильность работы оборудования в течение производственного цикла по изготовлению партии заготовок.

Таким образом, разрабатываемая программа и методики проведения испытаний модернизированной аддитивной установки УрАМ-150D на вариативность (на стабильность) получения результатов должна состоять из следующих этапов:

Требования к подготовке объекта испытаний

Включение оборудования и программ управления:

- Включение питания
- Чистка и обезжиривание поверхностей камеры построения
- Проверка подвижности механизма выравнивающего ножа
- Включение лазерной системы и управляющего компьютера, убедиться, что они связаны
- Включение системы управления состоянием установки УрАМ-150D
- Включение оборудования температурного баланса агрегатов
- На управляющем компьютере включить видеоконтроль рабочего объема камеры построения.

Установка и калибровка (юстировка) платформы построения

Установка и юстировка происходит по следующим этапам:

- Термопара нагревателя помещается в углубления платформы построения
- Закручиваются крепёжные и регулировочные болты
- Нож в положение «В исх»
- Устанавливаем платформу
- Устанавливаем щупы толщиной 100 мкм и опускаем платформу до выравнивания с общей поверхностью
- Выставляем «0» платформы построения, путём настройки регулировочными винтами, результат проверяем лекальной линейкой и щупами 100 мкм
- Опускаем платформу на 3 слоя
- Выставляем механизм ножа в центральное положение, не затягивая винтами, закрепляем ножи
- Поднимаем платформу до толщины одного слоя
- Проверяем щупами расстояние между платформой построения и выравнивающим ножом, передвигая механизм нанесения порошка над платформой
- Затягиваем крепление ножа

Нанесение слоя

Колбу с порошком интенсивно встряхиваем и загружаем в механизм нанесения. Не закрывая камеру наносим 1 слой порошка. Если визуальных дефектов нет — камера построения закрывается, для дальнейшей подготовки.

Подготовка камеры

В подготовку камеры входит создание инертной атмосферы и подогрев стола и происходит по следующим этапам:

- Нагрев платформы (включение нагревательного элемента и датчика отслеживания температуры)
- Установление давления в системе подачи азота до 0,6 МПа
- Открытие каналов камеры построения
- Для начала работы лазера содержание кислорода в камере должно составлять не более 300 ед.

Загрузка стратегии и Проверка обратной связи оборудования

- Включение ПО управления лазерной системой
- Проверка обратной связи и положения фокусного пятна
- Установка связи с программой построения

Запуск процесса

После успешного выполнения прошлых стадий осуществляется запуск. Сплавление первого сечения изделия осуществляется путём сканирования первого слоя порошка, нанесённого вручную. Последующие слои наносятся автоматически, до тех пор, пока все сечения детали не будут выполнены.

Задача оператора отслеживать показания датчиков температуры и кислорода, а также визуально наблюдать за процессом через видеокамеру наблюдения.

Изготовленные в процессе испытания модернизированной аддитивной установки УрАМ-150D на вариативность экспериментальные образцы заготовок «пластина» в количестве 100 штук должны соответствовать п. 4.3.4 ТЗ по габаритным размерам 50x50x5мм с отклонением +0,5мм. Что покажет стабильность работы оборудования в течение производственного цикла по изготовлению партии заготовок.

Выводы по разделу:

За счет привлечения собственных средств индустриальный партнер разработал программу и методики испытаний модернизированной аддитивной установки на вариативность УрАМ-150.010.000.000ПМ. Работы выполнены в полном объеме в соответствии с требованиями п.2.12 технического задания на выполнение ПНИЭР.

15. Разработка лабораторных методик: определения структурных составляющих керамических порошковых материалов и модифицированных керамических порошковых материалов; определения оптимального значения оптических параметров источника лазерного излучения для сплавления керамических порошковых материалов

С целью определения основных структурных составляющих керамических порошковых материалов и модифицированных керамических порошковых материалов могут быть использованы следующие методы:

- 1) Определение кажущейся плотности (методом гидростатического взвешивания, при помощи аналитических весов);
- 2) Определение микротвердости (при помощи микротвердомера);
- 3) Определение предела прочности при трехточечном изгибе (при помощи разрывной машины);
- 4) Определение размеров зерен (при помощи оптического микроскопа);
- 5) Определение характера излома (при помощи оптического микроскопа).

В связи с прикладной составляющей данной работы основные структурные составляющие керамических порошковых материалов и модифицированных керамических порошковых материалов целесообразно определять с помощью наиболее распространенного оборудования.

Для этого были разработаны лабораторные методики, согласно которым возможно определение структурных составляющих керамических порошковых материалов и модифицированных керамических порошковых материалов.

Лабораторная методика определения структурных составляющих керамических порошковых материалов и модифицированных керамических материалов содержит проверку основных керамических свойств материалов, которые представляют интерес для исследования процессов послойного лазерного сплавления. Для выяснения равномерности и характера адгезии частиц послойного сплавления целесообразно проводить измерение микротвердости материала. Испытание на трехточечный изгиб один из традиционных методов исследования прочности керамических материалов, предназначенных для работы в качестве деталей. Также, испытание на трехточечный изгиб представляет полную картину характера распространения трещины в материале. В рамках оптических исследований пред-

ставляются целесообразными исследования по определению размеров зерен и определение характера излома.

В методике не приведена оценка параметра пористости, т.к. для керамических материалов более явным показателем является параметр кажущейся плотности (входит в состав лабораторной методики). На основании параметров кажущейся плотности, можно сделать косвенное заключение о пористости керамических порошковых материалов и модифицированных керамических материалов путем сравнения полученного параметра кажущейся плотности с расчетным параметром теоретической плотности керамических порошковых материалов и модифицированных керамических материалов.

Проверка фазового состава и кристаллической решетки не является целесообразной, т.к. работа носит не фундаментальный, а прикладной характер. С точки зрения процессов сплавления частиц между собой (учитывая состав шихты) можно предположить, что изменений фазового состава не происходит, в силу того, что процессы сплавления не сопровождаются химическими реакциями между компонентами, входящими в состав шихты.

Измерение микротвердости материала

Термины

Микротвердость (microhardness) – твердость отдельных фаз и структурных составляющих внутри отдельных зерен материала.

Суть метода

Испытание на микротвердость заключается в нанесении на испытываемую поверхность образца отпечатка под действием статической нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику в течение определенного времени.

Пробоподготовка

Поверхность исследуемого образца должна быть свободной от загрязнения на участке нанесения отпечатка. Шероховатость исследуемой поверхности образца не должна быть грубее $Ra = 30$ мкм, определяемой по ГОСТ 2789-73.

Проведение испытаний

Нанести на испытываемую поверхность отпечаток под действием статической нагрузки в течение определенного времени.

