ПОРОШКОВЫЕ И ПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 629.114.2-235

DOI: 10.35211/1990-5297-2021-2-249-20-26

Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов

ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЙ МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРОШКОВЫХ ФРИКЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ НА Fe-ОСНОВЕ С ВЫСОКИМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ*

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: au@vstu.ru

Разработаны физические и технологические основы метода ДГП-ПФМ изготовления порошковых фрикционных изделий сухого трения на Fe-основе с высокими технологическими и эксплуатационными показателями для широкого спектра практического использования. Метод ДГП-ПФМ состоит в том, что динамическим горячим прессованием (ДГП) изготавливаются новые порошковые фрикционные материалы (ПФМ) через подслои из карбонильного железа между фрикционным материалом и основой (каркасом) с гальваническим никелевым покрытием. Прессовка фрикционной накладки выполняется из шихты типа ФМК-79 и обладает повышенной твердостью и малой пористостью. Исследованы процессы выбора состава шихты, формирования структуры и свойств новых порошковых фрикционных материалов на Fe-основе. Метод отличается высокой производительностью, энергосбережением, упрощенной технологией и предполагает возможность использования имеющегося технологического оборудования для изготовления конструктивных порошковых изделий.

Метод ДГП-ПФМ изготовления порошковых фрикционных накладок сухого трения может быть использован для изготовления фрикционных узлов трансмиссий легких гусеничных машин с большой удельной мощностью. Материал трения, полученный этим методом из шихты типа ФМК-79, может быть использован в качестве унифицированного для таких узлов трения, как главный фрикцион, бортовой фрикцион, ленточный и дисковый тормоза.

Ключевые слова: сухое трение, накладка фрикционная, Fe-основа, каркас, покрытие, прессование и спекание, динамическое горячее прессование, фрикционные устройства трансмиссии.

Yu. I. Krykhtin, V. I. Karlov

HIGH-PERFORMANCE METHOD OF PRODUCTION OF POWDER FRICTIONAL PRODUCTS ON Fe-BASIS WITH HIGH TECHNOLOGICAL AND OPERATIONAL PROPERTIES

Volgograd State Technical University

Physical and technological bases of DHP-PFM method for production of dry friction powder friction articles on Fe- base with high technological and operational indices for a wide range of practical use have been developed. The DHP-PFM method is that the dynamic hot pressing (DHP) provides production of the new powder frictional materials (PFM) through an underlayer from carbonyl iron between frictional material and a basis (framework) with electroplated nickel coating. Friction lining compaction is made of charge of ФМК-79 type and has high hardness and low porosity. Processes of the choice of composition of furnace charge, formation of structure and properties of new powder frictional materials on Fe-to a basis are investigated. The method is characterized by high productivity, energy saving, simplified technology and provides the possibility to use existing technological equipment for making structural powder products.

Method of DHP-PFM manufacturing of dry friction powder friction linings can be used for manufacturing of friction units of transmissions of light track machines with high specific power. The friction material received by this method from furnace charge of FMK-79 type can be used as unified for such frictional units as the main friction clutch, an onboard friction clutch, tape and disk brakes.

Keywords: dry friction, , moulding, frictional moulding, basis of Fe, a framework, a covering, pressing and agglomeration, dynamic hot pressing, frictional devices, frictional devices of transmission.

Металлокерамические (порошковые) фрикционные изделия состоят из стальной несущей основы (каркаса), к которой с одной или двух сторон крепятся порошковые фрикционные прессовки. Существует несколько способов соединения (сборки) порошковых прессовок со стальной основой. Наиболее распространенный из них включает раздельное прессование фрикционного слоя с последующим длительным спеканием его с несущей основой под большим давлением в печи с защитной атмосферой [1, 2].

Технология изготовления фрикционных деталей из металлокерамических материалов включает следующие основные операции: подготовку шихты, т. е. просев и смешивание порошков в специальных смесительных агрегатах; подготовку стальных несущих основ – подложек (дисков, секторных чашечных и плоских каркасов и т. д.); изготовление фрикционных прессовок; установку фрикционных прессовок на подложки; спекание прессовок и припекание их к стальным подложкам; охлаждение деталей.

