

На правах рукописи



ЯГОДИН Максим Геннадьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА И РАЗРАБОТКА
ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ
ГРАНУЛ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ
ПРОИЗВОДСТВА ДИСКОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные
материалы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2020 г.

Работа выполнена в научно-производственном комплексе «Производство продукции из жаропрочных сплавов и специальных сталей» Открытого акционерного общества «Всероссийский институт легких сплавов».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гарибов Генрих Саркисович

Официальные оппоненты: **Соколов Юрий Алексеевич**
доктор технических наук,
ПАО «Электромеханика»,
заместитель генерального директора

Востриков Алексей Владимирович
кандидат технических наук,
ФГУП «ВИАМ», начальник научно-исследовательского Отделения

Ведущая организация: АО «Композит», г. Королев.

Защита диссертации состоится «22» декабря 2020 г. в 15 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.15 в ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 121552, г. Москва, ул. Оршанская, д. 3., ауд. 307Б. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, А-80, ГСП-3, МАИ, ученому секретарю диссертационного совета Скворцовой Светлане Владимировне и по электронной почте skvorcovasv@mati.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Университета и на сайте https://mai.ru/upload/iblock/54c/Disertatsiya_YAgodin.pdf

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета

Скворцова С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одним из приоритетных направлений развития технологии машиностроения в настоящее время является совершенствование существующих и разработка новых безотходных, материалосберегающих производственных процессов. В решение этой проблемы определенная роль принадлежит металлургии гранул. Сегодня процесс находится в стадии инновационного совершенствования.

В настоящее время расширяется сфера применения этой технологии, основанной в нашем институте, в различных областях техники, совершенствуется ее технология.

В связи с созданием двигателей пятого поколения типа ПД14 и его модификаций, ПД35, ПД50, ПД8 и других наблюдается тенденция к использованию мелкодисперсных порошков-гранул правильной сферической формы крупностью менее 70 мкм, а также новых жаропрочных никелевых сплавов, разработанных в ОАО «ВИЛС» в последнее время, таких как ВВ750П, ВВ751П, ВВ752П, диски и валы из которых имеют более высокие эксплуатационные характеристики при комнатной и рабочей температурах.

В связи с изложенным, исследования по производству мелкодисперсных порошков-гранул и разработка технологии их изготовления и апробация являются весьма актуальными.

Проектируя авиадвигатель, конструкторы особое внимание уделяют проблемам ресурса, топливной эффективности, тяговооруженности, которые напрямую связаны с характеристиками сопротивления малоцикловой усталости (МЦУ) и прочностными характеристиками материала дисков. При создании двигателя ПД14 требования по сопротивлению МЦУ были повышены более чем в три раза, по прочности – на 11-13% выше. Это позволит в процессе эксплуатации увеличить ресурс изделий (дисков и валов) для горячей части турбины. Аналогичные требования по конструкционной прочности заявлены

при создании материала дисков перспективного двигателя ПД35, к изготовлению которых приступили ОАО «ВИЛС» и АО «СМК».

Учитывая, что сопротивление МЦУ и прочность материала напрямую зависят от микроструктуры материала дисков авиадвигателей, а, следовательно, и от крупности порошков-гранул, при том, что инородные включения являются потенциальными источниками зарождения трещин, разработка технологических параметров их производства из современного жаропрочного никелевого сплава ВВ751П является весьма актуальной. Задача состоит в их высокопроизводительном, высококачественном изготовлении с максимальным выходом годного. Задача состоит в уменьшении крупности исходных порошков-гранул и удалении инородных включений.

Аналитические расчеты параметров плазменного центробежного распыления и классификации порошков-гранул заданной крупности являются необходимыми и эффективными для решения поставленной задачи.

Цель и задачи:

Цель диссертационной работы состояла в установлении влияния технологических параметров изготовления и физико-механической обработки порошков-гранул из нового жаропрочного никелевого сплава ВВ751П на их крупность и свойства и разработке на этой основе комплексной технологии производства мелкодисперсных гранул.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

1. Провести анализ существующих методов изготовления порошков и гранул, и выбрать наиболее оптимальный.
2. Рассмотреть основные параметры процессов и условия их проведения, влияющие на размер и качество полученных порошков-гранул.
3. Изучить свойства порошков-гранул крупностью менее 70 мкм.
4. Изучить свойства и структуру компактного материала из полученных

порошков-гранул.

Научная новизна.

1. Установлено, что при плазменном центробежном распылении, наряду с зависимостью крупности порошков-гранул от частоты вращения литой заготовки, их крупность зависит также от скорости плазменной струи (расхода газа). Предложена формула, учитывающая скорость плазменной струи при расчете диаметра частиц порошков-гранул.

