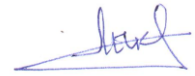


На правах рукописи



Лыков Павел Александрович

РАЗРАБОТКА ГИДРОПНЕВМОАГРЕГАТОВ МАШИН ПО ПРОИЗВОДСТВУ
МИКРОПОРОШКОВ ИЗ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

Специальность

05.04.13 – Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) на кафедре «Двигатели летательных аппаратов».

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Сафонов Евгений Владимирович.

Официальные оппоненты: Модорский Владимир Яковлевич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь;

Корепанов Михаил Александрович,
доктор технических наук, профессор,
Институт механики Уральского отделения РАН,
г. Ижевск.

Ведущая организация – ФГБОУ ВПО Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
г. Ижевск.

Защита состоится 27 февраля 2014 года, в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.02 при ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ) по адресу: 454080, г. Челябинск, пр-т им. В.И. Ленина, д.76, ауд.1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ).

Автореферат разослан « _____ » _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Чернявский А.О.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие науки и техники в наши дни зачастую приводит к ужесточению требований к используемым материалам. Ярким примером этого является производство деталей методом селективного лазерного спекания металлических порошков (SLS-Selective Laser Sintering). Существенным препятствием для более широкого внедрения данной технологии является высокая стоимость используемых порошков, обусловленная жесткими требованиями по гранулометрическому составу и форме частиц.

Решением проблемы является создание энергоэффективной технологии получения микропорошков распылением жидких металлов, что невозможно без детального изучения сопутствующих гидромеханических процессов.

Степень разработанности темы. Распыление жидких металлов при производстве металлических порошков стало применяться с 50-х годов прошлого века. Исследованиями в указанной области в разные периоды занимались О.С. Ничипоренко, Ю.И. Найда, А.Ф. Силаев. Однако сложность процессов распыления, сопровождающихся изменением свойств жидкости и характеризующихся неравномерностью параметров газовой струи, являлась причиной того, что выводы в работах данного периода характеризовались недостаточной конкретикой, а зачастую носили качественный характер. Применение современных вычислительных пакетов для моделирования гидродинамики и диспергирования жидкости в распылительном узле совместно с результатами экспериментальных исследований по распылению жидкого металла сегодня позволяют дать более точную оценку влияния различных факторов на условия и результат распыления.

В работе исследуется гидродинамика потоков высокотемпературной жидкости, движущейся под давлением по кварцевому каналу из камеры плавильного агрегата в распыляющую форсунку. С точки зрения используемой методики, представляет интерес выявление закономерностей между условиями процесса (давление наддува камеры, температура металла, природа и скорость струи распыляющего газа) и характеристиками получаемого материала. Детальное изучение влияния параметров процесса распыления на свойства порошков позволит с более высокой точностью задавать свойства продукции. Таким образом, исследование гидродинамики потоков высокотемпературной жидкости в гидropневмоагрегатах машин по производству микропорошков металлов на сегодняшний день является актуальным вопросом.

Объектом исследования является гидродинамика и процесс распада струй жидких металлов в газовых потоках.

Предметом исследования является взаимосвязь между техническими параметрами работы гидropневмоагрегатов машины по производству порошков, процессом движения высокотемпературных жидкостей, процессом дробления высокотемпературных жидкостей в газовых потоках и параметрами получаемых порошков.

Целью работы является создание гидropневмоагрегатов машины по получению порошков, предназначенных для использования в технологиях селективного лазерного спекания.

Задачи исследования:

1. Разработка гидропневмоагрегатов установки по получению порошков с заданными характеристиками на основе метода распыления жидкого металла газовой струей.

2. Разработка методики расчета диаграмм технологических режимов работы гидропневмоагрегатов установки по получению порошков методом распыления жидких металлов газовой струей.

3. Установление экспериментальных связей между параметрами процесса получения порошков распылением жидких металлов газовой струей и характеристиками получаемого порошка.

Методы исследования. В работе использованы методы численного моделирования газовой струи на основе пакетов ANSYS CFX, методы математического моделирования, эксперимент, методы теории вероятности и математической статистики при обработке эксперимента.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов, приведенных в работе, подтверждается следующим:

- использованием фундаментальных законов механики жидкостей и газов на основе уравнений Навье-Стокса для моделирования процессов;

- выполнением математических расчетов на основе классических законах гидромеханики (уравнение Бернулли);

- согласованием расчетов и результатов моделирования с экспериментальными данными.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана новая установка по получению порошков с заданными характеристиками на основе метода распыления жидкого металла газовой струей.

2. Разработана новая методика расчета диаграмм технологических режимов работы гидропневмоагрегатов установки по получению порошков методом распыления жидких металлов газовой струей.

3. Установлены новые экспериментальные связи между параметрами процесса получения порошков распылением жидких металлов газовой струей и характеристиками получаемого порошка.