Металлокерамические диски фрикционных устройств трансмиссий транспортных машин для работы в масле и всухую традиционно изготавливают **методом раздельного прессования и длительного спекания под давлением** [1]. При таком способе изготовления фрикционных порошковых изделий прочное соединение фрикционной прессовки со стальным диском или каркасом накладки обеспечивается за счет диффузионных процессов в контакте материалов. Этот способ имеет следующие недостатки: невозможность изготовления тонких фрикционных прессовок, что приводит к увеличению их толщины, а это связано с повышением объема механической обработки, если она производится; трудоемкость и низкая производительность ручной операции при сборке пакета – фрикционной прессовки и основы, для спекания; невозможность механизации процесса сборки пакетов вследствие низкой прочности прессовок; сложность предотвращения брака в результате смещения прессовок на несущей основе при сборке и спекании пакета; нестабильность припекания; длительность спекания под давлением; необходимость использования мощного прессового оборудования и специального термического оборудования со стабильными высокотемпературными характеристиками.

Из вышеизложенного следует, что в настоящее время актуальна разработка высоко-

производительного метода изготовления порошковых фрикционных изделий сухого трения на *Fe*-основе с высокими технологическими и эксплуатационными показателями, особенно для тяжело нагруженных фрикционных узлов машин с большой удельной мощностью.

Целью работы является создание физических и технологических основ высокопроизводительного метода изготовления порошковых фрикционных накладок сухого трения на *Fe*-основе для повышения надежности и долговечности работы фрикционных устройств трансмиссий гусеничных машин (ГМ) с большой удельной мощностью (более 30 л.с./Т) [3].

Новизной работы является разработка высокопроизводительного метода изготовления заготовок порошковых фрикционных накладок динамическим горячим прессованием (ДГП) новых порошковых фрикционных материалов (ПФМ) на *Fe*-основе через подслои из карбонильного железа между фрикционной прессовкой и каркасом толщиной 2 мм из стали Ст. 20 с никелевым гальваническим покрытием толщиной 18...30 мкм.

Проведены предварительные исследования при прессовании опытных материалов на *Fe*-основе, которые могут быть использованы при изготовлении фрикционных материалов на той же основе, например, **прокаткой**. Так опытный материал МПФ 1005-0, МПФ 105-1 представляет собой систему железо-медь, для которой реализация достижения определенного уровня физико-механических и триботехнических характеристик осуществляется при жидкофазном спекании. Здесь прочность сцепления слоев фрикционного материала с промежуточным слоем достигается миграцией жидкой фазы при кратковременном спекании (менее 10 мин) в проходной печи с восстановительной атмосферой при температуре 1100 °С.

На рис. 1 показаны экспериментальные зависимости пористости P , плотности γ , высоты h прессовок от давления p прессования для опытного материала, в состав которого входит порошок железный ПЖРВЗ, порошок медный ПМС-1, порошок оловянный ПО-1 или ПО-2, порошок электрокорундовый 14А, графит МККЗ.

Экспериментальная зависимость прочности сцепления P' сырого фрикционного слоя из опытного материала на *Fe*-основе с промежуточным слоем от давления прессования приведена на рис. 2. Прочность сцепления фрикционного слоя с промежуточным слоем и проч-

ность самого фрикционного слоя определялись на специально подготовленных образцах. Образец представляет собой компактную подложку с припеченным промежуточным слоем, толщина подложки 2 мм и диаметр 30 мм в центре которой находится отверстие диаметром 3 мм. Между двумя подложками при различных давлениях производили прессование. Изготовленные образцы испытывались на разрывной машине.