2. Выведена формула для расчета расширения ячейки сетки в зависимости от размера порошков-гранул, модуля упругости, размера ячейки сетки и среды классификации по крупности на ситах с горизонтальным расположением полотна.

3. Установлено, что содержание кислорода в порошках-гранулах крупностью менее 70 мкм, изготовленных методом PREP и последующей физико-механической обработкой возрастает на 7-10 ppm по отношению к его количеству в исходных литых заготовках.

4. Установлено, что крупность порошков-гранул, изготовленных методом плазменной плавки и центробежного распыления, зависит также и от расстояния между торцом оплавленной заготовки и плазмотроном. Увеличение этого расстояния приводит к увеличению размера частиц порошков-гранул.

Теоретическая и практическая значимость.

1. Разработаны технологические режимы процесса плазменной плавки и центробежного распыления, а также процесса классификации по крупности, которые позволили увеличить выход годного с 62.5 до 68.5% при производстве порошков-гранул крупностью менее 70 мкм из нового жаропрочного никелевого сплава ВВ751П.

2. Порошки-гранулы из жаропрочного никелевого сплава ВВ751П, впервые изготовленные по вышеуказанной технологии, были использованы для изготовления 10 типоразмеров турбинных и компрессорных дисков для

перспективного авиационного двигателя ПД14 самолета МС21, что подтверждено соответствующим Актом от 20.08.2020 г.

3. Разработан способ, включающий классификацию и электростатическую сепарацию для удаления различных инородных включений на всех этапах технологии изготовления порошков-гранул, что позволило снизить в них содержание кислорода на 20%.

4. 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», ТИ36-02 «Классификация по крупности гранул жаропрочных никелевых сплавов на установке КРП-3», ТИ36-22 «Электростатическая сепарация гранул жаропрочных никелевых сплавов на установка СЭ32/50 (ЭСС-1)», ТИ36-06 «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 порошков-гранул крупностью менее 70 мкм из сплава ВВ751П.

Методология и методы исследования.

Методология и методы исследования определяли, исходя из формулирования задач исследования: анализ научно-технической литературы, проведение экспериментов, наблюдение за ходом испытаний, испытание образцов, анализ полученных результатов, сравнение характеристик образцов, и математическое моделирование процессов технологии производства.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты исследования свойств порошков-гранул крупностью менее 70 мкм из нового жаропрочного никелевого сплава ВВ751П.
2. Результаты оценки влияния параметров технологических процессов на гранулометрический состав порошков-гранул.
3. Результаты исследования содержания кислорода в мелкодисперсных порошках-гранулах.
4. Результаты апробации технологии производства мелкодисперсных порошков-гранул.

Степень достоверности результатов

Все результаты получены на поверенном оборудовании с использованием лицензионного программного обеспечения. Стандартные испытания и исследования проводились в соответствии с требованиями научно - технической документации, действующей на территории Российской Федерации (ГОСТ и ISO).

Апробация работы.

Материалы диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-технической конференции «Специализированное оборудование для современных технологических процессов», г. Ржев. 2020 г.; научно-технической конференции «Динамика, надежность и долговечность механических и биомеханических систем», г. Севастополь. 2020 г.; третьей Международной научно-технической конференции «Павловские чтения», Москва. 2020 г.

Публикации по теме диссертации.

По материалам диссертации опубликованы 8 научных работ, из них 6 в изданиях, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, выводов, списка использованных литературных источников и приложения. Объем диссертации 169 страниц, содержит 35 таблиц, 24 рисунка, список использованных литературных источников из 112 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновываются выбор темы, ее актуальность, научная новизна и практическая значимость, формулируются цель и задачи исследования.

В первой главе представлен научно-технический обзор существующих методов производства порошков-гранул. Рассмотрены применяющиеся в промышленности методы изготовления порошков-гранул сферической формы. Рассмотрены основные свойства порошков-гранул. Проанализированы методы физико-механической обработки порошков-гранул.

В работе показано, что по сравнению с используемыми в производстве методами, технология плазменной плавки и центробежного распыления (метод PREP) обладает рядом преимуществ, заключающихся в возможности изготовления беспористых порошков-гранул, отсутствии сателлитов на порошках-гранулах, возможности изготовления порошков-гранул с минимальным содержанием кислорода, простотой оборудования для проведения процесса и высокой производительностью.

Отмечено, что физико-механическая обработка является обязательной технологической операцией, обеспечивающей снижение содержания инородных включений.

Все вышесказанное формирует особый интерес к изготовлению порошков-гранул сферической формы из новых жаропрочных никелевых сплавов (BV751П) мелкодисперсных фракций с высоким выходом годного, изделия из которого будут иметь высокие механические и жаропрочные свойства.

На основе анализа научно-технической литературы определена цели работы и сформулированы задачи исследования.