Практическая значимость работы. Разработанный вычислительный алгоритм позволяет сформулировать требования, предъявляемые к оборудованию, используемому при получении порошков методом распыления жидких металлов. Предложенная методика позволяет выбирать режимы работы оборудования в зависимости от требований, предъявляемых к получаемым порошкам. Результаты работы могут быть использованы, как на действующих предприятиях по производству металлических порошков, так и при проектировании установок по распылению жидких металлов. Разработана новая установка по получению порошков с заданными характеристиками на основе метода распыления жидкого металла газовой струей.

Личный вклад. Результаты, приведенные в исследовании, получены лично автором. В ходе исследований разработана методика расчета диаграмм технологических режимов работы гидропневмоагрегатов установки по получению по-

рошков методом распыления жидких металлов газовой струей; разработана математическая модель движения струи высокотемпературной жидкости по каналу подачи в распылительный узел с учетом фазового перехода; разработана схема процесса распыления; разработана установка по получению порошков с заданными характеристиками на основе метода распыления жидкого металла газовой струей; проведены и статистически обработаны экспериментальные исследования по распылению жидких металлов, подтверждающие правильность расчетов и эффективность предложенного метода; выполнен анализ свойств получаемых порошков; выявлены связи между параметрами процесса распыления и характеристиками получаемого материала.

Материалы, на которых проводились исследования – жидкие расплавы меди и чугуна марки СЧ15, распыляющие газы – аргон и воздух. Оборудование – установка распыления металлов УРМ-001.

Предпосылками достижения цели стали:

а) Создание новой установки распыления металлов и сплавов УРМ-001 (патент №110312 от 20.11.2011) на базе НОЦ «Машиностроение и металлургия» ЮУрГУ.

б) Программа ЮУрГУ по разработке металлических порошков для технологии SLS-Selective Laser Sintering,

в) Работа, проводимая совместно с сотрудниками Национальной инженерной школой Сент-Этьенна (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, «Технология и установка для изготовления высокотехнологичных порошковых материалов, пригодных для использования в производстве сложных функциональных изделий методом селективного лазерного спекания», соглашение №14.В37.21.0759).

На защиту выносятся:

1. Установка по получению порошков с заданными характеристиками на основе метода распыления жидкого металла газовой струей.

2. Методика расчета диаграмм технологических режимов работы гидропневоагрегатов установки по получению порошков методом распыления жидких металлов газовой струей.

3. Экспериментальные связи между параметрами процесса получения порошков распылением жидких металлов газовой струей (давление наддува рабочей полости плавильного агрегата, температура жидкости, расстояния между срезом канала подачи металла и срезом форсунки) и характеристиками получаемого порошка.

Работа выполнена в рамках реализации программы развития Национального исследовательского университета ЮУрГУ, приоритетное направление развития №4 «Ресурсоэффективные технологии создания и эксплуатации комплексов морских баллистических ракет».

Апробация результатов работы. Основные результаты исследований, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на: 62-й Научной конференции «Наука ЮУрГУ» (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2010); XIV Международной конференции «Современные проблемы электрометаллургии стали»

(ЮУрГУ, г. Сатка, 2010); Всероссийской научно-технической конференции «Динамика машин и рабочих процессов» (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2012); Международной научно-технической молодежной конференции «Новые материалы и технологии глубокой переработки сырья – основа инновационного развития экономики России» (ВИАМ, г. Москва, 2012).

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 8 научных статьях; в том числе в 5, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК; в том числе публикация в журнале, входящем в базы данных Web of Science и Scopus, в ходе работы получены 2 патента на полезную модель: «Установка для распыления жидких металлов» (№110312 от 20.11.2011), «Установка для распыления жидких металлов» (№133445 от 20.10.2013).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 разделов, заключения, 6 приложений, списка использованных источников из 90 наименований. Общий объем работы составляет 147 страниц, 136 рисунков и 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, степень ее разработанности, определены цели и задачи исследования, формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе работы рассмотрены основные методы получения металлических порошков, проанализированы их достоинства и недостатки с точки зрения изготовления материалов, пригодных для использования в технологиях селективного лазерного спекания.

На основе анализа определено, что наиболее подходящим методом получения порошков, пригодных для использования в селективном лазерном спекании, является распыление жидких металлов.

Для получения материала, необходимого гранулометрического состава, а также для обеспечения процесса, характеризующегося мгновенным началом, окончанием процесса распыления и возможностью изменения скорости подачи жидкого металла в распыляющую форсунку, в работе использовалась схема с вертикальным вытеснением жидкого металла в распылительную форсунку.

Во второй главе диссертации описаны и рассчитаны механизм вытеснения высокотемпературной жидкости из герметичной рабочей полости плавильного агрегата и механизм распыления жидкости в газовой струей.

Моделирование газовой струи пневмоагрегата (распылительной форсунки – рисунок 1) для воздуха и аргона при различных температурах проводилось в пакете ANSYS CFX. В расчете использовалась стандартная k-ε-модель турбулентности для идеального газа.