Рис. 1. Зависимость пористости P , плотности γ , высоты h прессовок от давления P прессования

Рис. 2. Экспериментальная зависимость прочности сцепления P' фрикционного слоя с промежуточным слоем от давления прессования

Исследования показали, что изделия из порошковых материалов, изготовленные методом раздельного прессования и длительного спекания под давлением, имеют низкие механические свойства в основном из-за повышенной пористости. Для ее устранения Ю. Г. Дорофеевым предложено использовать технологию горячей допрессовки пористых порошковых заготовок конструктивных изделий [4, 5].

Для упрощения традиционной малопроизводительной и трудоемкой технологии изготовления фрикционных изделий путем раздельного прессования и длительного спекания под давлением пористого ПФМ на Fe -основе разработаны физические и технологические основы нового метода – ДГП-ПФМ. Это метод горячей допрессовки пористых порошковых

изделий, обладающий высокой производительностью, энергосбережением, упрощенной технологией, **доработанный** на создание фрикционных изделий сухого трения с новыми ПФМ на Fe -основе с возможностью использования имеющегося технологического оборудования.

Получены экспериментальные данные о влиянии состава шихты и технологических режимов на структуру и триботехнические свойства новых, имеющих повышенную твердость, малопористых ПФМ сухого трения на Fe -основе, полученных методом ДГП-ПФМ. Прессовка фрикционной накладки, выполненная из шихты типа ФМК-79, имеет твердость 85...105 HRF, пористость 5...8 %, плотность 5,2...5,6 г/см³.

Физические основы ДГП-ПФМ сухого трения на Fe -основе

При использовании методов горячей штамповки в закрытых штампах для допрессовки порошковых фрикционных заготовок с целью уплотнения, уменьшения пористости и прочного соединения фрикционной прессовки со стальным диском или каркасом накладки используется динамическое прессование, протекающее за весьма малый промежуток времени и представляющее собой удар. В процессе деформации предварительно нагретой в закалочном индукторе малогабаритной фрикционной секторной накладки, состоящей из стальной основы с защитным гальваническим никелевым покрытием и фрикционной прессовки из материала на Fe -основе, предварительно припеченной через промежуточный подслои из карбонильного железа к основе в проходной термической печи, происходит не только динамическое компактирование и структурирование прессовки, но и динамическое внедрение материала прессовки в тело стального диска или каркаса, через подслои карбонильного железа, что повышает прочность соединения. При ударе межчастичное сращивание играет огромную роль в процессах уплотнения, формования и структурообразования, являющихся основой формирования порошкового фрикционного изделия.

Сила удара (давление 500...700 МПа) должна быть подобрана так, чтобы деформация предварительно нагретой в закалочном индукторе малогабаритной фрикционной прессовки для ее повышенного уплотнения была такой, чтобы оставалась приемлемой геометрия порошковой накладки, выдерживались заданные толщина, повышенная твердость, плотность и пониженная пористость для соответствующей

шихты прессовки. Регулируя силу удара, можно изменять структуру, функциональные, физико-механические и триботехнические характеристики фрикционных изделий из различной шихты на Fe-основе. ДГП позволяет совместить процессы уплотнения, формообразования и термомеханической обработки.

Технологические основы ДГП-ПФМ порошковых фрикционных материалов сухого трения на Fe-основе

Технология изготовления порошковых материалов методом ДГП ПФМ включают в себя следующие этапы:

1. Подготовка каркасов толщиной 2 мм из стали Ст. 20. Перед нанесением защитного гальванического никелевого покрытия толщиной 18...30 мкм подложка должна быть обезжирена и дробеструена. Для напрессовки фрикционного слоя на каркас необходимо, чтобы поверхность каркаса имела разветвленный рельеф. Это можно получить механическим путем или припеканием (т. е. кратковременным спеканием) активных порошков к поверхности каркаса, т.е. созданием промежуточного слоя, на котором будет хорошо удерживаться напрессованный фрикционный слой. В качестве активного порошка для промежуточного слоя применяется карбонильное железо марки Р-10 ГОСТ 13610–79. Использование карбонильных порошков железа для промежуточного слоя наиболее целесообразно по причине их высокой спекаемости. После спекания на компактной подложке появляется рельеф хорошо развитой поверхности, припеченный к каркасу. Он представляет собой губку пористостью 40...45 %.

