Фадеев В. С., Афанасьева А. А., Ким В. А.

V. S. Fadeev, A. A. Afanasyeva, V. A. Kim

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ФРИКЦИОННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ МУФТ СТРЕЛОЧНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

INVESTIGATION OF FRICTION COMPOSITE MATERIAL MICROSTRUCTURE FOR ELECTRIC DRIVE COUPLINGS

Фадеев Валерий Сергеевич – доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «РОМБ».

E-mail: infotech.mos@gmail.com.

Mr. Valeriy S. Fadeev – Doctor of Engineering, Professor, General Director of JSC «ROMB». E-mail: infotech.mos@gmail.com.

Афанасьева Анна Алексеевна – аспирант кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: a.afanaseva@infotech-kms.ru.

Ms. Anna A. Afanasyeva – a Post Graduate Student, Material Technology and New Material Technology Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: a.afanaseva@infotech-kms.ru.

Ким Владимир Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Материаловедение и технология новых материалов» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kim.va@email.knastu.ru.

Mr. Vladimir A. Kim – Doctor of Engineering, Professor, Material Technology and New Material Technology Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kim.va@email.knastu.ru.

Аннотация. Проведены комплексное исследование микроструктуры фрикционного композиционного материала, включающего компьютерную металлографию, выполненную с помощью программного обеспечения Image.Pro.Plus 5.1, и механические испытания на специальном стенде с электроприводом СП-6. Определены оптимальная микроструктура материала и режимы его спекания, обеспечивающие стабильные условия работы фрикционных дисков муфт стрелочных электроприводов. Стабильные условия работы фрикционной муфты оценивались по величине силы тока, потребляемого электродвигателем привода, и ее колебаниям при проскальзывании фрикционных дисков.

Summary. Complex research of the frictional composite material microstructure including the computer metallography executed with the help of Image.Pro.Plus 5.1 software, and mechanical tests at the special panel with the SP-6 electric drive is conducted. The authors define the optimum microstructure of material and the modes of its agglomeration providing stable operating conditions of frictional disks of the electric point machine couplings. Stable operating conditions of the frictional coupling were estimated depending on current intensity consumed by the electric motor, and its fluctuations when slipping frictional disks.

Ключевые слова: микроструктура, композиционный материал, муфта, сила тока, трение, износ.

Key words: microstructure, composite material, coupling, current intensity, friction, wear.

УДК 621

Введение

Важными показателями стрелочных электроприводов являются надежность и эксплуатационная стабильность фрикционных муфт, обеспечивающие постоянство коэффициента трения в широком диапазоне изменения температуры и влажности внешней среды, отсутствие вибраций, механическую прочность, износостойкость и способность создавать нормативные контактные

нагрузки. При разработке новых материалов для фрикционных муфт стрелочных электроприводов решаются две основные задачи: повышение износостойкости и стабильность коэффициента трения. Износостойкость обеспечивается созданием псевдосплавов на основе железной матрицы, легированных молибденом, никелем и другими химическими элементами [1]. Стабильность коэффициента трения достигается путем подбора состава исходных порошков, режимов спекания и механической обработки для достижения необходимой структурной организации материала.

Работа фрикционного материала муфт электроприводов протекает в неравновесных условиях трения и изнашивания, поэтому эксплуатационная надежность этого сопряжения будет определяться свойствами вторичных диссипативных структур, образующихся в процессе контактного взаимодействия. Стабильность коэффициента трения прямым образом зависит от функционирования диссипативных структур, обеспечивающих механическую прочность и отток тепла из зоны фрикционного контакта. Работа диссипативных структур заключается в формировании стабильных динамических потоков носителей пластической деформации и тепла, при этом большая часть диссипации механической энергии в тепло обеспечивается за счет работы внутреннего трения в результате межзеренного скольжения. Из этого следует, что важной особенностью структурной организации фрикционного материала становится развитость межзеренных и межфазных границ, которая обеспечивает не только высокую активность диссипативных механизмов, но и механическую прочность и термическую устойчивость материала [2; 3].

В статье приводятся результаты исследований по разработке новых фрикционных материалов, получаемых методом порошковой металлургии, определению режимов спекания и термической обработки для получения структурного состояния материала, обеспечивающего стабильность коэффициента трения и износостойкость.

Методика исследования

Исследовались образцы одного химического состава (окись кремния 2...5,0 %, графит 2...5 %, медь 10,5...17,5 %, барит 2,0...5,2 %, железо остальное), но с разной микроструктурой, которая достигалась соответствующими режимами спекания и термической обработкой. Режимы спекания представлены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы спекания

Образцы	Режимы спекания
1	Нагрев до $T = 1150$ °С в течение 2,5 ч. Выдержка при $T = 1150$ °С 1 ч.
2	Нагрев до $T = 1150$ °С в течение 3 ч. Выдержка при $T = 1150$ °С 1 ч.
3	Нагрев до $T = 1150$ °С в течение 3 ч. 10 мин. Выдержка при $T = 1155$ °С 1,5 ч.