Определить число микротвердости по формулам.

Занести результаты в протокол.

Обработка результатов и расчеты

Вычислить число микротвердости HV исследуемой поверхности по формуле (для наконечника в форме четырехгранной пирамиды с квадратным основанием):

Если F выражена в ньютонах:

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{0,102 \times 2F \sin \frac{d}{2}}{d^2} = 0,189 \frac{F}{d^2}$$

Если F выражена в килограмм-силах:

$$HV = \frac{F}{S} = \frac{2F \sin \frac{d}{2}}{d^2} = 1,854 \frac{F}{d^2},$$

где d – среднее арифметическое длины обеих диагоналей основания пирамидального наконечника, мм; S – условная площадь боковой поверхности полученного отпечатка, мм²; F – приложенная сила.

Испытание на трехточечный изгиб

Трехточечный изгиб (Three-pointbending) – изгибфрагмента металла или конструктивного элемента, при котором предмет помещен между двух поддерживающих опор, усилие прикладывается между ними в противоположном направлении.

Сущность метода заключается в изгибе плоского образца постоянного прямоугольного сечения, свободно лежащего на двух опорах, с постоянной скоростью нагружения до момента разрушения образца или до того момента, когда деформация растяжения на внешней поверхности образца достигнет предварительно заданного значения.

Термины

Диаграмма деформирования – графическая зависимость между напряжением (нагрузкой) и деформацией (перемещением).

Скорость испытания V, мм/мин – скорость движения активной траверсы испытательной машины.

Критическая нагрузка F_{max}, Н - нагрузка, определяемая по диаграмме деформирования одним из трех способов:

- как нагрузка, равная нагрузке начала отклонения диаграммы от линейной;
- как нагрузка, равная нагрузке разрушения образца (момент разрушения образца определяется визуально);
- как нагрузка, равная нагрузке в точке пересечения прямой, выходящей из начала координат, тангенс угла которой на 5 % меньше тангенса угла линейного участка диаграммы.

Модуль упругости при поперечном изгибе E_i , МПа - величина, характеризующая упругие свойства материалов при малых деформациях при изгибающих нагрузках.

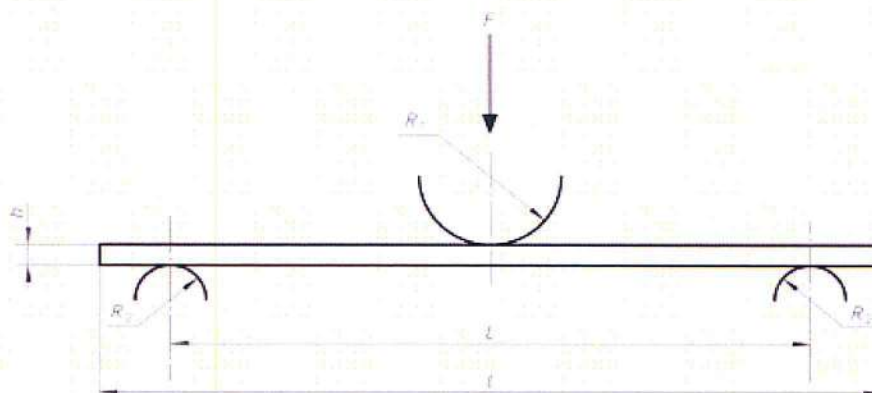


Рис. 43

Рисунок 43 – Схема нагружения при трехточечном изгибе (h – толщина образца, l – длина образца, L – длина пролета между опорами, R_1 – радиус закругления пуансона, R_2 – радиусы закругления краев опор, F - нагрузка)

Поробоподготовка

При испытаниях на трехточечный изгиб использовать образец в виде полосы прямоугольного сечения с размерами, установленными в таблице 2.

Толщина, h	Ширина, b	Длина, l	Пролет между опорами, L
Определяется по образцу*	5 мм	> 30 мм	30 мм

Таблица 2 – Размеры исследуемых образцов

Соотношение пролета между опорами к толщине образца должно выбирать таким, чтобы разрушения происходили на внешней поверхности образца от напряжений растяжения.

Образцы должны иметь гладкую ровную поверхность без вздутий, сколов, трещин, расслоений и других дефектов.

Количество образцов для испытания должно быть не менее четырех, если другое не установлено в нормативных документах или технической документации на испытуемый материал.

Перед испытанием образцы маркировать. Маркировка должна позволять точно идентифицировать образцы и не должна повреждаться при испытании, а также влиять на выполнение и результаты испытаний.

Проведение испытаний

Размеры образца определить по трем точкам (в центре и по краям каждого испытуемого образца). Толщину с точностью $\pm 0,025$ мм, длину и ширину с точностью $\pm 0,1$ мм. Вычислить среднее значение длины, ширины и толщины.

Испытания проводить в помещении или закрытом объеме при температуре и относительной влажности, установленной в ГОСТ 12423-2013.

На испытательной машине установить пуансон и опоры. Пролет L между опорами установить в соответствии с таблицей 1 на основании средних значений ширины, толщины и длины образца в партии.

На опоры установить специально подготовленную стальную балку и по ней выровнять опоры и пуансон, до достижения необходимой параллельности опорных поверхностей.

Скорость перемещения активного захвата V , мм/мин вычислить по формуле:

$$V = \frac{ZL^2}{6h}$$

где Z – скорость деформации, равная 0,01 мм/мин; L – длина пролета между опорами, мм; h – толщина образца.

При испытании регистрировать зависимость прогиба от нагрузки или деформации изгиба.

Испытания прекратить при разрушении образца.

Прогиб ω , мм при достижении деформации на внешней поверхности образца в 0,05 мм/мм рассчитать по формуле:

$$\omega = \frac{\varepsilon_{max} L^2}{6h}$$

где ε_{max} – максимальная деформация на внешней поверхности образца, равная 0,05 мм/мм.

Занести результаты в протокол.

Обработка результатов и расчеты

Прочность при изгибе σ_{II}^B , МПа вычислить по формуле:

$$\sigma_{II}^B = \frac{3F_{max} L}{2bh^2}$$

где F_{max} – максимальная нагрузка в момент разрушения образца, Н; L – длина пролета между опорами, мм; b – ширина образца, мм; h – его толщина, мм.

Деформацию на внешней поверхности образца ε_{max} вычислить по формуле:

$$\varepsilon_{max} = \frac{6\omega h}{L^2},$$

Модуль упругости при поперечном изгибе E_{II}^{Π} , МПа вычислить по формуле

$$E_{II}^{\Pi} = \frac{L^3}{4bh^3},$$

где m – тангенс угла наклона касательной к первоначальному линейному участку диаграммы деформирования образца к оси деформации.