2. Припекание промежуточного слоя в протяжной печи с силитовыми нагревателями в потоке водорода. Качество припекания промежуточного слоя к компактной подложке зависит от температуры и времени выдержки.

3. Напрессовка порошковой шихты на каркас с промежуточным слоем. На стальную основу – каркас с гальваническим никелевым защитным покрытием и промежуточный подслей

из карбонильного железа давлением 450...500 МПа напрессовывают порошковую шихту. Соединение фрикционного слоя с каркасом производят на гидравлических прессах с использованием прессформы для напрессовки.

4. Предварительное припекание порошковой прессовки к каркасу при температуре спекания фрикционного слоя, например, 900...950 °С для шихты ФМК-79, МКВ-50, СМК-80, с изотермической выдержкой в защитной атмосфере в течение 1...2 часов в проходной термической печи без давления с последующим охлаждением.

Применяется конвейерная электропечь типа СКЗ – 6. 95. 1,2/11,5–И1. Установленная мощность 251 кВт, номинальная температура 1150 °С, производительность при загрузке 20 кг на одном метре ленты и скорости 10 м/ч, 200 кг/ч, мощность холостого хода 108,5 кВт.

Сцепление порошкового фрикционного слоя со стальной подложкой реализуется путем сцепления с рельефом промежуточного слоя. Интенсификации процессов спекания уделяется большое внимание. Предлагается ускорить процесс спекания за счет повышения температуры $T_{сп} - (0,9 / 0,95)T_{пл}$ (где $T_{пл}$ температура плавления) и увеличения скорости нагрева до 100...300 °С/с при сокращении времени выдержки, так как известна эффективность повышения температуры спекания сталей с 1120 до 1250 °С при сокращении времени выдержки [6].

5. Быстротечный нагрев (секунды) предварительно спеченной заготовки, например, токами высокой частоты в индукторе закалочном до температуры 1000...1100 °С.

6. ДГП в штампе для горячей штамповки производится давлением 500...700 МПа на заготовку накладки (колодки), нагретой в закалочном индукторе, с использованием блока штамповочного на пресс.

7. Охлаждение заготовки накладки (колодки) на воздухе.

Составы приготавливаемой шихты представлен в табл. 1.

Таблица 1

Составы приготавливаемой шихты

Марка материала	Содержание исходных компонентов в 300 кг шихты, кг									
	Порошок медный	Баритовый концентрат	Ас-бест	Гра-фит	Железо сернокислое	Карбид кремния (зеленый)	Карбид кремния (черный)	Нитрид бора	Карбид бора	Порошок железный
ФМК-79	30	21	–	15	–	18	–	9	–	207
МКВ-50А	30	–	9	24	15	–	15	–	15	192

Приготовление шихты фрикционных материалов включает в себя следующие этапы:

1. Подготовка исходных материалов шихты ФМК -79 и МКВ – 50А включает в себя следующие известные технологические операции: довосстановление, сушку, прокаливание, и просев, приведенные в табл. 2.

Исходные компоненты шихты взвешиваются на весах и загружаются в смеситель. Смеситель заполняется порошком примерно на 1/3 объема). Смешивание производится до получения однородного химического состава по объему шихты. Определение химического состава шихты производится химическим или спектральным методом.

Таблица 2

Технологические операции с компонентами шихты

Наименование операции	Наименование материала, для которого проводится операция
Довосстановление	Порошок железа
Сушка	Графит кристаллический
Прокаливание	Асбест хризотилковый, железо сернокислое, концентрат баритовый
Размол	Порошок железа, асбест хризотилковый, железо сернокислое, концентрат баритовый
Просев	Все исходные материалы

2. Приготовление шихты подслоя. Количество шихты – 100 кг, время смешивания – 1 час. Для составления шихты подслоя из карбонильного железа используется отсев порошка железа (оставшийся после его просева через сито) – 85 кг и порошок медный – 15 кг. Смешивание шихты подслоя производится в смесителе ОЛ-2.