Во второй главе обоснован выбор материала для изготовления мелкодисперсных порошков-гранул, приведены основные методики контроля свойств порошков-гранул и компактных образцов из них, изготовленных методом горячего изостатического прессования (ГИП). Проанализирована базовая технологическая схема производства порошков-гранул (рассмотрены технологические параметры и методы их регистрации, оборудование для производства).

Порошки-гранулы были исследованы на предмет соответствия требованиям стандартов, химический состав – на соответствие ГОСТ 52802. Контроль массовой доли содержания кислорода проведен по ГОСТ 28052. Фракционный состав определен методом ситового анализа на приборе типа «РОТАП» в соответствии с ГОСТ 18318. Текучесть порошков-гранул определена в соответствии с ГОСТ 28254.

Изготовление компактных образцов проводили с использованием опытных капсул (механическая обработка и сварка их элементов, вакуумный отжиг, проверка капсул на герметичность), засыпка, вакуумная термическая дегазация порошков-гранул и их герметизация в капсулах, компактирование капсул с порошками-гранулами в газостате.

Термическая обработка компактных образцов (для образцов сплава ВВ751П по режиму: закалка – двухступенчатое старение, для образцов сплава ЭП741НП по режиму: закалка - трехступенчатое старение), удаление оболочки капсулы и механическая обработка компактных образцов.

Испытания материала компактных образцов проводили: на растяжение – по ГОСТ 1497, на ударную вязкость – по ГОСТ 9454, на длительную прочность – по ГОСТ 10145, на сопротивление малоцикловой усталости – по ГОСТ 25.502, на твердость – по ГОСТ9012 в сертифицированном АР МАК Испытательном Центре ОАО «ВИЛС».

Исследования структуры компактных образцов из порошков-гранул проводили на полированных и травленных шлифах методами световой микроскопии (СМ, на металлографическом микроскопе Neophor-21) и методами растровой электронной микроскопии (РЭМ, на растровом электронном микроскопе КУКУ-2800В, оборудованном спектрометром Noran для проведения микрорентгеноспектрального анализа).

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований порошков-гранул из нового жаропрочного никелевого сплава ВВ751П, компактного материала из них и проведена статистическая обработка полученных результатов.

Были исследованы основные параметры процессов плазменного центробежного распыления, классификации порошков-гранул по крупности и выявлены параметры, при которых достигается максимальный выход годного.

Результаты исследования гранулометрического состава после плазменной плавки и центробежного распыления представлены на рисунке 1.

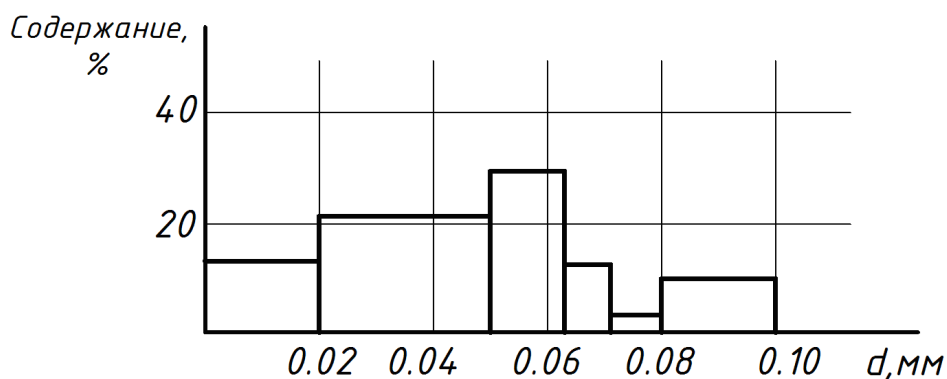


Рисунок 1. Гранулометрический состав порошков-гранул после плазменного центробежного распыления.

Графическая зависимость функции распределения вероятности от размера порошков-гранул после плазменной плавки и центробежного распыления приведена на рисунке 2.

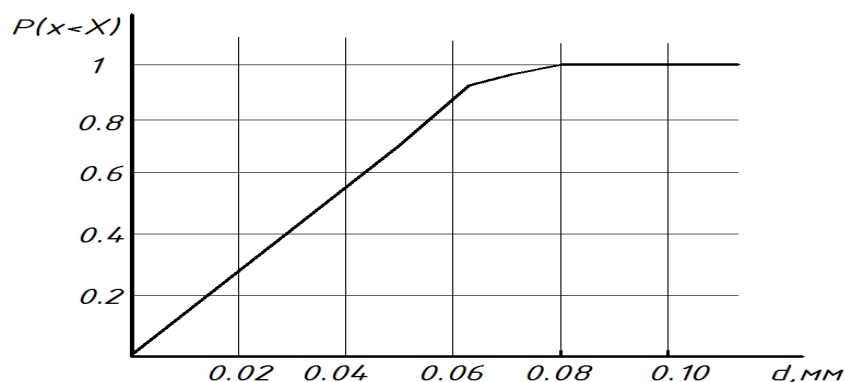


Рисунок 2. Функция распределения вероятности от размера порошков-гранул после плазменного центробежного распыления.