Оптические исследования

Определение размеров зерен

Термины

Зерно (grain) — однородная часть твердого тела, имеющая отчетливо различимые границы, наблюдаемые при помощи оптической или электронной микроскопии; единственный элемент поликристаллического материала.

Размер зерна определяется методами оптической и электронной микроскопии как среднее расстояние между противоположными границами зерна.

Способность частично стабилизированного диоксида циркония к трансформационному упрочнению в процессе деформирования определяется рядом факторов, в том числе и характеристиками микроструктуры. В связи с этим помимо представлений о пространственной конфигурации элементов макроструктуры, не менее важное значение имеет регистрация параметров тонкой кристаллической структуры и их корреляции с объемом порового пространства.

Пробоподготовка

Пробоподготовку синтезированных керамических материалов при помощи метода послойного лазерного сплавления производить согласно таблице 3.

Таблица 3 – Шаги пробоподготовки керамических материалов

Шаги	Наименование	Тип абразива	Смачиватель	Время	Нажим, Н	Скорость вращения, об/мин	Направление вращения
Вывод плоскости	Алмазный шлифовальный диск 75 μm	75 μm	Вода	До плоскости	35	300	Со-направлено
Шлифовка	Алмазный шлифовальный диск 15 μm	15 μm	Вода	2 мин.	30	300	Со-направлено
Шлифовка	Алмазный шлифовальный диск 6 μm	6 μm	Вода	2 мин.	30	300	Со-направлено
Полировка	Полировальная ткань	Поликристаллическая водная суспензия 3 μm		3-4 мин.	25	150	Противонаправлено
Финальная полировка	Полировальная ткань	Коллоидная суспензия 0,5 μm		2 мин.	25	150	Противонаправлено

Проведение испытаний

Провести оптические исследования поверхности образца, перпендикулярной плоскости излома.

Определить размеры зерен.

Занести результаты в протокол.

Определение характера излома

Термины

Зернистый излом (*Granularfracture*) – тип неровной поверхности разрушения при изломе материала. Характеризуется грубым, зернистым внешним видом, в отличие от гладкого или волокнистого. Подразделяется на транскристаллитный излом, интеркристаллитный излом.

Транскристаллитный (внутризёрный) излом - хрупкое разрушение, происходящее в определённых направлениях внутри зёрен (Рисунок 45а)

Межкристаллический (межзёрный) излом - хрупкое разрушение, происходящее по границам между зёрен материала (Рисунок 45б)

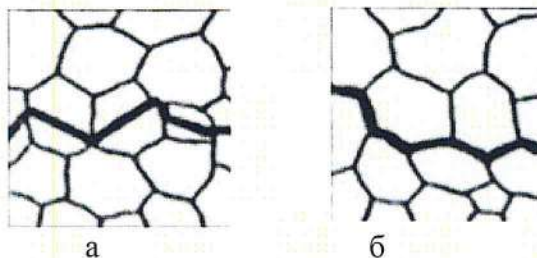


Рисунок 45 – Схематичные изображения хрупких разрушений: а – транскристаллитный излом; б – межкристаллический.

Пробоподготовка

Подготовку керамических образцов для исследования характера излома произвести согласно таблице 2.

Проведение испытаний

Исследовать поверхность образца, перпендикулярной плоскости излома оптическим методом;

Выявить характер и тип излома;

Занести результаты в протокол.

Определение плотности материала методом гидростатического взвешивания

Термины

Плотность однородного вещества - физическая величина, равная отношению массы вещества к занимаемому им объему.

Гидростатическое взвешивание – метод измерения плотности жидкостей и твердых тел, основанный на законе Архимеда (на всякое тело, погруженное в жидкость (или газ), действует со стороны этой жидкости (газа) поддерживающая сила, равная весу вытесненной телом жидкости (газа), направленная вверх и приложенная к центру тяжести вытесненного объема).

Гидростатическая подъемная сила - поддерживающая сила, равная силе Архимеда.

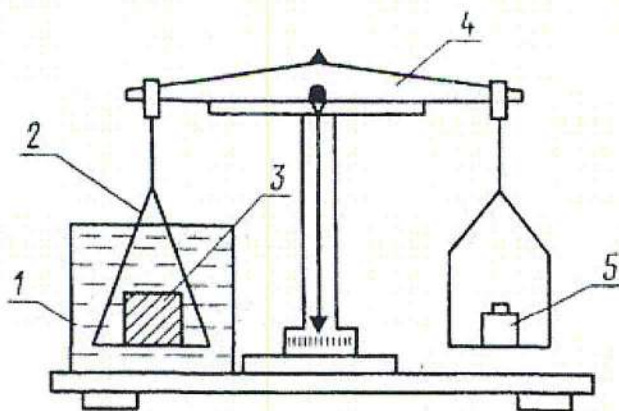


Рисунок 46 – Схема оборудования весов для гидростатического взвешивания: 1 – сосуд с дистиллированной водой; 2 - сетка-подвеска; 3 – исследуемый образец; 4 – весы; 5 - разновес

Проведение испытаний

Наполнить емкость для гидростатического взвешивания дистиллированной водой.

Уравновесить весы на ноль шкалы.

Взвесить образец на весах на воздухе не менее 3 раз и вычислить среднее значение.

Взвесить образец в этиловом спирте не менее 3 раз и вычислить среднее значение.

Занести результаты в протокол.

Обработка результатов и расчеты

Произвести расчет плотности образца по формуле:

$$\rho = \frac{m_1 \rho_{\text{спирта}}}{m_1 - m_2},$$

где m_1 – масса образца на воздухе (г), m_2 – масса образца в этиловом спирте (г),
 $\rho_{\text{спирта}}$ – плотность этилового спирта (г/см³)

Плотность этилового спирта определяется согласно ГОСТ 18995.1-73.

С целью определения оптимального значения оптических параметров источника лазерного излучения для сплавления керамических порошковых материалов может быть использован эллипсометрический метод (на оборудовании ЛЭФ-3М).

В ходе выполнения работ первого этапа ПНИЭР лучше всего себя зарекомендовала смесь порошковых материалов Al_2O_3 и ZrO_2 , поэтому на основе этого порошка были проведены исследование эллипсометрических параметров, что позволило определить оптические параметры источника лазерного излучения для модернизированной аддитивной установки УрАМ-150D.

Целью исследований являлось определение оптических характеристик порошковых материалов:

-коэффициент преломления;

-коэффициент поглощения;

Условия предъявления объектов исследования:

-Исследования проводились на спрессованных в таблетки образцах порошковой смеси массой 15 гр.

-Выборка 100%

-Исследования проводятся силами рабочей группы.