Структура порошковых фрикционных материалов сухого трения на железной основе, изготовленных методом ДГП-ПФМ

В структуре спеченного порошкового материала ФМК-79 ДГП сухого трения на железной основе, содержится перлит, включения ледебурита до 5 %, цементитная сетка.

Материал ФМК-79 ДГП отличается более плотной металлической матрицей фрикционного слоя и равномерным распределением меньшего количества пор в сравнении с металлокерамическим материалом сухого трения ФМК-79, изготовленным методом раздельного прессования и длительного спекания.

При сравнении металлокерамического материала сухого трения на железной основе МКВ-

50А, изготовленного методом раздельного прессования и спекания, с металлокерамическим материалом МКВ-50А ДГП, изготовленным методом динамического горячего прессования, видно, что металлическая матрица фрикционного слоя более плотная у материала МКВ-50А ДГП, видны черные участки – карбид кремния, незначительные поры и графит, серые участки с рябиной – частицы карбида кремния, светлые участки – металлическая матрица.

На основании сравнительного анализа технологических показателей изготовления, физико-механических и триботехнических свойств, полученных при лабораторных испытаниях образцов ПФМ на Fe-основе, изготовленных разными методами, выявлены большие перспективы использования метода ДГП-ПФМ для изготовления порошковых фрикционных изделий с высокими триботехническими показателями [7].

Физико-механические свойства фрикционных материалов порошковых накладок и колодок, изготовленных по технологии ДГП (температура спекания 1150 °С) представлены в табл. 3 [8].

Таблица 3

Физико-механические свойства фрикционных материалов порошковых накладок и колодок, изготовленных по технологии ДГП

Фрикционный материал	Химический состав, %	Толщина заготовки, мм	Твердость, кгс/мм ² (шкала HRF)	Пористость, %	Плотность, г/см ³
ФМК-79 ДГП I партия	C=6; S=0,7; Cu=10; B=1,6; Si=3,0; Fe – остальное	5,5...6,1	83...105,5	5...8	5,2...5,6
ФМК-79 ДГП II партия	то же	5,9...6,3	то же	то же	то же
МКВ-50А ДГП I партия	C=9,5...9,8; S=1,0...1,2; Cu=9,8...9,9; B=3,5...3,7; Si=3,5...3,7; Асбест 3,1...3,3; Fe – остальное	5,27...5,5	60...80	5...8	5,0...5,1

Триботехнические свойства при работе всухую порошковых фрикционных материалов накладок, изготовленных по технологии ДГП, полученные при лабораторных испытаниях, определялись согласно «Инструкции по контрольно-сдаточным испытаниям фрикционной металлокерамики на машине трения ИМ-58 № 173 ВИАМ по следующим режимам: работа трения - $A=75,02$ кДж; удельная работа торможения - $A_{уд}=5,3$ кДж/см²; начальная скорость

скольжения - $V_n=20$ м/с; удельное давление - $P=0,5...0,7$ МПа; коэффициент взаимного перекрытия - 0,64; время торможения - $t_T=20$ с; число циклов - 10. Контртело - чугун ЧНМХ (HB=169 кгс/мм² – I партия, HB=167 кгс/мм² – II партия).

Триботехнические свойства при работе всухую порошковых фрикционных материалов накладок и колодок, изготовленных по технологии ДГП, представлены в табл. 4 [8].

Таблица 4

Результаты триботехнических испытаний

№ п/п	Фрикционный материал	Интенсивность износа, мкм/торм		Коэффициент трения	Стабильность коэффициента трения, α	Твердость до механической обработки (шкала HRF) кгс/мм ²
		фрикционного материала	контртела			
1	ФМК-79ДГП I партия	8,3	1,2	0,381	0,91	83...105,5
2	ФМК-79ДГП II партия	8,9	1,3	0,414	0,86	то же
3	ФМК -79 ОСТ 1.90115-74 (раздельное прессование и длительное спекание под давлением)	12 не более	9 не более	0,3...0,4	0,7 не менее	80...105

На рис. 3 приведена фотография пар сухого трения дисков с фрикционными накладками, полученными методом ДГП-ПФМ: а) из шихты типа ФМК-79, б) из шихты МКВ-50А и контртела из стали 40Х применительно к дисковому остановочному тормозу ГМ массой 18 т после 4000 километров пробега.