Из компонентов порошковой смеси при спекании жидкую фазу может обеспечивать только медь с температурой плавления $T_{пл} = 1085$ °С, но ее количество недостаточно для обеспечения полноценного жидкофазного спекания. Можно ожидать, что формирование структуры при спекании происходит главным образом за счет образования металлических связей в твердофазной области.

Травление микрошлифов осуществлялось 4%-м раствором азотной кислоты в спирте. Цифровые изображения микроструктур получали на металлографическом микроскопе Nikon при 200-, 400- и 1000-кратном увеличении. Компьютерная обработка изображения проводилась с помощью специальной программы Image.Pro.Plub.5.1. В качестве показателя развитости границ использовалась средняя плотность периметра границ, вычисляемая по формуле [4]

$$q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{P_i}{F_i} \right),$$

где N – число микроструктурных объектов, зафиксированных на единичной площади металлографического шлифа; P_i и F_i – соответственно периметр и площадь каждого

микроструктурного объекта. В зависимости от кратности увеличения на одной фотографии микроструктуры располагалось 1500...4500 объектов. Такое количество объектов на изображении микроструктур гарантировало высокую статистическую точность компьютерной обработки по 2...3 фотографиям одного и того же образца.

Триботехнические испытания разрабатываемого фрикционного материала проводили на специальном стенде с электроприводом СП-6. Стенд включал фрикционную муфту, диски которой были покрыты новым разработанным фрикционным материалом. Фрикционные диски при передаче момента прижимались усилием, которое создавалось набором тарельчатых пружин с помощью нагрузочной гайки. Сжимающая нагрузка повышалась ступенчато с шагом не более 1000 Н.

Фрикционные испытания исследуемых материалов заключались в проворачивании фрикционных дисков в течение 10 с при заданной величине усилия их прижатия. В результате трения фрикционных дисков между собой крутящий момент на двигателе электропривода увеличивался, при этом по величине силы тока можно было косвенно оценить энергетические потери, связанные с работой трения. Одновременно замерялись колебания силы тока, по которой определялась динамическая стабильность трения фрикционных дисков между собой.

Итак, в результате проведенного эксперимента измеряли усилие прижима фрикционных дисков и колебание силы тока в течение 10 с проскальзывания дисков относительно друг друга. По полученным данным рассчитывался диапазон изменения силы тока, приращение и относительное изменение силы тока, отнесенные к единице усилия прижима фрикционных дисков при их проскальзывании. Полученные эксплуатационные характеристики работы фрикционных материалов сравнивались с количественными показателями их структурной организации для оптимизации состава и режимов спекания.

Результаты исследования и их анализ

На рис. 1 представлены микроструктуры исследуемых образцов. Они состоят из одних и тех же компонентов, но ощутимо разнятся по структурной организации, которая достигалась за счет разных режимов спекания. Режимы спекания исследуемых материалов отличались длительностью нагрева и продолжительностью выдержки при максимальной температуре процесса. Минимальному времени подвергались образцы группы 1, а максимальному – группы 3. Это отражается в первую очередь на размере и форме спеченных перлитно-цементитных частиц и других структурных составляющих.

Матрица исследуемых фрикционных материалов состоит из пластинчатого перлита и цементита, представляющая структуру заэвтектоидной стали. По границам зерен располагаются силикатные, графитовые и медные фазы. Некоторое количество цементита присутствует в виде глобулярных образований внутри спеченных зерен. Как правило, такие зерна имеют относительно крупные размеры и образуются путем спекания нескольких мелких частиц исходного порошка. Поры разных размеров и форм присутствуют на границах зерен и внутри них.

Компьютерный анализ изображений микроструктур, выполненный с помощью программы Image.Pro.Plus.5.1, показал следующее.

Режимы спекания определяют размер и форму зерен и пор, и, как следствие, степень развитости границ раздела. Наибольшая степень развитости имеет место у образцов первой группы, средняя плотность границ которых составила $q = 1,065 \text{ мкм}^{-1}$. Образцы второй и третьей группы отличаются более низкой степенью развитости границ, равных соответственно 0,368 и 0,578 мкм^{-1} , при этом формирующаяся микроструктура отличается меньшими размерами пор и более гладкими границами. Такие поры обладают лучшей способностью образовывать объемные «карманы» микромасштабного уровня для смазки [5].