Исследования проводились на базе ЦЗЛ в нормальных климатических условиях:

температура окружающего воздуха, °С	20 ± 10
относительная влажность воздуха, %	от 45 до 80
атмосферное давление, мм рт. ст.	от 630 до 800

Для проведения исследования был использован лазерный эллипсометр ЛЭФ-3М (рисунок 47)

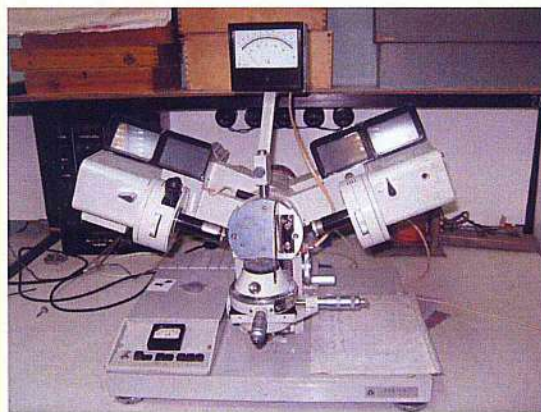


Рис. 47

Посредством лазерного фотоэлектронного эллипсометра производятся измерения эллипсометрических параметров (Ψ и Δ) образцов.

Принцип действия и работа прибора.

В основу принципа действия эллипсометра положен «нулевой» оптический метод, который предусматривает в данном случае достижение минимальной интенсивности пучка света на выходе анализатора, путем поочередных поворотов поляризатора и анализатора. Угловое положение компенсатора при измерениях фиксируется так, чтобы его «быстрая» ось находилась под углом $+45^\circ$ или под углом -45° к плоскости падения пучка света на образец. В каждом фиксированном рабочем положении компенсатора имеется две

независимые комбинации угловых положений поляризатора и анализатора, в которых может быть достигнута минимальная интенсивность пучка света. Еще две комбинации имеется при повороте на 180° поляризатора и анализатора. В общем, для четырех положений компенсатора таких комбинаций 16. Из них независимы четыре, что и обуславливает четыре измерительные зоны ($i = 1, 2, 3, 4$). Номер измерительной зоны определяется угловым положением компенсатора и анализатора.

Процедура измерений:

- 1) Исследуемый образец в виде спрессованных таблеток по 15 гр. положить на предметный столик
- 2) Вращая маховичок установить заданный угол падения света $\phi_{01}=60^\circ$ и $\phi_{02}=70^\circ$.
- 3) Путем поворота юстировочных винтов предметного столика добиться попадания отраженного светового пучка в трубу анализатора так, чтобы отраженный от образца световой луч попал в центр сетки зеркальной диафрагмы.
- 4) Установить ручкой компенсатор в положение $C = 126^\circ 54'$.
- 5) Поворотом анализатора и поляризатора добиться минимальной интенсивности пучка света (гашения) на зеркальной диафрагме, контролируя уменьшение светового.
- 6) Переключить световой пучок на фотоприемник и добиться гашения сигнала.
- 7) Определить первую пару значений, соответствующих гашению излучения на выходе эллипсометра.
- 8) Произвести сброс «АРУ» и переключить режим работы прибора из фотоэлектрического в визуальный.
- 9) Повернуть поляризатор на 90° в любую сторону и зафиксировать это положение.
- 10) По экрану определить значение, соответствующее гашению излучения, не используя нуль-индикатор, т.е. визуально по экрану.
- 11) Определить точные значения и по нуль-индикатору, добиться гашения сигнала на выходе фотоприемника изменением положений поляризатора и анализатора.
- 12) Повторить пункт 8.
- 13) Установить компенсатор в положение $C = C_0 - 45^\circ = 36^\circ 54'$. 55

- 14) Прodelать операции, аналогичные описанным в п.п. 5÷12, и определить третью и четвертую пары значений.
- 15) Определить номер измерительной зоны. Для этого провести анализ результатов измерений.
- 16) Рассчитать значения поляризационных углов Δ и ψ в каждой измерительной зоне и усреднить результаты по двум (для каждого углового положения компенсатора) и по четырем зонам.

Значения поляризационных углов Δ и ψ , полученные в каждой из четырех измерительных зон, а также значения, полученные в результате усреднений по двум и четырем зонам, в общем могут расходиться на 3-4°. Это характеризует неидеальность оптической системы эллипсометра, включая компенсатор и образец. Наиболее предпочтительными для дальнейшего использования поляризационных углов Δ и ψ считаются те значения, которые получены в результате усреднения по четырем зонам.

Определение оптических постоянных методом эллипсометрии основано на измерении относительного коэффициента отражения, который связан с измеряемыми эллипсометрическими параметрами Ψ , Δ комплексным уравнением:

$$\operatorname{tg}\Psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{R_p}{R_s},$$

где R_p , R_s – комплексные коэффициенты отражения. В случае отражения плоской волны от массивного однородного образца можно использовать модель полубесконечной среды. В этом случае комплексные коэффициенты отражения равны коэффициентам Френеля, которые выражаются:

$$r_p = \frac{N^2 \cos \varphi - \sqrt{N^2 - \sin^2 \varphi}}{N^2 \cos \varphi + \sqrt{N^2 - \sin^2 \varphi}}$$

$$r_s = \frac{\cos \varphi - \sqrt{N^2 - \sin^2 \varphi}}{\cos \varphi + \sqrt{N^2 - \sin^2 \varphi}}$$

Здесь φ - угол падения света, отсчитанный от нормали к поверхности образца. Подставляя в уравнение в качестве R_p и R_s коэффициенты Френеля, получим выражение, связывающее измеренные эллипсометрические параметры с комплексным показателем преломления материала:

$$\operatorname{tg}\Psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{\sin^2 \varphi - \cos \varphi \sqrt{N^2 - \sin^2 \varphi}}{\sin^2 \varphi + \cos \varphi \sqrt{N^2 - \sin^2 \varphi}}$$

Это уравнение можно разрешить и выразить N через параметры Ψ , Δ :

$$N = \sin \varphi \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi \left(\frac{1 - \operatorname{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta}}{1 + \operatorname{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta}} \right)^2}$$

Это уравнение решает вопрос о вычислении коэффициента преломления и коэффициента поглощения по результатам эллипсометрических измерений.

Выводы по разделу:

За счет привлечения собственных средств индустриальный партнер разработал лабораторную методику определения структурных составляющих керамических порошковых материалов и модифицированных керамических порошковых материалов, лабораторную методику определения оптимального значения оптических параметров источника лазерного излучения для сплавления керамических порошковых материалов
КМ.02.2017.ЛМ.

Работы выполнены в полном объеме в соответствии с требованиями п.2.2, 2.3 технического задания на выполнение ПНИЭР.