Результаты исследования гранулометрического состава после физико-механической обработки представлены на рисунке 3.

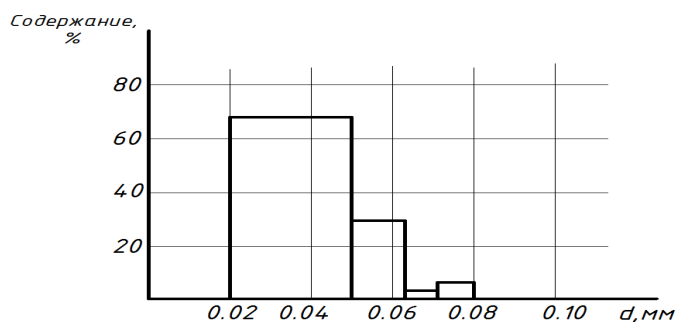


Рисунок 3. Гранулометрический состав порошков-гранул после физико-механической обработки.

Графическая зависимость функции распределения вероятности от размера порошков-гранул после физико-механической обработки приведена на рисунке 4.

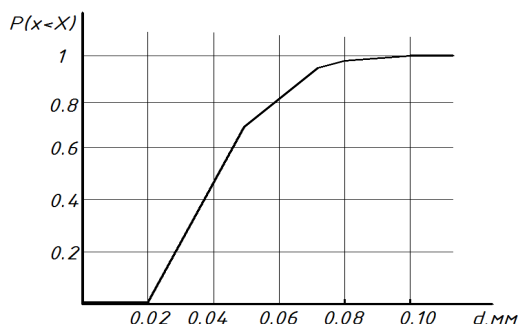


Рисунок 4. Функция распределения вероятности от размера порошков-гранул после физико-механической обработки.

В работе дана оценка содержания доли кислорода в массе мелкодисперсных порошков-гранул от их крупности и предложены методики снижения его содержания. Эффективными методами снижения содержания кислорода являются отсев ультрамелкой фракции (менее 20 мкм), электростатическая сепарация массы порошков-гранул в инертной среде. Данные операции позволили снизить содержание кислорода в порошке-гранулах крупностью менее 70 мкм с 58 до 43 ppm.

Сравнение свойств компактного материала из порошков-гранул крупностью менее 70 мкм сплавов ЭП741НП и ВВ751П было проведено путем испытаний комплекса механических и жаропрочных свойств (таблица 1).

Свойства компактного материала из порошков-гранул нового жаропрочного никелевого сплава ВВ751П оказались существенно выше, чем свойства компактного материала из порошков-гранул сплава ЭП741НП. Результаты исследований сопротивления малоциклового усталости компактных образцов из порошков-гранул крупностью менее 70 мкм приведены в таблице 2.

Таблица 1. Сравнение механических характеристик компактных образцов из порошков-гранул крупностью менее 70 мкм.

Характеристики компактного материала	Марка сплава		Квота превосходства
	ЭП741НП	ВВ751П	
Временное сопротивление, МПа	1426	1590	1.11
Предел текучести, МПа	1083	1167.5	1.07
Ударная вязкость, Дж/см ²	58	37	0.64
Твердость, НВ	380	413	1.08
Длительная прочность (образец с надрезом), часы Температура испытаний 650 °С. Напряжение 1078 МПа.	120.6	140	1.16
Длительная прочность (гладкий образец), часы Температура испытаний 650 °С. Напряжение 1078 МПа.	1209.33	1383	1.14

Таблица 2. Результаты исследований сопротивления малоцикловой усталости компактных образцов.

Марка сплава	T, °C	База испытаний	σ , МПа	Число циклов, ц
ЭП741НП	650	5000	980	35643
ВВ751П	650	20000	1098	39663

Испытания показали, что сопротивление малоцикловой усталости компактных образцов сплава ВВ751П выше, чем у компактных образцов из жаропрочного никелевого сплава ЭП741НП, даже при четырехкратном увеличении базы испытаний и при повышенном до 1098 МПа напряжении.

Уровень служебных характеристик компактного материала из порошков-гранул крупностью менее 70 мкм жаропрочного никелевого сплава ВВ751П дал возможность принять этот материал в качестве основного (базового) для изготовления критических компонентов авиадвигателя ПД14 и других перспективных газотурбинных двигателей для военной и гражданской авиации.

