

Отзыв

официального оппонента доктора технических наук Соколова Юрия Алексеевича на диссертационную работу Ягодина Максима Геннадьевича «Исследование процесса и разработка технологии производства мелкодисперсных гранул жаропрочных никелевых сплавов для производства дисков газотурбинных двигателей», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 - Порошковая металлургия и композиционные материалы

Актуальность работы

На современном этапе развития промышленности на передний план выходят новые инновационные технологии создания изделий, в которых реализуется возможность управления структурой и свойствами материалов. В настоящее время расширяется сфера применения порошковой металлургии в авиационной отрасли. В связи с модернизацией авиадвигателей поколения «4» и «4+», разработкой перспективных авиадвигателей пятого поколения типа ПД14 и его модификаций, ПД35, ПД50, наблюдается тенденция к использованию мелкодисперсных порошков правильной сферической формы крупностью менее 70 микрон.

Цель диссертационной работы Ягодина Максима Геннадьевича состоит в теоретическом обосновании, практической разработке технологии производства мелкодисперсных порошков для критических деталей авиационной промышленности. Материалом исследования в работе выбран перспективный жаропрочный никелевый сплав ВВ751П. Учитывая, что сопротивление малоциклового усталости и прочность материала напрямую зависят от микроструктуры материала дисков авиадвигателей, а, следовательно, и от крупности порошков, разработка технологии получения изделий из мелкодисперсных порошков жаропрочного никелевого сплава ВВ751П является актуальной. Результаты диссертационной работы способствуют усилению конкурентных позиций России, в том числе, в области авиационной промышленности.

Структура диссертации

Диссертация, изложенная на 168 страницах машинописного текста, состоит из введения, 5-ти глав, выводов, библиографического списка, включающего 112 наименований, приложения. По структуре и оформлению работа соответствует

требованиям, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата технических наук. Работа написана достаточно чётким языком, логично изложена.

В *первой главе*, помимо литературного обзора по теме диссертационного исследования, рассмотрены технологические особенности получения порошков из жаропрочных никелевых сплавов, предоставлен анализ предмета исследования и обоснование выбора направлений работы. Приведено много материалов, отвечающих современному состоянию исследований по рассматриваемому направлению. Установлено, что метод плазменной плавки и центробежного распыления литой заготовки с последующей физико-механической обработкой является наиболее рациональным для получения мелкодисперсного порошка высокого качества.

Во *второй главе* приведены методики исследования качества порошка сплава класса ВВП крупностью 50÷70 микрон; определения количественного содержания газовых примесей в массе порошка, фракционного состава порошка, химического состава, текучести, угла естественного откоса, наличия неметаллических включений в массе порошка; изготовления и термической обработки компактных образцов из порошков; засыпки и термической дегазации порошка в капсуле; исследования компактных образцов на растяжение; ударную вязкость, длительную прочность; на сопротивление малоцикловой усталости и др.

В *третьей главе* выполнены экспериментальные исследования мелкодисперсного порошка и компактных образцов из них. Определены технологические режимы получения мелкодисперсного порошка из сплава ВВ751П. Выполнено исследование количественного содержания кислорода в массе мелкодисперсного порошка.

В *четвертой главе* выполнены теоретические исследования процессов получения порошка методом PREP и физико-механической обработки порошков. Впервые предложена зависимость диаметра частицы при ее отрыве от быстровращающейся заготовки от частоты вращения, учитывающая фактор скорости плазменной струи. Весьма интересны аналитические зависимости движения частиц порошка при проведении операции классификации по крупности.

Пятая глава посвящена практической реализации полученных результатов. При рассмотрении цикла производства порошка крупностью менее 70 микрон отмечена важность следующих технологических операций: предварительная подготовка исходного материала для производства порошка (вакуумный отжиг); процесс получения порошка; физико-механическая обработка; контроль качества порошка.

Научная новизна работы

В качестве научной новизны диссертационной работы можно выделить разработку технологических режимов получения мелкодисперсного порошка методом PREP. Автором установлено, что крупность порошка, помимо скорости вращения заготовки, зависит также от скорости плазменной струи и расстояния между торцом оплаиваемой заготовки и плазмотроном.