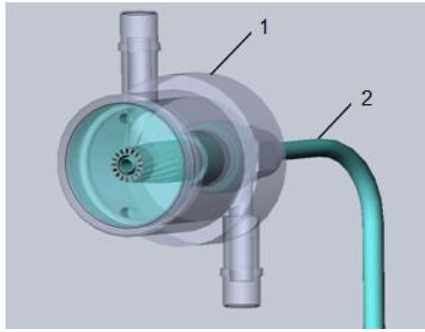


Рисунок 1. Схема распылительного узла установки распыления металлов УРМ-001:1 – распылительная форсунка, 2 – канал подачи жидкого металла

Результаты моделирования струи воздуха с начальной температурой 27 °С представлены на рисунке 2.

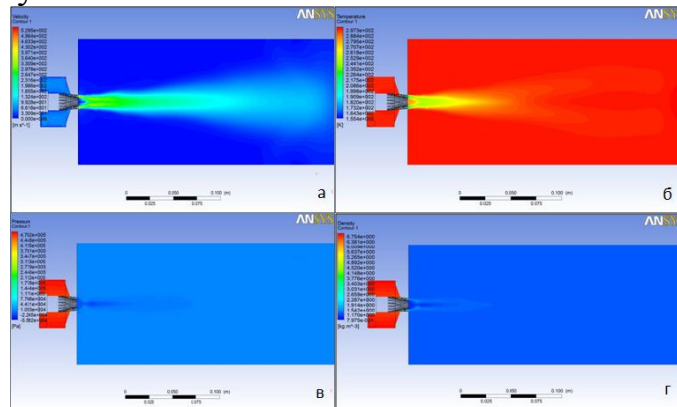


Рисунок 2. Изменение характеристик струи воздуха на выходе из форсунки (скорость (а), температура (б), давление в струе (в), плотность газа (г)) (начальная температура газа 27 °С)

По результатам моделирования были определены зависимости основных параметров газовой струи от расстояния (L) до среза форсунки ($v_r = v_r(L)$, $T_r = T_r(L)$, $P_r = P_r(L)$, $\rho_r = \rho_r(L)$) и сформулированы граничные условия (1),(2) для математической модели для схемы с принудительной подачей жидкости в распылительную форсунку (рисунок 3).

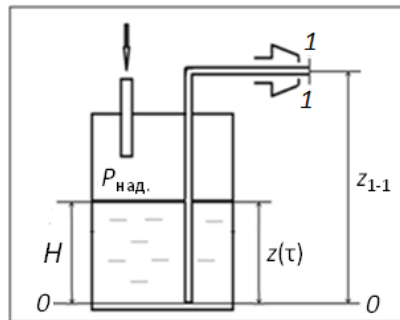


Рисунок 3. Схема принудительной подачей жидкости в распылительную форсунку

$$P_{0-0} = P_{\text{над.}} + \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot z(\tau), \quad (1)$$

$$P_{1-1} = P_a(L), \quad (2)$$

где P_{0-0} – давление в сечении 0-0, Па; $P_{\text{над.}}$ – давление наддува рабочей полости плавильного агрегата, Па; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свобод-

ного падения, m/c^2 ; $z(\tau)$ – зависимость уровня зеркала металла относительно входа в канал подачи расплава от времени, м; P_{1-1} – давление в сечении 1-1, Па.

Результатом использования математической модели, а также замыкающих зависимостей и ограничений процесса (3) – (9) являются зависимость скорости, обеспечивающей дробление жидкости от требуемых размеров капель (рисунок 4); зависимость температуры жидкости на выходе из канала подачи в распылительную форсунку от скорости движения жидкости по каналу подачи (рисунок 5); зависимость скорости движения жидкости по каналу подачи от давления наддува рабочей полости плавильного агрегата (рисунок 6); диаграммы технологических режимов работы гидropневмоагрегатов (рисунок 7).

$$q_{\Sigma} = q_{\text{еііá}} + q_{\text{еіе}}, \quad (3)$$

где q_{Σ} – суммарный удельный тепловой поток, $Вт/м^2$; $q_{\text{конв}}$ – удельный тепловой поток за счет конвекции, $Вт/м^2$; $q_{\text{изл}}$ – удельный тепловой поток за счет излучения, $Вт/м^2$.

$$G_{\text{м}} \cdot c_{\text{р}} \cdot (T_{\text{вх}} - T_{\text{вых}}) = q_{\Sigma} \cdot F_{\text{ж}}, \quad (4)$$