В четвертой главе проведены теоретические исследования процессов изготовления и физико-механической обработки порошков-гранул. Был проведен анализ содержания кислорода в порошках-гранулах малой крупности, исследования структуры компактного материала и рассмотрены основные предпосылки для создания модели производства мелкодисперсных порошков-гранул.

Проведено теоретическое исследование процесса плазменной плавки и центробежного распыления литой заготовки, которые выявили, что, наряду с зависимостью диаметра порошков-гранул от частоты вращения заготовки, на их размер влияет также скорость плазменной струи, которая, в свою очередь, зависит от расхода газа, подаваемого в плазмотрон.

Впервые выведено соотношение*, учитывающее, помимо частоты вращения заготовки, влияние скорости плазменной струи на диаметр порошков-гранул:

$$d = 2x \sqrt{\frac{2\sigma}{\pi R \rho \omega^2} - \frac{\eta V^2 \Delta \vartheta}{2\pi R \rho \omega^2}}, \quad (1)$$

где η - плотность газа плазменной струи, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; V - скорость газа плазменной струи, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$; Δ - длина промежутка от торца заготовки до плазматрона, м ; ϑ - доля промежутка, где скоростной поток плазмы непосредственно взаимодействует со жгутом расплава; ω - частота вращения заготовки, $\text{об}\cdot\text{мин}^{-1}$; σ - поверхностное натяжение расплава, $\text{Н}\cdot\text{м}^{-1}$; R - радиус литой заготовки, мм ; ρ - плотность расплава, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$.

Кроме того, стоит обратить внимание на зависимость диаметра образовавшихся частиц от расстояния между плазматроном и торцом заготовки (рисунок 5).

На рисунке 7 представлена зависимость размера частиц от частоты вращения и расстояния между торцом литой заготовки и плазматроном, включающего в себя закономерности метода PREP и динамическое воздействие плазменной струи.

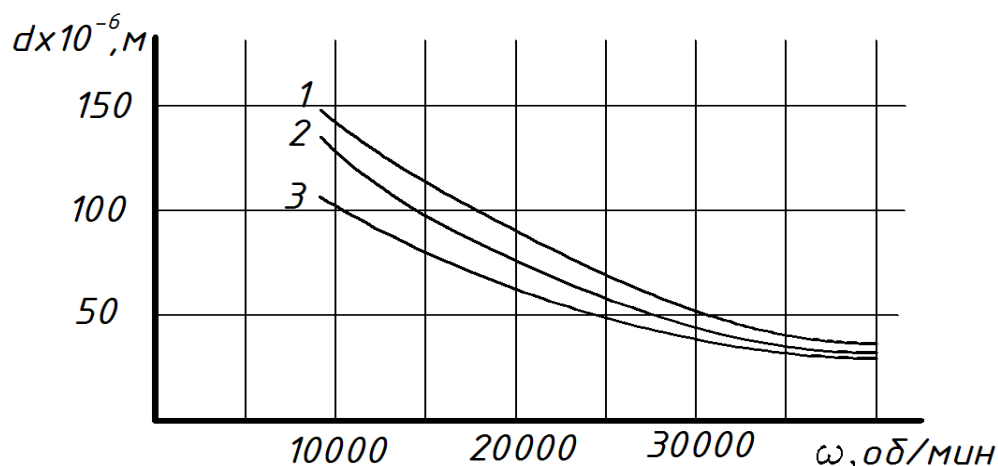


Рисунок 5. Зависимость размера частиц d жаропрочного никелевого сплава от частоты вращения ω заготовки и расстояния « Δ », где 1 - $\Delta = 25$ мм; 2 - $\Delta = 5$ мм; 3 - $\Delta = 2.5$ мм.

* (Исследования проведены совместно с к.т.н. Старовойтенко Е.И.)

При теоретическом исследовании процесса классификации по крупности порошков-гранул на фракцию менее 70 мкм было установлено, что движение частицы в установке можно рассматривать в виде суперпозиции двух движений: движения гранулы в плоскости сетки и движения гранулы в плоскости, перпендикулярной плоскости сетки. Движение гранулы в плоскости, перпендикулярной плоскости сетки, можно описать, как три механических движения: падение гранулы под действием силы тяжести, взаимодействие гранулы с сеткой (рисунок 6), отскок. Затем происходит повторное колебание по такой же схеме.