В работе впервые предложена формула, учитывающая скорость плазменной струи при прогнозировании диаметра частиц. Выведена также формула для расчета расширения ячейки сетки в зависимости от размера порошка, модуля упругости, размера ячейки сетки и среды классификации по крупности на ситах с горизонтальным расположением полотна.

Практическая значимость полученных результатов

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке рекомендаций по выбору технологических режимов процессов плазменной плавки и центробежного распыления, а также процесса классификации по крупности. Мелкодисперсные порошки крупностью менее 70 мкм из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П, впервые полученные по технологии PREP, был использован для изготовления 10 типоразмеров турбинных и компрессорных дисков перспективного авиационного двигателя ПД14 самолета МС21, что подтверждено соответствующим Актом от 20 августа 2020 года.

Кроме этого, разработан способ, включающий классификацию и электростатическую сепарацию для удаления различных инородных включений на всех этапах технологии получения порошка, что позволило снизить в них содержание кислорода на 20%.

По результатам диссертационной работы была разработана и уточнена следующая технологическая документация:

- карта опыта КО-2 «Производство заготовок дисков из гранул жаропрочного никелевого сплава марки ВВ751П»;
- карта опыта КО-15 «Производство заготовок дисков шифров ДП678, ДП774, ДП776 из гранул крупностью менее 70 мкм жаропрочного никелевого сплава ВВ751П, изготовленных на установке УЦР-6/УЦР-2»;
- технологические инструкции ТИ36-20 «Производство гранул жаропрочных никелевых сплавов методом плазменной плавки и центробежного распыления

вращающейся литой заготовки на установках УЦР», ТИЗ6-02 «Классификация по крупности гранул жаропрочных никелевых сплавов на установке КРП-3», ТИЗ6-22 «Электростатическая сепарация гранул жаропрочных никелевых сплавов на установка СЭЗ2/50 (ЭСС-1)», ТИЗ6-06 «Вакуумная термическая дегазация гранул жаропрочных никелевых сплавов в движущемся потоке с одновременным заполнением, уплотнением и герметизацией капсул на установках УЗГК»;

- технико-экономическая карта №042-0054гр на производство порошка крупностью менее 70 микрон из сплава ВВ751П.

Достоверность результатов диссертации подтверждается также их широкой научно-общественной экспертизой. М.Г. Ягодин является автором 8 публикаций по теме настоящего исследования, в том числе 6 – в изданиях, рекомендуемых перечнем ВАК РФ, также и участником российских конференций, что может служить положительной оценкой компетентности и важности настоящего исследования.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается системным подходом при решении поставленных задач, который включает теоретическую проработку вопроса с последующим комплексом экспериментальных исследований. Для решения поставленных задач использованы современные методы исследований и современная измерительная аппаратура. В работе представлены материалы по исследованию характеристик полученных изделий. Анализ содержания диссертационной работы Ягодина М.Г. позволяет сделать вывод, что сформулированные задачи исследования – решены и цель работы – достигнута.

Автореферат диссертации

Автореферат диссертации оформлен в соответствии с требованиями ВАК РФ. Его содержание отражает основные положения и результаты диссертации.

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на российских научно-технических конференциях. По результатам выполненных исследований опубликовано 8 печатных работ. Перечень опубликованных автором работ показывает его высокую квалификацию.

Замечания по работе

Диссертационная работа не лишена недостатков и замечаний, среди которых можно выделить следующее:

1. В качестве базового инструмента для математического моделирования процесса получения порошка методом PREP предложены аналитические зависимости. В то же время в работе не упоминается возможность численного исследования процесса PREP. Современные программные пакеты инженерного анализа (Abaqus, Ansys, Deform, Oform) позволяют выполнить моделирование процессов получения порошка. Сравнение результатов виртуального моделирования и аналитических зависимостей способствовало бы повышению точности прогнозирования параметров производственного процесса.
2. В работе недостаточное внимание уделено исследованию адекватности впервые полученной формулы для расчёта диаметра порошка в зависимости от частоты вращения литой заготовки и скорости плазменной струи. Например, отсутствуют экспериментальные данные, отражающие зависимость диаметра частиц от скорости плазменной струи.
3. На стр. 108 в таблице №31 приведены данные расчета размера частиц при плазменном распылении заготовки диаметром 80 мм из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П с физическими характеристиками при температуре плавления, а именно: плотность $\rho = 8800 \text{ кг/м}^3$, коэффициент поверхностного натяжения $\sigma = 1,735 \text{ Н/м}$, температура плазменной струи 5000 К. При расчёте необходимо указывать источники, откуда взяты значения температуры плазменной струи, теплофизических и других параметров исследуемого сплава, функциональные зависимости параметров от температуры.
4. Предложен механизм влияния динамического фактора плазменной струи на дробление пленки расплава на частицы при центробежном способе распыления. Предложена формула (4.15), учитывающая влияние на диаметр частиц частоты вращения заготовки, расхода газа при подаче на плазмотрон, зазора между торцом литой заготовки и плазмотроном. В то же время, кроме влияния частоты вращения заготовки на размер частиц, влияния других параметров технологического процесса в работе не рассмотрено. Таким образом, новые механизмы управления технологическим процессом получения порошка методом PREP, требуют дополнительной экспериментальной проверки.
5. Технологические исследования должны содержать перечень мероприятий по совершенствованию технических решений, параметров специализированного оборудования, предназначенного для реализации технологии. В работе не систематизированы или отсутствуют рекомендации по модернизации

специализированного оборудования, его отдельных узлов на основании прикладных исследований.

6. В диссертационной работе присутствует некоторая небрежность оформления, орфографические и стилистические ошибки. Необходимо более чётко определиться с терминологией, например, для обозначения одного понятия встречаются различные термины: "гранулы", "порошок-гранулы".

Отмеченные замечания принципиально не влияют на научную и практическую значимость, а также на достоверность полученных результатов, основных выводов и защищаемых положений диссертации. М.Г. Ягодин выполнил большой объем теоретической и прикладной работы, предложил аналитические зависимости для прогнозирования диаметра частиц.

Заключение

На основании проведенного анализа диссертационной работы Ягодин М.Г. «Исследование процесса и разработка технологии производства мелкодисперсных гранул жаропрочных никелевых сплавов для производства дисков газотурбинных двигателей», можно сделать заключение, что она представляет собой завершённую научную квалификационную работу, выполненную по актуальной проблеме.

Автором разработана технология производства порошка из сплава ВВ751П крупностью менее 70 микрон для производства дисков и валов нового газотурбинного двигателя ПД14 и его модификаций. При этом выход годного при производстве порошков-гранул крупностью менее 70 мкм при плазменном центробежном распылении повышен с 80 до 84,1%. Результаты работы, представленные в диссертации М.Г. Ягодина, открывают новые возможности по созданию порошковых изделий для авиационной промышленности с заданной структурой и заранее прогнозируемыми свойствами.

С учетом актуальности, научной новизны, практической ценности, а также объёма выполненного эксперимента по расчётам и анализу полученных результатов, рассматриваемая диссертационная работа соответствует требованиям п.п. 9 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утв. Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013г. № 842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, и является завершённой научной квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для развития порошковой металлургии и, конкретно, технологии получения изделий для авиадвигателей пятого поколения.

Автор работы Ягодин Максим Геннадьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.06 – «Порошковая металлургия и композиционные материалы».

Официальный оппонент,
доктор технических наук



Ю.А. Соколов

01.12.2020
Соколов Юрий Алексеевич, заместитель коммерческого директора
ПАО «Электромеханика», доктор технических наук, 05.16.06 – порошковая металлургия
и композиционные материалы;

Публичное акционерное общество «Электромеханика»,
Адрес: 172386, Россия, Тверская область, г. Ржев, Заводское шоссе, 2;
8 (482) 322 11 79 – служебный тел.,
E-mail: s5577@inbox.ru

Подпись Соколова Ю.А. заверяю