где $G_{\text{м}}$ – массовый расход жидкости, $кг/с$; $c_{\text{р}}$ – удельная теплоемкость жидкости, $Дж/(кг \cdot ^\circ\text{C})$; $T_{\text{вх}}$ – температура жидкости на входе в канал подачи, $^\circ\text{C}$; $T_{\text{вых}}$ – температура жидкости на выходе из канала подачи в распылительную форсунку, $^\circ\text{C}$; $F_{\text{ж}}$ – площадь поверхности жидкости, $м^2$.

$$W^{d_{\text{к}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \sigma_{\text{ж}}}{\tilde{n}_{\text{г}} \cdot \rho_{\text{г}} \cdot d_{\text{к}}}}, \quad (5)$$

где $W^{d_{\text{к}}}$ – минимальная скорость струи, при которой величина напора газа позволяет получать капли размером $d_{\text{к}}$, $м/с$; $\sigma_{\text{ж}}$ – поверхностное натяжение жидкого металла, $Н/м$; $c_{\text{ф}}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления капли ($c_{\text{ф}}=1$); $\rho_{\text{г}}$ – плотность газа, $кг/м^3$; $d_{\text{к}}$ – диаметр капли, $м$.

$$\tau_{\text{др.}} = \frac{\pi}{4} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}} \cdot d_0^3}{2 \cdot \sigma_{\text{ж}}}}, \quad (6)$$

где $\tau_{\text{др.}}$ – время дробления капли, $с$; d_0 – радиус первоначально образующейся капли, $м$.

$$\tau_{\text{сф}} = \frac{1,785 \cdot \pi \cdot d_{\text{к}} \cdot \mu_{\text{ж}}}{2 \cdot \sigma_{\text{ж}}}, \quad (7)$$

где $\tau_{\text{сф}}$ – время сфероидизации капли, $с$; $\mu_{\text{ж}}$ – динамическая вязкость, $Па \cdot с$.

$$\tau_{\text{охл}} = \frac{c_{\text{р}} \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot d_{\text{к}}^2}{6 \cdot \text{Nu} \cdot \lambda_{\text{г}}} \ln \frac{T_{\text{м}} - T_{\text{г}}}{T_{\text{к}} - T_{\text{г}}}, \quad (8)$$

где $\tau_{\text{охл}}$ – время охлаждения капли, $с$; $\lambda_{\text{г}}$ – коэффициент теплопроводности газа, $Вт/(м \cdot ^\circ\text{C})$; $T_{\text{м}}$ – температура жидкого металла, $^\circ\text{C}$; $T_{\text{г}}$ – температура распыляющего газа, $^\circ\text{C}$; $T_{\text{к}}$ – конечная температура капли, $^\circ\text{C}$.

$$\tau_{\text{кр}} = \frac{\lambda_{\text{кр}} \cdot d_{\text{к}}^2 \cdot \rho_{\text{ж}}}{6 \cdot \text{Nu} \cdot \lambda_{\text{г}} \cdot (T_{\text{кр}} - T_{\text{г}})}, \quad (9)$$

где $\lambda_{кр}$ – удельная теплота кристаллизации, Дж/кг; $T_{кр}$ – температура кристаллизации, °C; Nu – число Нуссельта.

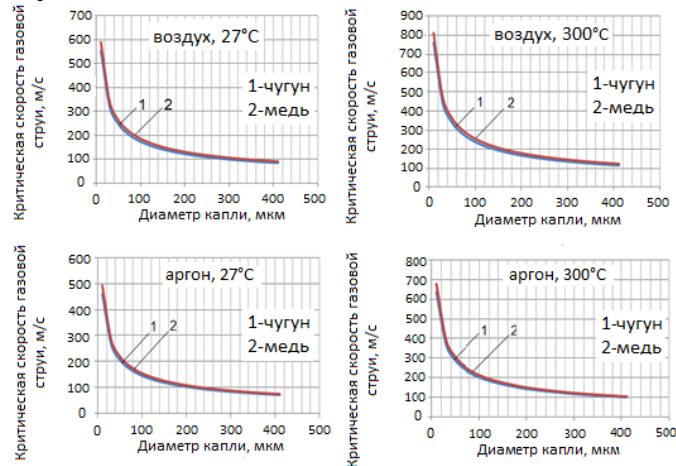


Рисунок 4. Зависимость скорости, обеспечивающей дробление жидкости, от требуемых размеров капель

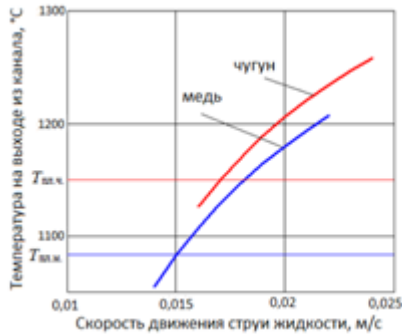


Рисунок 5. Зависимость температуры жидкости на выходе из канала подачи от скорости движения

