

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе
Дальневосточного государственного
университета путей сообщения

А.Ф. Серенко

« 03 » 2014 г.

Отзыв

ведущей организации на диссертацию Шакиной Антонины Владимировны «Разработка эффективной технологии получения вагонной тормозной колодки из металлокерамического фрикционного материала», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение).

Актуальность темы. Диссертационная работа Шакиной А.В. посвящена разработке новых материалов, реализация которых позволит повысить фрикционные свойства железнодорожных тормозных колодок.

В настоящее время на железнодорожном подвижном составе используются чугунные и полимерные колодки, обладающие низкими эксплуатационными свойствами. В данной работе, для изготовления вагонных колодок, предлагается металлокерамический материал, имеющий высокие физико-механические и фрикционные свойства.

Актуальность темы диссертации, связанной с разработкой нового фрикционного материала, не вызывает сомнений.

Целью диссертационной работы является исследование аддитивного влияния компонентов порошкового материала на его структуру и фрикционные свойства для разработки материала тормозной колодки повышенной износостойкости, со стабильным коэффициентом трения и колесосберегающим эффектом, а также технологии его изготовления.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Установлены и научно обоснованы зависимости изменения физико-механических (твердость, плотность, пористость) и фрикционных свойств порошковых материалов систем «железо – медь», «железо – углерод», «железо – хром» от содержания меди, углерода, хрома. Наблюдается экстремальный характер изменения фрикционных свойств в системе «железо – медь» с минимумом при значениях 30–40 % меди, обусловленным формированием на поверхности трения вторичной структуры (серого слоя), представляющей собой совокупность дисперсных слоев твердого раствора меди и железа, параллельных поверхности трения.

Минимум и максимум в значениях фрикционных свойств порошковых материалов «железо – углерод» наблюдаются при концентрации углерода 1–2,5 % и 9 % соответственно. Такой характер изменения фрикционных свойств можно

объяснить образованием при 2,5 % углерода структуры эвтектоидной стали (перлит) со свободным углеродом в порах материала, что подтверждается повышением твердости материала и снижением его коэффициента трения. При дальнейшем увеличении содержания углерода до 9 % происходит формирование структуры заэвтектоидной стали (перлит + цементит) (оставшаяся часть углерода находится в порах материала), а также рост пористости. Выкрашивание частиц цементита, а также рост пористости, снижающей твердость материала и прочность связи между участками металлической матрицы, ведут к росту объемного износа и коэффициент трения. При дальнейшем росте содержания графита (11–15 %) происходит снижение объемного износа и фрикционных характеристик вследствие влияния пленки, образованной избыточным количеством (до 8–12 %) свободного углерода. Кроме того, вследствие значительного роста объемного содержания углерода, разрушение материала происходит не столько по металлической матрице, сколько по участкам графита в объеме материала, что ведет к снижению износа. При этом металлическая матрица, выкрашиваясь по частицам цементита, обеспечивает высокий коэффициент трения, несмотря на смазывающее действие свободного углерода.

2. Установлены и научно обоснованы закономерности, описывающие влияние вида и содержания фрикционного наполнителя – оксидов алюминия и кремния – на износостойкость и фрикционные свойства порошкового материала. Наблюдается немонотонный характер изменения объемного износа порошкового материала с минимумом при содержании оксида алюминия (#110 от компании Saint Gobain) 7 %, глинозема Г-00 3 % и кварца пылевидного 3 %. Установленный характер зависимости износостойкости от содержания наполнителя определяется формированием в поверхностном слое наклепа с повышенной микротвердостью, а также наличием износостойких частиц наполнителя. При избытке наполнителя активизируется процесс разрушения поверхностного слоя вследствие концентрации напряжения на частицах наполнителя. При этом коэффициент трения стабилен и не зависит от концентрации фрикционных наполнителей (в рассмотренных пределах). Порошковые материалы с оксидом алюминия обладают меньшим коэффициентом трения по сравнению с материалами с оксидом кремния, что объясняется более высокой твердостью частиц оксида алюминия по сравнению с частицами кварца пылевидного (9 и 7 баллов по шкале Мооса соответственно).