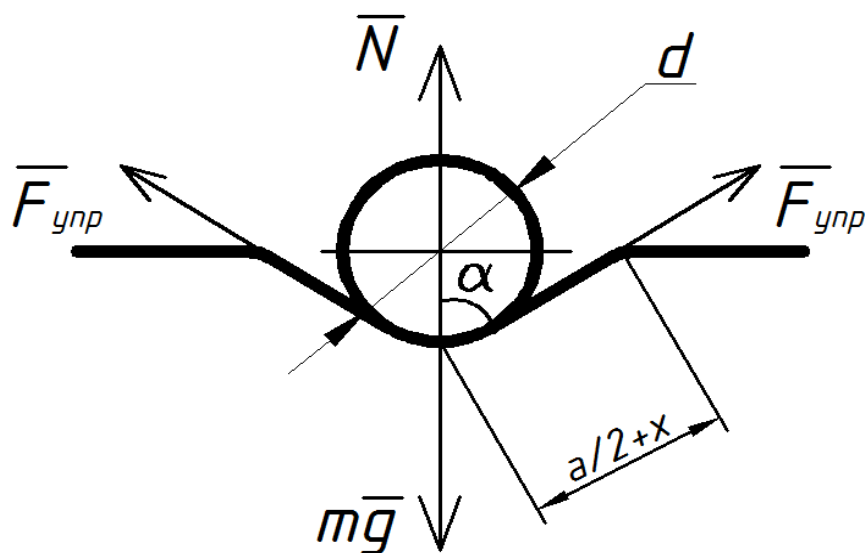


Рисунок 6. Взаимодействие гранулы с сеткой.

В результате всех этих перемещений на практике было отмечено расширение ячейки сетки. Используя общее уравнение колебания гранул в плоскости, перпендикулярной плоскости сетки, можно рассчитать расширение ячейки сетки, зависящее от размера гранул, характеристик сетки (модуля упругости, размера ячейки) и среды классификации. Для этого решено следующее уравнение:

$$m\ddot{z} = \frac{ESz}{a} + \frac{cp\dot{z}^2S}{2} + mg + R \quad (2)$$

где m – масса частицы, кг; E – модуль упругости, $\text{Н}\cdot\text{м}^{-2}$; c – коэффициент обтекаемости; S – площадь поперечного сечения, м^2 ; ρ – плотность среды, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; a – размер ячейки сетки, мкм; g – ускорение свободного падения, $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$, R – реакция опор вибросита, Н.

На основании проведенных расчетов и экспериментальной проверки было установлено, что в процессе классификации гранул крупностью менее 70 мкм при горизонтальном расположении сетки с размером ячейки 71x71 мкм во время падения гранулы на сетку происходит расширение ячейки сетки в среднем на 9 ± 1 мкм, и в годный продукт могут попадать гранулы большего размера на эту величину.

При движении гранулы в плоскости сетки непосредственное влияние на производительность процесса оказывают такие параметры, как амплитуда и частота колебаний ситового набора.

При классификации гранул на сетке с размером ячейки 71x71 мкм выход годного составил 82%, при этом гранулометрический состав отсеянной массы содержит 99.4% гранул крупностью менее 70 мкм.

Движение гранул в плоскости сетки происходит по нижеприведенным формулам:

$$\ddot{x} + fg \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} = r\omega^2 \cos\omega t ; \quad (3)$$

$$\ddot{y} + fg \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} = r\omega^2 \sin\omega t , \quad (4)$$

где x, y – координаты положения гранулы в плоскости сетки и их производные; f – коэффициент трения скольжения; g – ускорение свободного падения, $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$; r – радиус окружности, по которой движутся гранулы, м; ω – частота колебаний, Гц.

С целью увеличения производительности можно увеличить амплитуду и частоту колебаний.

Проведенные теоретические исследования источников увеличения кислорода в порошках-гранулах при производстве, физико-механической обработке показали, что при изготовлении гранул крупностью 70 мкм содержание кислорода в порошках-гранулах закономерно возрастает на 7-10 ppm по отношению к его количеству в исходных литых заготовках. Стоит отметить, что с уменьшением крупности порошков-гранул увеличивается активная поверхность частиц, адсорбирующая кислород. В связи с этим, в соответствии с законом Фика, возрастает содержание кислорода, адсорбированного на поверхности порошков-гранул мелких фракций (таблица 3).

Таблица 3. Изменение площади поверхности порошков-гранул с уменьшением их крупности.

Номинальный размер гранул, мкм	Объем гранулы, м ³	Количество гранул в единице объема, шт	Площадь контакта, м ²	Площадь контакта на единицу объема, м ²
100	4.187×10^{-12}	3×10^{11}	3.14×10^{-8}	9.42×10^3
70	2.12067×10^{-13}	5×10^{12}	1.719×10^{-8}	8.597×10^4
63	1.3085×10^{-13}	7×10^{12}	1.25×10^{-8}	8.75×10^4
50	6.5417×10^{-14}	2×10^{13}	7.85×10^{-9}	1.57×10^5

Из таблицы 3 видно, что с уменьшением крупности порошков-гранул увеличивается площадь поверхности и, следовательно, количество кислорода, взаимодействующее с порошком. Количество адсорбированного кислорода увеличивается с увеличением площади контакта. Иными словами, при равной массе порошков-гранул содержание адсорбированного кислорода увеличивается в них с уменьшением их крупности. Поэтому применение мер по снижению содержания кислорода в порошках-гранулах особенно важно при изготовлении порошков-гранул малой крупности.