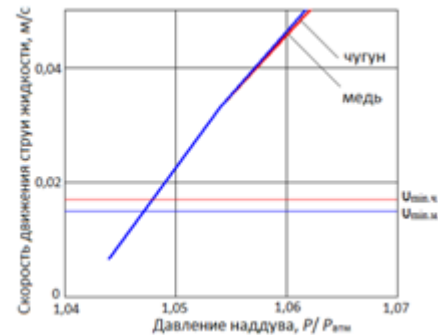


Рисунок 6. Зависимость скорости движения жидкого металла по каналу подачи от давления наддува рабочей полости плавильного агрегата

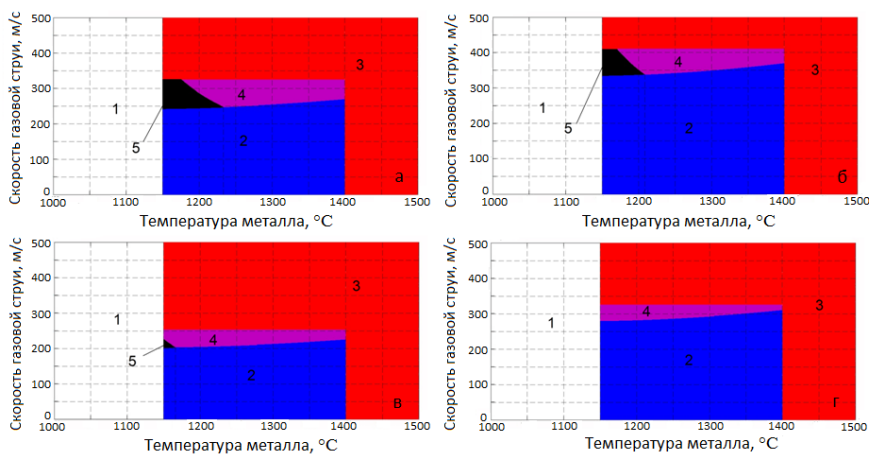


Рисунок 7. Диаграмма технологических режимов работы гидропневмоагрегатов установки при распылении жидкого чугуна в струе газа (а – воздух (27 °C), б – воздух (300 °C), в – аргон (27 °C), г – аргон (300 °C)): 1 – распыление невозможно, 2 – недостаточная степень дробления расплава, 3 – технологические ограничения оборудования, 4 – достаточные условия, 5 – преждевременное затвердевание капель металла в процессе распыления

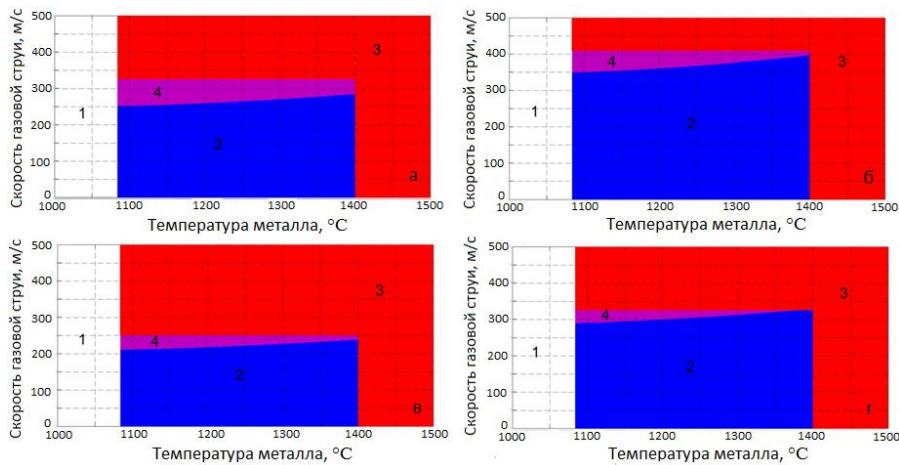


Рисунок 8. Диаграмма технологических режимов работы гидропневмоагрегатов установки при распылении жидкой меди в струе газа (а – воздух (27 °С), б – воздух (300 °С), в – аргон (27 °С), г – аргон (300 °С)): 1 – распыление невозможно, 2 – недостаточная степень дробления расплава, 3 – технологические ограничения оборудования, 4 – достаточные условия

По результатам анализа рисунков 5, 6 был сделан вывод о том, что минимальная скорость движения жидкости по каналу подачи в распылительную форсунку, при которой не происходит застывание металла, для чугуна и меди будет обеспечена при давлении наддува рабочей полости плавильного агрегата 1,05 атм.

Рисунки 7, 8 позволяют выбирать сочетание технологических параметров установки распыления для получения порошков с пиком на кривой распределения частиц по размерам в области 50 мкм.

В третьей главе описано оборудование, на котором была реализована опытная часть работы, и методика исследования свойств микропорошков. На рисунке 9 показана схема установки распыления жидких металлов УРМ-001.