16. Проведение испытаний модернизированной аддитивной установки на вариативность (стабильность получения результатов)

В ходе проведения испытаний в модернизированную аддитивную установку УрАМ-150D было загружено 20 кг керамического порошкового материала порошка.

В рамках подготовки модернизированной аддитивной установки УрАМ-150D к работе были установлены следующие параметры работы:

Скорость сканирования -	200 - 400 мм/с
Мощность сканирования-	240-285 Вт (шаг 15 Вт)
Толщина слоя -	500 мкм
Диаметр фокусного пятна -	100мкм

Изготовленные в процессе испытания модернизированной аддитивной установки УрАМ-150D на вариативность экспериментальные образцы заготовок «пластина» в количестве 100 штук испытывались в соответствии с Программой и методикой испытаний КМ.02П.2017.ПМ. Акт об изготовлении №4 от 14 декабря 2017г. В процессе изготовления заготовок «пластина» раз в 15 минут проводился визуальный контроль проверки стабильности параметров работы установки. Виды испытаний заготовок «пластина» приведены в таблице 4.

Таблица 4

№п/п	Вид испытаний (проверок)	Пункт Требований ТЗ	Ед. Изм.	Номинальное значение	Предельные отклонения	Пункт методик и
1	Проверка показателей назначения					
2	Испытание пористости заготовки «пластина»	4.3.3	%	10	±10	6.1
3	Испытание термической стойкости	4.3.3	Цикл	5	-	6.2
4	Проверка геометрических размеров	4.3.3	мм	50x50x50	+0,5	6.3

Результаты проведения испытаний партии из 100 штук заготовок «пластина» приведены в Протоколе испытаний №1 от 28.12.2017г., приложен к отчету ПНИЭР.

Выводы по разделу:

Проверка модернизированной аддитивной установки УрАМ-150D на стабильность получения результатов показала, что оборудование работает стабильно в процессе изготовления заготовок с высокой степенью повторяемости результатов и в соответствии с техническим заданием на модернизацию аддитивной установки.

По предварительной оценке, объект испытания соответствует требованиям ТЗ на модернизацию аддитивной установки.

Работы выполнены за счет привлечения собственных средств индустриального партнера, в полном объеме и в соответствии с требованиями п. 2.13 технического задания на выполнение ПНИЭР.

17. Разработка ТЗ на дополнительный модуль контроля параметров детали при построении для модернизированной аддитивной установки, включая ПО модуля

В процессе модернизации аддитивной установки УрАМ-150D, для стабильного качества изготовления деталей из керамических порошковых материалов, возникла необходимость контролировать и поддерживать температуру инертного газа в рабочей камере, контролировать температуры инертного газа на входе/выходе в фильтровально-охладительной станции, контролировать и регулировать скорость прохождения инертного газа (создание ламинарного потока инертного газа над поверхностью сплавления), контролировать температуру поверхности слоя керамического порошка до и во время сплавления, контролировать уровень свободного водорода и углекислого газа в рабочей камере до и во время сплавления керамических порошковых материалов.

Целью разработки ТЗ на дополнительный модуль контроля параметров является составление документа с необходимыми требованиями, на основании которого необходимо было разработать дополнительный модуль контроля параметров, который даст возможность контролировать и регулировать процессы, протекающие при спекании керамических порошковых материалов модернизированной аддитивной установки.

Были проведены испытания аддитивной установки в ходе которых был выявлен ряд характеристик, которые необходимо было контролировать, поэтому при разработке ТЗ были сформулированы цели, задачи и требования к дополнительному модулю контроля параметров.

Для выполнения работ по обозначенной проблематике нами были сформулированы и оформлены в виде технического задания требования к дополнительному модулю контроля параметров детали при построении для модернизированной аддитивной установки, включая ПО модуля.

Дополнительный модуль контроля параметров детали при построении для модернизированной аддитивной установки – это комплекс средств измерения, мониторинга, контроля за процессами, протекающими в модернизированной аддитивной установке, а также управление ими. Данный комплекс расположен в разных частях установки и объединен в центре управления – контроллере.

Для исключения горения порошка необходимо было контролировать:

- содержание кислорода в рабочей камере 0,15 – 0,17%;
- содержание водорода и углекислого газа не более 0,2%
- температуру инертного газа на входе и выходе в охлаждающей станции;

- ламинарный поток нагнетаемого инертного газа над поверхностью платформы построения;

- величину перемещения платформы построения 10 мкм;

- температуру стола (300°C);

- температуру в рабочей камере (не более 40°C);

- вакуумирование (0,1-0,3bar)

- давление (1,1-1,2bar)

- контроль циркуляции воздуха в зависимости от режима работы, направления движения типа фильтра;

- наличие давления газа и порционного давления кислорода в камере;

- расход сжатого воздуха и технических газов с помощью расходомера модульного EE741;

Для управления и контроля комплексом средств измерений, мониторинга и контроля за процессами, протекающими в модернизированной аддитивной установке, необходимо было разработать ПО дополнительного модуля контроля параметров при построении аддитивной установки.

Работы выполнены за счет привлечения собственных средств индустриального партнера, в полном объеме и в соответствии с требованиями п. 3.14 технического задания на выполнение ПНИЭР. Разработано техническое задание на дополнительный модуль контроля параметров детали при построении для модернизированной аддитивной установки включая ПО модуля от 24.02.2017г.

17.1. Разработка компонентов ПО дополнительного модуля контроля параметров детали при построении для модернизированной аддитивной установки

В целях разработки модернизированной аддитивной установки изделий из керамических порошков в соответствии с разработанным ТЗ на дополнительный модуль контроля параметров детали при построении для модернизированной аддитивной установки был разработан дополнительный модуль контроля параметров детали при построении для модернизированной аддитивной установки (далее – ДМКП).

Разработка компонентов ПО дополнительного модуля контроля параметров при построении для модернизированной аддитивной установки необходима для того, чтобы модернизированная установка позволяла изготовить изделия из керамического порошка, а также управление датчиками контроля за параметрами модернизированной аддитивной установки.

Алгоритм функционирования установки определяется управляющей программой, записанной в память базового блока контроллера.

Изготовление изделий из керамических порошков наложило на систему управления в качестве одной из основных задач требование регулировки в широких пределах кинематических и технологических параметров, приведенных ниже, а также и их контроль.