При формировании партий порошков-гранул крупностью менее 70 мкм необходимо удалять из них отсевом мелкие фракции (менее 20 мкм), с высоким

содержанием кислорода. Удаление различных инородных включений на всех этапах производства порошков-гранул способствует снижению доли кислорода и повышению усталостных свойств и долговечности. Эффективными методами при этом являются классификация по крупности, электростатическая сепарация.

Исследования структуры компактного материала из порошков-гранул сплава ВВ751П показали, что основу шлифа составляет γ -матрица с равномерно расположенными мелкими выделениями γ' -фазы кубоидной формы. Размер этих выделений составляет примерно 0.17-0.20 мкм. Карбиды, выявленные при изучении микроструктуры, наблюдали как в объеме зерен, так и по их границам. Их размер изменяется от долей микрометра до 2-3 мкм (рисунок 7) *.

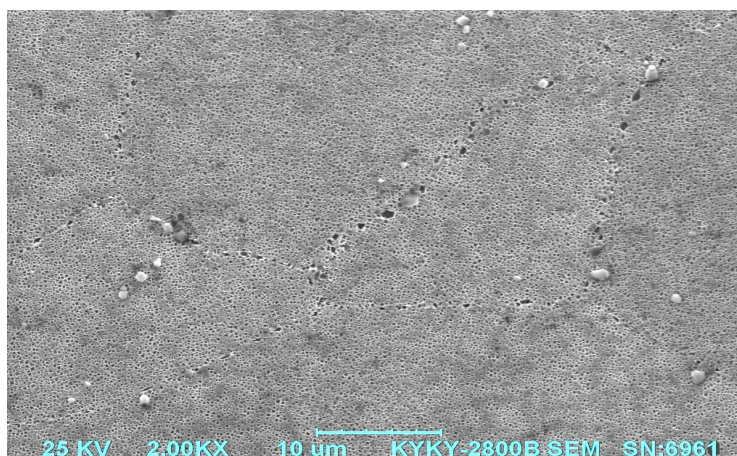


Рисунок 7. Структура компактного материала из порошков-гранул нового жаропрочного никелевого сплава ВВ751П.

*(Исследования проведены совместно с Манущенко Л.В. и к.т.н. Капуткиным Е.Я.).

Теоретические исследования, изложенные в четвертой главе, нашли подтверждение при экспериментальной проверке, что явилось основанием для проведения аналитических исследований при создании модели производства.

В пятой главе на основе результатов, приведенных в третьей главе, и теоретических исследований, приведенных в четвертой главе, спроектирована модель производства порошков-гранул крупностью менее 70 мкм. Проведена апробация данной модели в ОАО «ВИЛС». Результаты апробации подтвердили эффективность использования модели (рисунок 8).

Положительные результаты по апробации модели дали возможность разработать технологию производства порошков-гранул крупностью менее 70 мкм и изделий из них. Технология была разработана с учетом вышеуказанной модели на базе системы менеджмента качества ИСО9001.