В плавильной печи 1 осуществляется расплавление металла, с помощью накопительной емкости 12 и клапана большого проходного сечения 11 осуществляется последующий ударный наддув герметичной рабочей полости печи 2 сжатым газом, который вытесняет расплав по каналу 3 подачи расплавленного металла в распылительную форсунку 4. В распылительную форсунку 4 подают сжатый газ с регулируемым давлением на входе. При истечении газа из форсунки 4 через кольцевой канал 5 формируется кольцевая сходящаяся газодинамическая струя, которая взаимодействует с расплавом, подаваемым в центральную часть струи. В результате динамического контакта с газовым потоком происходит распыление расплава на капли, которые при этом резко охлаждаются и ускоряются газодинамической струей.

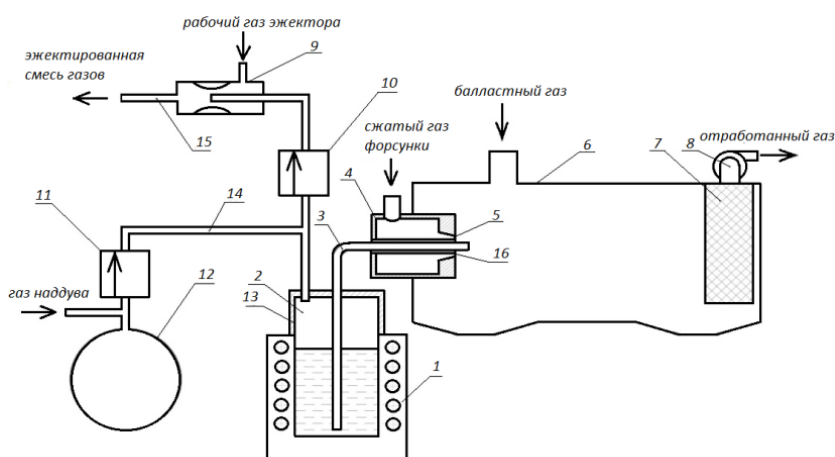


Рисунок 9. Схема установки распыления жидких металлов УРМ-001: 1 – плавильная печь, 2 – герметичная рабочая полость, 3 – вертикальный канал подачи расплава, 4 – распылительная форсунка, 5 – кольцевой канал выхода газа, 6 – бункер, 7 – рукавный фильтр, 8 – вытяжной вентилятор, 9 – эжектор, 10, 11 – управляющие клапаны, 12 – накопительная емкость со сжатым газом, 13 – герметизирующая крышка, 14, 15 – каналы подвода и отвода вытесняющего газа, 16 – центральное сквозное отверстие

Основные узлы установки УРМ-001 показаны на рисунке 10.



Рисунок 10. Основные технологические узлы установки УРМ-001: а – блок управления, б – плавильная печь, в – компрессор, г – распылительная форсунка

Основными характеристиками порошков, рассматриваемыми в работе, были: гранулометрический состав, форма частиц, текучесть, насыпная плотность, структура металла (наличие или отсутствие полых частиц). В работе проводилось сравнение порошков, полученных на установке УРМ-001 с порошком Stainless Steel Powder 316L (SSP 316L), рекомендованным для использования в технологиях селективного лазерного спекания (рисунок 11).

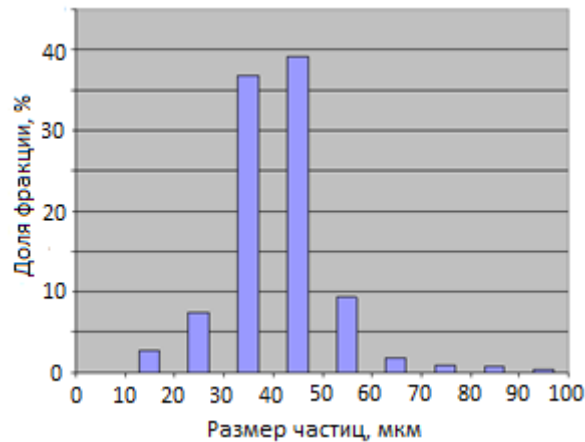


Рисунок 11. Гранулометрический состав порошка SSP 316L

Гранулометрический состав порошков, полученных на установке УРМ-001, определяли методом ситового анализа.

Оценка формы частиц производилась с помощью микроскопа Olympus BX-51. В качестве объекта исследования выступали проекции частиц из положения наибольшей устойчивости (ГОСТ 25849-83) – изображение на экране микроскопа. Одним из основных факторов, используемым для оценки формы частиц было отношение максимального линейного размера проекции частицы (l_{\max}) к ее минимальному размеру (l_{\min}).

Текучесть и насыпная плотность определялись методом воронки. Для сравнения значения насыпной плотности различных материалов вводилась величина относительной насыпной плотности, т.е. отношение насыпной плотности порошков к плотности металлов.