Программное обеспечение должно позволять реализовать следующие дополнительные функции:

- 1) Мониторинг и контроль температуры платформы построения в рабочей камере в разных точках в процессе построения. Для этого необходим модуль программного обеспечения, который позволяет сопрягать контроллер с дополнительно установленным на стенке бункера оптическим датчиком температуры в соответствии со сборочным чертежом УрАМ-150.007.000.210.
- 2) Мониторинг и контроль величины содержания водорода (H_2) и углекислого газа (CO_2). Для этого необходим модуль программного обеспечения, который позволяет сопрягать контроллер с дополнительно установленным газоанализатором, а также добавлено отслеживание и контроль за содержанием выделяющихся продуктов при построении изделия.
- 3) Мониторинг и контроль регулирования ламинарного потока. Для этого необходим модуль программного обеспечения, который позволяет сопрягать контроллер с дополнительно установленными двумя датчиками протока на входе и выходе инертного газа из камеры в соответствии со сборочным

чертежом УрАМ-150.000.000.210. И в ПО было внесено отслеживание и контроль за скоростью потока инертного газа.

В ходе выполнения данной работы был проведен анализ выбора расходомеров. Основной причиной, определившей выбор расходомера, является гарантия долговременной стабильности работы и минимальное время отклика расходомера. Модульный расходомер EE741, основанный на принципе измерения теплового потока массы, с хорошо зарекомендовавшим себя E+E высокочувствительным элементом на основе тонкопленочной технологии.

В результате появилась возможность контролировать циркуляцию воздуха в зависимости от режима работы, направления движения и типа фильтра.

Датчик оптический РМУ201, обеспечивающий точное измерения температуры площади рабочей платформы построения детали до и в момент сплавления порошка.

При этом в конструкции модуля были предусмотрены разъемы под установку компонентов датчиков, обеспечивающие надежное подключение элементов управления.

Работы выполнены за счет привлечения собственных средств индустриального партнера, в полном объеме и в соответствии с требованиями п.3.14 технического задания на выполнение ПНИЭР. Схема структурная УрАМ-150.000.000-Э ЭЗ

18. Разработка дополнительного модуля контроля параметров детали при построении для модернизированной аддитивной установки.

Дополнительный модуль контроля параметров необходим для того чтобы модернизированная аддитивная установка имела возможность производить изделия из керамического порошка. Для этого необходимо обеспечить управление следующими параметрами:

- нужной герметизации рабочей камеры (содержание кислорода 0,15 – 0,17%);
- регулировать ламинарный поток нагнетаемого инертного газа над поверхностью платформы построения;
- регулировать температуру стола (300°C);
- регулировать температуру в рабочей камере (не более 40°C);

Алгоритм функционирования установки определяется управляющей программой, записанной в память базового блока контроллера.

Обеспечение процесса построения заключается в следующем:

- Аддитивная установка приводится в исходное состояние;
- Камера подвергается вакуумированию до 0,1 – 0,3 bar;
- Вслед за этим камера заполняется инертным газом с накачкой до ~1,1 – 1,2 bar;
- При поддержании заданного давления в камере обеспечивается частичное стравливание газа с целью получения заданной концентрации кислорода в камере до 0,03 – 0,1%;
- По ходу стравливания в определенный момент включаются: нагрев стола, чиллер для охлаждения газа и циркуляция газа внутри камеры;
- При достижении всех заданных для построения параметров (кислород, давление, температура запрашивается готовность лазера к работе;
- При наличии связи с ЭВМ и готовности лазера стол опускается на заданную величину, на него наносится слой порошка заданной толщины и выдается команда на работу лазера;
- По признаку об окончании работы лазера стол опускается на шаг с нанесением нового слоя порошка и цикл повторяется;
- После нанесения последнего слоя выключаются циркуляция и нагрев стола, сбрасывается давление в камере и выдается команда об окончании построения.

Последующие действия определяются инструкцией работы оператора.

Дополнительный модуль контроля параметров детали при построении для модернизированной аддитивной установки – это комплекс средств измерения, мониторинга, контроля за процессами, протекающими в модернизированной аддитивной установке, а

также управление ими. Данный комплекс расположен в разных частях установки и объединен в центре управления – контроллере.

При разработке были предусмотрены места установки датчиков, их крепление, трассировку кабелей и выводы разъемов для подключения к контроллеру. Для этого приняли решение внести изменения в существующие чертежи аддитивной установки. Для охлаждения циркулируемого газа, а также для поддержания требуемой температуры в рабочей камере был спроектирован теплообменник с внутренними каналами. Теплообменник состоит из набора идентичных зигзагообразных каналов эллипсоидной формы переменного сечения. Внутри каналов расположены ребра, закручивающие поток жидкости в вихрь, что обеспечивает срыв пограничного слоя с внутренней поверхности, более глубокое перемешивание жидкости и повышение уровня теплообмена в связке «газ – трубка – жидкость». Газ, проходя через межтрубное пространство, закручивается за счет зигзагообразной формы трубок. Переменное сечение каналов вызывает эффект пульсирования потоков газа и жидкости, что значительно повышает эффективность теплообменника, выделяя его из конкурентного ряда.

Одной из основных задач в работе аддитивной установки является не построение, а отработка технологий работы с керамическими порошками. Это, в свою очередь, наложило на систему управления в качестве одной из основных задач требование регулировки в широких пределах кинематических и технологических параметров, а также их контроль.

Для этого в функционал дополнительного модуля контроля параметров введены:

- регулировка циркуляции воздуха в зависимости от режима работы, направления движения типа фильтра;
- регулировка и поддержание температуры стола и камеры;
- регулировка и поддержание давления газа и парциального давления кислорода в камере;
- расходомер модульный EE741
- датчик оптический PMU201
- датчик температуры TC054-50M

В результате разработки дополнительного модуля контроля параметров детали при построении для модернизированной аддитивной установки была разработана эскизная конструкторская документация:

- УрАМ-150.000.000.210СБ
- УрАМ-150.000.000.220СБ
- УрАМ-150.009.100СБ

Включая детальные чертежи.

Вывод по разделу:

Благодаря дополнительному модулю контроля параметров детали при построении для модернизированной аддитивной установки появилась возможность полностью контролировать процесс изготовления изделий из керамических порошковых материалов, а также экспериментировать с новыми режимами сплавления, что в свою очередь позволит изготавливать изделия с разной структурой.

Работы выполнены за счет привлечения собственных средств индустриального партнера, в полном объеме в соответствии с требованиями п. 6.1.10 «Эскизная конструкторская документация на ДМКП для модернизированной аддитивной установки в составе:

- чертеж общего вида;
- монтажный чертеж;
- схема структурная;
- чертежи деталей;
- инструкция пользователя.»

технического задания на выполнение ПНИЭР.

19. Разработка эскизной конструкторской документации на экспериментальные образцы керамических деталей-представителей узлов и деталей ГЛА

На текущем этапе развития промышленного производства наиболее интересными и перспективными являются аддитивные технологии, которые в кратчайшие сроки позволяют получить прототип изделия или опытный образец со сложной геометрией.