Наличие в микроструктуре медной фазы не влияет на теплопроводность материала, так как они не образуют каналы сплошной проводимости. Однако присутствие самой меди может создавать условия для развития микрогальванических пар, а они стимулируют образование аморфных сервовидных пленок, снижающих адгезионную компоненту коэффициента трения [6]. Более низкая зернистость микроструктуры образцов первой группы приводит к повышенным

микролокальным контактным напряжениям, и это может отрицательно сказываться на фрикционных процессах трения фрикционных дисков [7]. Подтверждением этому является увеличение диапазона изменения силы тока на электроприводе при проскальзывании фрикционных дисков.

Рис. 1. Микроструктуры исследуемых фрикционных материалов первой, второй и третьей групп

Меньшие значения показателя плотности границ образцов второй и третьей групп указывает на их более низкую развитость. Чем больше показатель плотности границ, тем выше их устойчивость и ниже сдвиговая активность. В результате зернограницных сдвигов совершается большая часть работы внутреннего трения при контактном взаимодействии, которая определяет плотность мощности диссипативных потоков, возникающих при контактной пластической деформации фрикционных материалов. Исходя из этого, можем ожидать, что образцы второй и третьей группы должны обеспечивать более стабильные условия при проскальзывании фрикционных дисков и лучшую динамику работы фрикционных муфт.

Относительное изменение силы тока определялось как частное от деления абсолютного диапазона изменения силы тока и его среднего значения. Полученная величина характеризует динамику и стабильность фрикционного взаимодействия дисков при их проскальзывании. Чем выше диапазон изменения силы тока, тем ниже стабильность фрикционного процесса. На рис. 2 показан характер изменения диапазона колебания силы тока при различных усилиях прижатия фрикционных дисков. Образец первой группы имеет существенно худшие динамические условия трения по сравнению с образцами второй и третьей групп. С повышением усилия прижима диапазон колебания силы тока при работе образцов первой группы возрастает, а у образцов второй и третьей групп наблюдается стабилизация и незначительное снижение. Образцы групп 2 и 3 практически идентичны между собой, а их поведение во фрикционном процессе подтверждает, что они обладают более высокими диссипативными свойствами.

Рис. 2. Относительное изменение силы тока на электродвигателе привода в зависимости от усилия сжатия фрикционных дисков при проскальзывании

С повышением усилия прижима при проскальзывании фрикционных дисков между собой среднее значение силы тока возрастает. Полученные зависимости для исследуемых материалов представлены на рис. 3. Единая зависимость для трех исследуемых материалов указывает на общность механизмов контактного взаимодействия при трении фрикционных дисков между собой независимо от структуры материала, которые характеризуются постоянством коэффициента трения.

Выполненные исследования позволили уточнить микроструктуру фрикционного материала, обеспечивающего более стабильные условия работы фрикционных муфт. Был определен химический состав материала, режимы спекания и термической обработки. В качестве количественного показателя структурной организации фрикционного материала, характе-

ризующего развитость границ и их диссипативные свойства, можно использовать среднюю плотность периметра границ.

Рис. 3. Влияние усилия сжатия фрикционных дисков на силу тока электродвигателя привода перевода стрелки

Выводы

Стабильные условия работы фрикционных муфт в значительной степени определяются структурной организацией материала фрикционных дисков. Сформулированы структурно-диссипативные требования, обеспечивающие стабильность работы фрикционных дисков, и определены химический состав и режимы спекания фрикционного материала, получаемые методом порошковой металлургии. Показано, что в качестве количественного показателя структурной организации фрикционного материала можно использовать среднюю плотность границ, разработана методика его определения. Показано, что с повышением средней плотности границ снижается диссипативная способность фрикционного материала, понижается динамическая стабильность фрикционного процесса при трении дисков между собой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Федорченко, И. М. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения / И. М. Федорченко, И. Н. Францевич, И. Д. Радомысльский. — Киев: Наукова думка, 1985. — 624 с.
2. Ким, В. А. Проявление физической мезомеханики при контактном взаимодействии, и изнашивании / В. А. Ким, Ш. А. Каримов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. — 2014. — № II-1(18). — С. 79-85.
3. Ким, В. А. Мезомеханика процессов контактного взаимодействия при трении и резании металлов / В. А. Ким, Ф. Я. Якубов, А. Г. Схиртладзе. — Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2017. — 200 с.
4. Ким, В. А. Количественные показатели структурной организации поликристаллических материалов / В. А. Ким, И. В. Белова, С. В. Золоторева // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. — 2014. — Т. 80. — № 4. — С. 43-46.
5. ГОСТ 18898-89. Методы определения плотности, содержания масла и пористости. — Введ. 1991-01-01. — М.: Изд-во стандартов, 1990. — 10 с.
6. Гаркунов, Д. Н. Трибоника / Д. Н. Гаркунов. — М.: Машиностроение, 1985. — 424 с.
7. ГОСТ 8233-56. Сталь. Эталоны микроструктуры. — Введ. 1957-06-30. — М.: Изд-во стандартов, 2004. — 12 с.