Для определения структуры частиц порошка в работе применяли растровый микроскоп JSM-6400LV. Анализ проводился как на порошке, так и на шлифе порошка. Для изготовления шлифа использовался комплект полуавтоматического отрезного и шлифовально-полировального оборудования фирмы Struers (Германия).

В четвертой главе работы проводится анализ результатов экспериментов по распылению высокотемпературных жидкостей газовой струей (рисунок 12).



Рисунок 12. Процесс распыления жидкого металла в УРМ-001

Данные экспериментов (рисунок 13а) свидетельствуют о том, что при повышении температуры перегрева жидкого чугуна от 50 до 200 °С содержание фрак-

ции менее 50 мкм увеличилась с 34,7 до 40,4%, при повышении температуры перегрева жидкой меди от 70 до 270 °С – с 34,1 до 37,8%. Малое влияние нагрева для жидкой меди, по-видимому, объясняется большей в сравнении с чугуном величиной теплоты кристаллизации меди, которая увеличивает вероятность дробления металла до необходимых размеров до момента затвердевания металла.

Одним из важных технологических параметров процесса, влияющих на гранулометрический состав получаемого порошка (рисунок 13б), является значение давления наддува герметичной рабочей полости печи. Опыты показали, что повышение давления наддува герметичной рабочей полости печи, с одной стороны увеличивает расхода металла, а, следовательно, производительность процесса, с другой – ведет к укрупнению получаемого порошка, что связано уменьшением удельного расхода газа-распылителя. В то же время, следует учитывать, что минимальное значение скорости движения жидкости лимитируется необходимостью поддержания режима охлаждения, при котором не происходит застывание металла в канале.

Результаты опытов показали, что увеличение расстояния между срезом канала подачи металла и срезом распыляющей форсунки уменьшает эффективность дробления струи металла. Так, при увеличении расстояния от 0 мм до 10 мм, в среднем, содержание фракции размером менее 50 мкм при распылении чугуна в струе воздуха снизилась с 65,7 до 21,9%, при распылении меди – с 58,1 до 20,6 % (рисунок 13в).

Основная доля частиц, полученных в экспериментах, имела монолитную структуру без внутренних полостей.

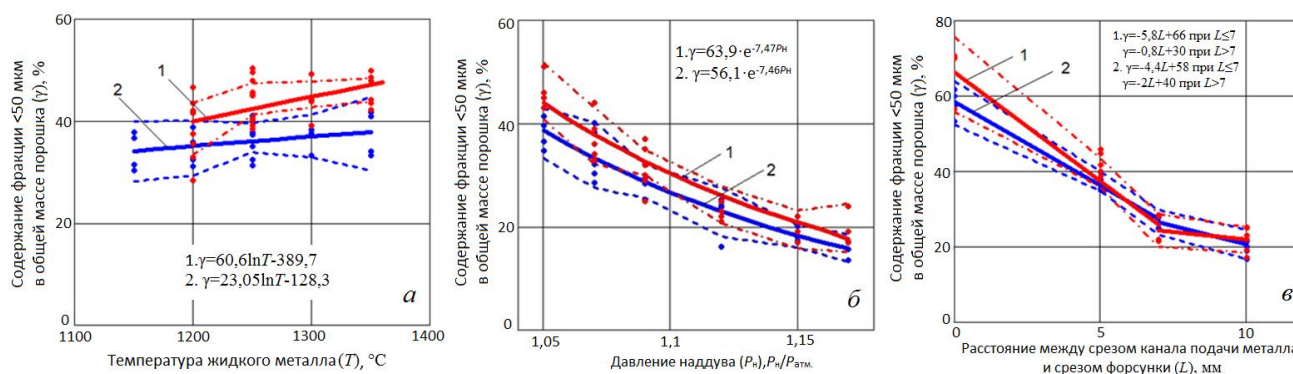


Рисунок 13. Зависимость содержания фракции размером менее 50 мкм в общей массе порошка, полученного распылением жидкого чугуна (1) и жидкой меди (2) в струе воздуха от температуры (а), от давления наддува (б), от расстояния между срезом канала подачи металла и срезом форсунки (в)

Гранулометрический состав порошков (рисунок 14), полученных в ходе экспериментов при различных сочетаниях давления наддува рабочей полости плавильного агрегата ($P_{\text{над}}$) температуры жидкого металла на входе в канал подачи ($T_{\text{вх}}$) и расстояния между срезом канала подачи металла и срезом форсунки (L), характеризуется явно выраженным пиком в области фракции 50 мкм, что соответствует гранулометрическому составу порошка SSP 316L.