Как видно из рисунка, рабочие поверхности фрикционных накладок находятся в хорошем состоянии (нет заметных повреждений) и пригодны к дальнейшей эксплуатации на изделиях.

Прогрессивный высокопроизводительный метод ДГП-ПФМ изготовления порошковых фрикционных накладок и колодок сухого трения может быть использован для изготовления узлов трения трансмиссий легких ГМ с большой удельной мощностью, а материал трения ФМК-79ДГП может быть использован в качестве унифицированного для этих узлов трения: главный фрикцион, бортовой фрикцион, ленточный и дисковый остановочные тормоза.

а

б

Рис. 3. Фотография пар сухого трения дисков с фрикционными накладками, полученными методом ДГП-ПФМ: а – из шихты типа ФМК-79; б – из шихты МКВ-50А и контртела из стали 40Х применительно к дисковому остановочному тормозу ГМ массой 18 т после 4000 километров пробега

Выводы

1. Разработаны физические и технологические основы изготовления новых порошковых фрикционных изделий сухого трения из различных составов шихты на Fe-основе, изготов-

ливаемых методом ДГП-ПФМ через подслои из карбонильного железа;

2. Разработка повышает надежность сцепления фрикционной прессовки с каркасом, плотность и механическую прочность, техноло-

гичность и производительность изготовления порошковой фрикционной накладки и упрощает термическое оборудование для ее изготовления, так как применяется проходная электропечь при предварительном спекании накладки и закалочный индуктор для нагрева накладки.

3. Результаты работы могут быть использованы при создании новых и модернизации существующих фрикционных узлов трансмиссий легких транспортных ГМ с большой удельной мощностью (свыше 30 л.с./Т).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Крыхтин, Ю. И.* Спеченные материалы на Fe-основе для фрикционных устройств большой удельной мощности / Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов // Трение и износ Гомель ИММС НАН Беларуси, 2020. – Том 41, № 2. – С. 180–187.
2. Кинетика трибосинтеза структур в зоне фрикционного контакта материалов фрикционной пары, работающих в условиях теплоимпульсного нагружения / И. И. Панаиоти, И. И. Иванова, М. В. Карпец // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2009, № 4. – С. 40–43.
3. *Труханов, В. М.* Трансмиссии гусеничных и колесных машин / В. М. Труханов, В. Ф. Зубков, Ю. И. Крыхтин, В. Ф. Желтобрюхов. – М. : Машиностроение, 2001. – 736 с.
4. *Дорофеев, Ю. Г.* Конструкционные порошковые материалы и изделия / Ю. Г. Дорофеев, Л. Г. Мариненко, В. И. Устименко. – М. : Metallurgia, 1986. – 144 с.
5. *Дорофеев, Ю. Г.* Промышленная технология горячего прессования порошковых изделий / Ю. Г. Дорофеев, Б. Г. Гасанов, В. Ю. Дорофеев. – М. : Metallurgia, 1990. – 206 с.
6. *Tengzelius J.* High Temperature Sintering of PM Steels/ J. Tengzelius, C.A. Blande // Powder Metallurgy International. – 1984, Vol. 16, No. 3, Verlag Schmid GmbH, Freiburg, Fed. Rep. Germany.
7. *Крыхтин, Ю. И.* К сравнению двух методов изготовления новых порошковых фрикционных изделий сухого трения / Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 3 (238) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 34–37.
8. *Крыхтин, Ю. И.* К разработке технологических основ изготовления новых фрикционных изделий сухого трения на Fe-основе методом динамического горячего прессования / Ю. И. Крыхтин, В. И. Карлов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (232) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении»). – С. 35–39.