Аддитивное производство уже давно перешло из разряда «зарождающейся технологии» в передовую инновацию. Технологии быстрого прототипирования (или 3D-печати) позволили перейти на новую стадию индустриального развития – цифровому производству, которое имеет следующие преимущества: существенно сокращает длительность цикла от идеи и чертежа до изделия, сокращает трудоемкость, материалоемкость и энергоемкость производства, делает его экологически чистым. Все стадии реализации проекта в аддитивном производстве от идеи до выпуска готовой продукции находятся в единой технологической цепи, где каждая операция выполняется в цифровой CAD\CAM\CAE-системе. Вся работа ведется в безбумажном виде, минуя стадию составления двумерного чертежа, сразу строится 3D-модель и отправляется в печать.

Аддитивные технологии стали незаменимыми во многих отраслях высокотехнологичного производства, произведя в них настоящую революцию. Такими областями производства стали: авиационная и аэрокосмическая промышленность, атомная индустрия, медицина и приборостроение, а также другие отрасли, где характерным является мелкосерийное, иногда штучное производство. Уход от традиционных технологий, применение новых методов послойного выращивания изделий существенно сократило время на выпуск новой продукции.

С помощью аддитивных технологий сегодня можно решить широкий спектр производственных задач:

- ускорение работ по проведению ОКР;
- проведение работ по отработке макетов;
- быстрое прототипирование сложных изделий;
- мелкосерийное производство;
- функциональное моделирование;
- быстрое изготовление отдельных деталей;
- снижение стоимости конструкторских работ.

3D-принтер может заменить более дорогой ЧПУ станок, а также, в отличие от последнего, позволит создавать изделия с произвольной внутренней структурой.

Как пример использования 3D-принтера инженерами-конструкторами, рассмотрим следующую ситуацию. Инженерам часто приходится делать детали сложной формы. Создание таких деталей традиционным способом, как правило происходит очень трудоемко, затрачивается много времени и средств. А печать таких деталей на 3D-принтере может занять всего до 2 часов. Таким образом, 3D-принтер позволяет быстро и «бюджетно» получить точную модель всего за пару часов, не прилагая существенных усилий. Повышение эффективности выполнения работ на этапе изготовления макетных и опытных образцов можно обеспечить путем сокращения затрат на расходные материалы и сроков изготовления за счет использования 3D-принтеров, обеспечивающих возможность использования широкой номенклатуры расходных материалов для изготовления малогабаритных деталей. Использование в работе возможностей 3D-принтеров позволит существенно снизить затраты.

Создание трехмерных моделей «Модель 1», «Модель 2», «Модель 3» для изготовления методом селективного лазерного сплавления на модернизированной аддитивной установке УрАМ-150D из керамических порошковых материалов проводилось в программном обеспечении SolidWorks и после разработки параметрической модели полученный результат сохранялся в формате твердотельной модели *.STL

В процессе разработки документации учитывались технические характеристики аддитивной установки УрАМ-150D, в частности габаритные размеры рабочей камеры, составляющие Ø180x200мм. Кроме этого в эскизно-конструкторской документации указаны размеры для установки на сопрягаемые детали и узлы с полем допуска под возможную механическую обработку.

Работы выполнены за счет привлечения собственных средств индустриального партнера, в полном объеме в соответствии с требованиями п. 6.1.13 технического задания на выполнение ПНИЭР.

20. Проведение мероприятий по популяризации результатов ПНИЭР

В период 01.01.2017г по 31.12.2017г. получателем субсидии и индустриальным партнером было проведено четыре мероприятия по популяризации проекта и достигнутых результатов ПНИЭР.

«Физика низкотемпературной плазмы» (конференция, г. Казань, 5-9 июня 2017г.)

Участие в конференции способствовало взаимовыгодному обмену информацией между российскими учеными и специалистами, а также с их коллегами из стран Европы, Америки и Азии. На конференции рассмотрены наиболее значимые результаты, достигнутые за последние годы в области исследования и применения низкотемпературной плазмы.

Следующие исполнители ПНИЭР приняли участие в конференции с докладом:

S. Kolmakov, S. Koitov, I.Evdokimova

Development of technology of production of ceramic units and parts by selective laser fusion

Иннопром-2017 (выставка, г. Екатеринбург, 10-13.07.2017)

Разработки университета, в том числе и результаты работ по ПНИЭР, были представлены совместно с индустриальным партнером АО «ОКБ «НОВАТОР» на стенде Концерна ВКО "Алмаз – Антей".

Концерн ВКО "Алмаз – Антей" в 2017 году впервые принял участие в международной промышленной выставке ИННОПРОМ с демонстрацией возможностей производства высокотехнологичной продукции гражданского назначения. "Алмаз – Антей" выступил в качестве стратегического партнера выставки. Созкспонентами Концерна стали 11 дочерних обществ и предприятий-партнеров.

Экспозиция Концерна продемонстрировала гостям выставки шесть направлений деятельности холдинга в "мирной" области:

- промышленное производство;
- медицина;
- транспорт;
- связь;
- безопасность;
- оборудование для жилищно–коммунального комплекса.

Посетители выставки ознакомились с информацией о производстве изделий радиофотоники и печатных плат, а также применении аддитивных технологий в производстве продукции Концерна. За время работы выставки стенд Концерна посетили и ознакомились

с экспонатами, в частности, министр промышленности и торговли Российской Федерации Д.В. Мантуров, заместитель председателя коллегии Военно-промышленной комиссии Российской Федерации О.И. Бочкарев, губернатор Свердловской области Е.В. Куйвашев, председатель Законодательного Собрания Свердловской области Л.В. Бабушкина, глава Екатеринбурга Е.В. Ройзман, а также представители российских и зарубежных делегаций.

Кроме того, в ходе выставки ИННОПРОМ-2017 было подписано соглашение о сотрудничестве между Концерном ВКО "Алмаз – Антей" и Уральским федеральным университетом.

АО "Концерн ВКО "Алмаз – Антей" – одно из крупнейших интегрированных объединений российского оборонно-промышленного комплекса, на котором трудятся 127 тысяч человек. Продукция Концерна стоит на вооружении более чем в 50 странах мира.

XIII Международный авиационно-космический салон МАКС 2017 (выставка, г. Жуковский, 18-23.07.2017)

Разработки университета, в том числе результаты работ по ПНИЭР, были представлены совместно с АО «ОКБ «НОВАТОР» на стенде Концерна ВКО "Алмаз – Антей".

Концерн ВКО "Алмаз – Антей" принял участие в Международном авиационно-космическом салоне МАКС-2017.