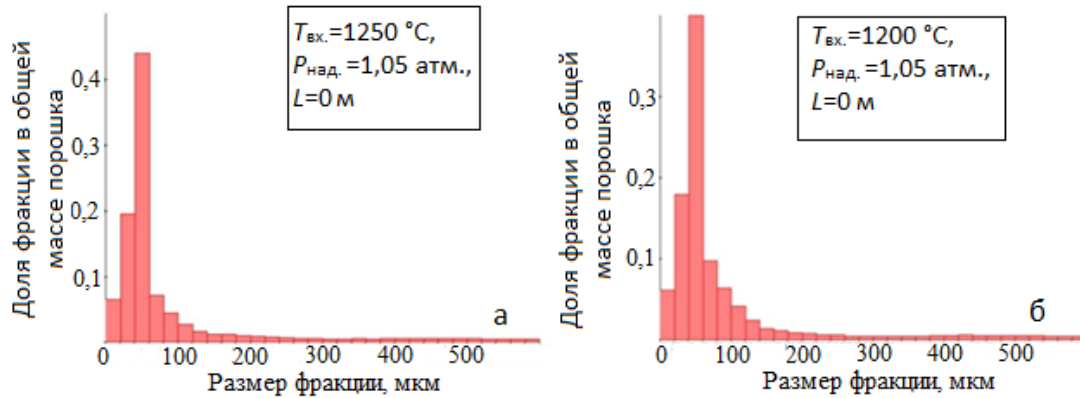


Рисунок 14. Гранулометрический состав порошка, полученного распылением жидкого чугуна (а) и жидкой меди (б) в струе воздуха

Анализ проекций, текучести и относительной насыпной плотности порошков (таблица 1) показал, что форма порошков, полученных распылением чугуна, несколько отличается от формы порошка SSP 316L. В то же время, форма частиц, полученных распылением меди, по основным параметрам превосходит SSP 316L.

Таблица 1 – Характеристики формы порошков

Материал	Газ-распылитель	I_{\max}/I_{\min}	Относительная насыпная плотность	Текучесть, с
Чугун	воздух	1,8	0,45	26
	аргон	1,7	0,48	18
Медь	воздух	1,2	0,57	12
	аргон	1,2	0,58	10
SSP 316L	—	1,3	0,53	12

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования решена актуальная научная задача и получены следующие основные результаты:

1. Разработана установка по получению порошков с заданными характеристиками на основе метода распыления жидкого металла газовой струей.
2. Разработана методика расчета диаграмм технологических режимов работы гидропневмоагрегатов установки по получению порошков методом распыления жидких металлов газовой струей.
3. Установлены экспериментальные связи между параметрами процесса получения порошков распылением жидких металлов газовой струей и характеристиками получаемого порошка.

Продолжением исследований, проводимых в работе, стала разработка схемы распыления металлических расплавов, включающая бесконтактное плавление металла (№133445 от 20.10.2013), и создание установки получения металлических порошков УРМ-002.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикация в журнале, входящем в базе данных Web of Science и Scopus:

1. Лыков, П.А. Механизм формирования частиц порошка при диспергировании расплавов различных металлов / П.А. Лыков, Е.В. Сафонов, А.О. Шульц // *Металлург.* – 2013. – № 3. – С. 84–87.

Публикации в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

2. Определение технологических параметров получения металлических ультрадисперсных порошков / П.А. Лыков, К.А. Бромер, В.Е. Роцин, С.А. Брындин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». – 2011. – Вып. 16. – № 14(231). – С. 17–19.

3. Лыков, П.А. Влияние технологических параметров распыления металлических расплавов на гранулометрический состав порошка и форму частиц порошка / П.А. Лыков, В.Е. Роцин, Е.И. Воробьев // Известия ВУЗов. Серия «Черная металлургия». – 2012. – №6. – С. 21–23.

4. Получение металлических микропорошков газодинамическим распылением / П.А. Лыков, Е.В. Сафонов, К.А. Бромер, А.О. Шульц // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2012. – Вып. 20. – № 33(293). – С. 107–112.

5. Моделирование процесса распыления расплава в газовой струе / П.А. Лыков, Р.М. Байтимеров, Е.В. Сафонов, А.О. Шульц // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Машиностроение». – 2013. – Т. 3, № 2. – С. 148–154.

Публикации в трудах конференций:

6. Лыков, П.А. Требования к металлическим микропорошкам, предназначенным для изготовления деталей методом прямого прототипирования, и методы их обеспечения. / П.А. Лыков, В.Е. Роцин // Материалы 62-й научной конференции «Наука ЮУрГУ», секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2010. – Т.3. – С.40–43.

7. Получение металлических микропорошков методом закалки жидкого состояния для получения изделий сложной формы послойным лазерным спеканием. / П.А. Лыков, Е.В. Роцин, А.В. Роцин, С.А. Брындин // Современные проблемы электрометаллургии стали: материалы XIV Международной конференции / под редакцией В.Е. Роцина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2010 – Ч.1. – С.167–169.

8. Оборудование для получения ультрадисперсных порошков / П.А. Лыков, Е.В. Сафонов, А.О. Шульц, К.А. Бромер // Динамика машин и рабочих процессов: сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2012. – С. 138–141.