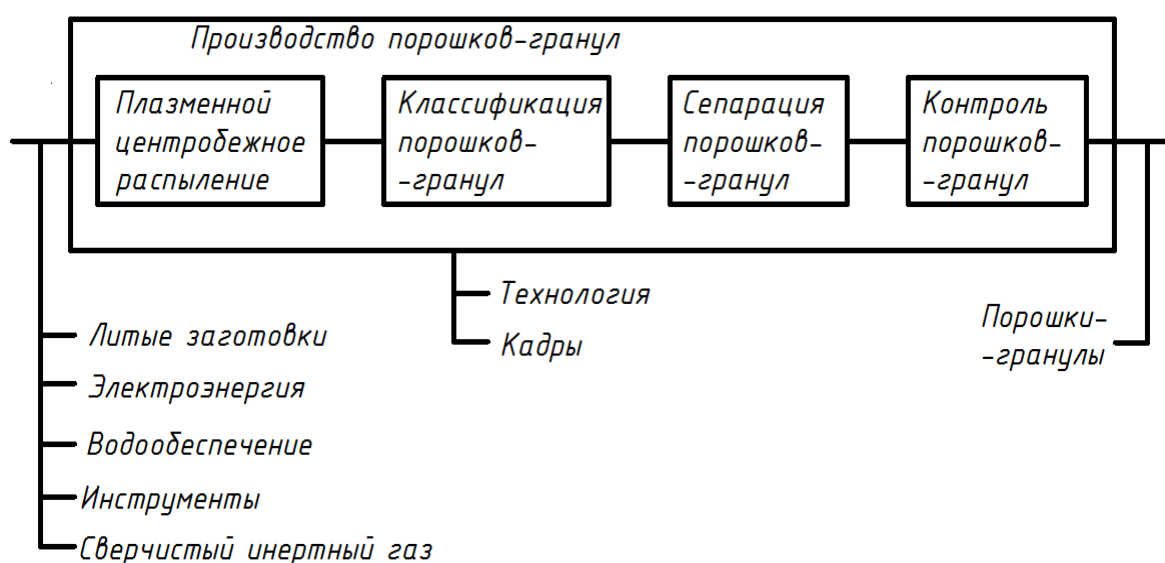


Рисунок 8. Модель производства порошков-гранул.

По данной технологии были изготовлены несколько партий дисков десяти типоразмеров (всего более 200 штук) и сданы заказчику (ОАО «ОДК-Авиадвигатель») для нового перспективного двигателя ПД14 (см. Акт от 20.08.2020).

Выводы по работе

1. Установлено, что метод плазменной плавки и центробежного распыления литой заготовки с последующей физико-механической обработкой полученных порошков-гранул является наиболее рациональным для изготовления мелкодисперсных порошков-гранул высокого качества.

2. Впервые выявлена зависимость диаметра частицы при ее отрыве от быстровращающейся заготовки от частоты вращения, учитывающая фактор скорости плазменной струи. Предложена формула для его расчета.

3. Определены основные зависимости движения гранулы при проведении процесса классификации по крупности, с помощью которых обеспечивают наибольший выход годного при производстве порошков-гранул крупностью менее 70 мкм.

Предложены уравнения движения гранулы при классификации.

4. При классификации порошков-гранул крупностью менее 70 мкм на сетке с размером ячейки 71x71 мкм происходит расширение ячейки сетки. При этом возможность попадания более крупных гранул в годную массу составляет всего 0.6%.

5. При производстве порошков-гранул крупностью менее 70 мкм закономерно повышается содержание кислорода на 7-10 ppm по отношению к его содержанию в литых заготовках.

6. Выявлено, что с уменьшением количества и размера неметаллических включений увеличивается малоцикловая усталость компактного материала.

7. Установлено, что фазовый состав компактного материала из порошков-гранул крупностью менее 70 мкм соответствует γ -фазе с мелкими выделениями γ' -фазы кубоидной формы и карбидами.

8. Разработана технология производства порошков-гранул сплава ВВ751П крупностью менее 70 мкм 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%.

При классификации порошков-гранул по крупности с 78 до 82%.

Общий экономический эффект составил 3379499.8 руб при производстве более 200 дисков 10 наименований.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

1. Ягодин М.Г. Порошки-гранулы для аддитивных технологий, изготовленные плазменным центробежным распылением // Технология легких сплавов. 2018. №3. С. 25-29.
2. Ягодин М.Г. Теоретические исследования процесса классификации гранул по крупности // Технология легких сплавов. 2019. №1. С. 48-54.
3. Ягодин М.Г. Анализ источников загрязнения порошков-гранул кислородом и методы снижения его содержания. // Технология легких сплавов. 2020. №1. С. 62-69.
4. Старовойтенко Е.И. Совершенствование оборудования для производства металлических порошков центробежным распылением / Е.И. Старовойтенко, А.М. Казберович, Д.В. Батяев, М.В. Зенина, М.Г. Ягодин // Технология легких сплавов. 2020. №2. С.12-20.
5. Ягодин М.Г. Расчет параметров плазменного центробежного распыления мелкодисперсных гранул жаропрочных никелевых сплавов / М.Г. Ягодин, Е.И. Старовойтенко // Заготовительное производства в машиностроении. Том 18. №10. 2020. С. 471-474.
6. Ягодин М.Г. Методы уменьшения содержания кислорода при производстве порошков-гранул жаропрочных никелевых сплавов / М.Г. Ягодин, Г.С. Гарибов // Заготовительное производства в машиностроении. Том 18. №12. 2020. С.569-572.

Другие публикации

7. Ягодин М.Г. Расчет размеров порошков-гранул, изготовленных методом PREP, с учетом динамического давления плазменной струи / М.Г. Ягодин, Е.И. Старовойтенко, Г.С. Гарибов // Электромеханик. г. Ржев. 2020. №19. С. 12-15.

8. Ягодин М.Г. Особенности классификации по крупности мелкодисперсных порошков-гранул / М.Г. Ягодин, Г.С. Гарибов // Электромеханик. г. Ржев. 2020. №20. С. 17 - 20.