Открытую экспозицию и стенд АО "Концерн ВКО "Алмаз - Антей" посетили свыше 40 иностранных делегаций более чем из 20 стран мира. В рамках выставки свою продукцию представили более 20 дочерних обществ Концерна. Холдинг продемонстрировал свыше 150 образцов продукции военного, гражданского и двойного назначения, а также ряд промышленных технологий.

Особое место на стенде Концерна было отведено презентации гражданской продукции, достижениям в области импортозамещения и аддитивных технологий. Стенд и открытая экспозиция Концерна пользовались неизменным успехом в течение всего времени проведения МАКС-2017.

По оценке руководства Концерна ВКО "Алмаз – Антей", для компании прошедший "МАКС-2017" стал успешным.

АО "Концерн ВКО "Алмаз – Антей" – одно из крупнейших интегрированных объединений российского оборонно-промышленного комплекса, на котором трудятся 127 тысяч человек. Продукция Концерна стоит на вооружении более чем в 50 странах мира.

V национальная выставка-форум ВУЗПРОМЭКСПО 2017 (выставка-конференция, г. Москва, 12-15.12.2017)

Ежегодное мероприятие, на котором подводятся итоги реализации целого ряда государственных и федеральных целевых программ, заказчиком которых выступает Минобрнауки России.

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ) входит в первую тройку Национального рейтинга университетов РФ по критерию «Инновации и коммерциализация разработок» и, по данным компании Thomson Reuters, занимает третье место в России по числу полученных патентов. Участник программы повышения международной конкурентоспособности университетов России «5-100-2020». Инновационная инфраструктура университета устанавливает партнерские связи с крупными промышленными корпорациями, включаясь в реализацию их программ инновационного развития. За очень короткое время университет шагнул от генерирования проектов до создания и продажи инновационной продукции и услуг (более 75 малых инновационных предприятий с участием УрФУ).

В УрФУ сегодня 23 ведущих научных школы, 15 научно-образовательных центров, в том числе с участием Институтов УрО РАН. Ученые университета выполняют НИОКР в интересах и по заказу ведущих высокотехнологичных предприятий, а также проводят исследования в рамках более чем 600 НИР, грантов, проектов федеральных целевых программ и международных проектов ежегодно. В числе ключевых инфраструктурных проектов университета – строительство Уральского университетского технополиса, создание и развитие Регионального инжинирингового центра, Циклотронного центра ядерной медицины, Венчурного фонда с участием университета, Образцовой фабрики бережливого производства (совместно с McKinsey & Company и ОМЗ), Фармацевтического кластера.

Выводы по разделу:

Работа выполнена в полном объеме в соответствии с п.1 «Показатели» Требований по достижению значений показателей результативности предоставления субсидии. На стенде индустриального партнера по телевизионному экрану транслировался видеоролик с информацией о совместных работах с УрФУ по соглашению № 14.578.21.0200 о предоставлении субсидии с указанием уникального идентификатора ПНИЭР. Фотографии с выставок и страниц видеоролика прилагаются к отчету.

21. Отчет о дополнительных патентных исследованиях патентоспособности созданных РИД

Представленное исследование на данном этапе проводится в соответствии с техническим заданием к соглашению о предоставлении субсидии от 03.10.2016 г. №14.578.21.0200 и ГОСТ Р 15.011-96 "Патентные исследования". Содержание и порядок проведения".

Патентные исследования проведены в полном соответствии с Заданием на их проведение. Достоверность результатов патентных исследований обеспечена за счет сплошного просмотра всех патентных документов, предоставленных базой данных Европейского патентного ведомства и базой данных патентного ведомства РФ по запросам, определенным регламентом поиска, выявления их соответствия требованиям технического задания и отбора релевантных документов для последующего детального анализа. Задачи, поставленные перед патентными исследованиями, а также требования регламента и пунктов 3.2, 5.2 технического задания выполнены полностью. Отчёт о дополнительных патентных исследованиях входит в состав отчётной документации по этапу 2.

Работа выполнена в полном объеме в соответствии с п.3.2, 5.2 технического задания выполнения ПНИЭР.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа по второму этапу ПНИЭР завершилась с положительными результатами – основные показатели достигнуты в соответствии с техническим заданием и планом-графиком ПНИЭР, и главное, подтверждена возможность изготовления пробных партий заготовок «пластина» методом селективного лазерного сплавления. Полученные заготовки «пластина» из модифицированных керамических порошковых материалов прошли испытания, определены оптимальные технологические режимы сплавления образцов заготовок «пластина». Разработаны программа и методики испытаний, специалисты - исполнители проекта приняли участие в четырех мероприятиях с докладами по популяризации результатов работ и в работе на стендах. Проведена большая работа по изучению технической литературы и интернет источников, определены дальнейшие направления решения задач третьего этапа ПНИЭР. По материалам и результатам второго этапа ПНИЭР созданы и опубликованы четыре статьи в изданиях индексируемых «Scopus» и «WoS». Поданы две заявки на защиту результатов интеллектуальной деятельности в части научно-технических решений примененных при разработке эскизно-конструкторской документации на модернизацию аддитивной установки. Отчет о выполнении ПНИЭР размещен на странице УрФУ: <http://urfu.ru/ru/science/nich/mes-reports/>.

Работы второго этапа ПНИЭР выполнены в полном объеме, в соответствии с техническим заданием и планом-графиком.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Fefelov, A.S., Furman, I.E., Nikitina, E.V. (2017). «Volumetric thermal expansion coefficients of the equiatomic Na–K and K–Rb melts». Russian Metallurgy (Metally) 2017 (8). P.625
2. Vedmid', L.B., Agafonov, S.N., Avraamov, Y.A., Il'inykh, M.V., Merkushev, A.G., Plotnikov, M.S., Terlyga, A.F. (2017). «Thermal analysis for modeling the aluminothermic reduction of zirconium from oxide». Russian Metallurgy (Metally) 2017 (8). P.652
3. Fefelov, A.S., Furman, I.E., Nikitina, E.V., Ivanov, R.A., Evdokimova, I.V. (2017). «Self-diffusion coefficients of cadmium and indium in liquid» Russian Metallurgy (Metally) 2017 (8). P.680
4. Dubinin, N.E., The Variational Calculation of Bulk Moduli for Liquid Binary Alloys of Alkali Metals Acta Physica Polonica A, 2017, v. 131, P. 237-239.
5. Tan, K. H., C. K. Chua, K. F. Leong, C. M. Cheah, P. Cheang, M. S. Abu Bakar and S. W. Cha (2003). «Scaffold development using selective laser sintering of polyetheretherketone-hydroxyapatite biocomposite blends». Biomaterials 24(18): 3115-3123.
6. Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report // Wohlers Report 2014. P. 130 – 153.