Практическая значимость работы:

1. Разработано два состава фрикционных металлокерамических материалов вагонной тормозной колодки: на основе меди МЗ (мас. %: 40 Cu, 15 C, 2 Al₂O₃, 1 SiO₂, 1 Cr) и железа Ж6 (мас. %: 10 Cu, 15 C, 3,3 Al₂O₃, 1,7 SiO₂, 1 Cr). Материал Ж6 имеет значительно более высокую износостойкость, чем чугун и ТИ-ИР-300 – стандартные материалы вагонных тормозных колодок, применяемых в России (в 4,5 и 2,8 раз соответственно), превосходит по износостойкости зарубежный аналог МКМ (70 % Cu) на 18 % при более низкой себестоимости. При этом Ж6 обладает более высоким коэффициентом трения и, по сравнению с чугуном, МЗ и МКМ, оказывает щадящее воздействие на контртело и лучшую

теплопроводность по сравнению с полимерным композитом ТИИР-300.

2. На основе исследований влияния структуры металлокерамического порошкового материала на его фрикционные свойства, определены основные технологические параметры изготовления нового фрикционного материала вагонной тормозной колодки.

3. Разработана конструкция тормозной колодки, изготавливаемой из нового фрикционного материала.

Оценка достоверности результатов. Достоверность полученных результатов, приведенных в диссертационной работе подтверждается использованием известных теоретических разработок и современных методов определения, состава, структуры и свойств материала а также экспериментальными данными, полученными автором в результате многолетних исследований.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены общие сведения о системе «тормозная колодка – колесо», описаны состав, структура, свойства материалов и особенности взаимодействия элементов системы «тормозная колодка – колесо», выявлены тенденции создания новых фрикционных материалов вагонной тормозной колодки, а также приведены общие сведения о металлокерамических фрикционных материалах.

Во второй главе описаны использованные в работе методы исследования (фрикционные испытания, металлографические, электронно-микроскопические исследования, исследования микротвердости, а также методика проведения стендовых испытаний моделей тормозных колодок), статистической обработки экспериментальных данных и корреляционного анализа.

В третьей главе изложены общие требования к «идеальному» фрикционному материалу вагонной тормозной колодки, описана методика разработки нового металлокерамического фрикционного материала вагонной тормозной колодки на основе подхода «снизу – вверх», когда на первом этапе исследуется влияние отдельных компонентов порошкового материала на его структуру и свойства, определяются диапазоны оптимального содержания компонентов, а разработка многокомпонентного металлокерамического фрикционного материала осуществляется на основе полученных диапазонов содержания. Показана возможность применения предложенной методики для проектирования материала, состоящего из меди, углерода, железа, хрома и оксидов алюминия и кремния, ввиду отсутствия сложных химических взаимодействий между медью и углеродом, медью и железом, а также меди, углерода, железа и хрома с фрикционным наполнителем – оксидами алюминия и кремния.

В четвертой главе изложены результаты исследований влияния компонентов матрицы порошкового материала (меди, углерода, хрома в железе) на его структуру и фрикционные свойства.

1. Установлено влияние состава порошковых материалов «железо – медь» на их фрикционные свойства и дано объяснение полученных закономерностей с точки зрения структурной приспособляемости материала. Кривая зависимо-

сти объемного износа от концентрации меди в железе имеет минимум в диапазоне 30 – 40 % содержания меди; при этом коэффициент трения с ростом содержания меди остается постоянным (в пределах погрешности) до 40 % меди, а затем монотонно увеличивается. Такой характер зависимостей фрикционных свойств порошковых материалов «железо – медь» от концентрации компонентов объясняется формированием на поверхности трения вторичной структуры – серого слоя, представляющего собой совокупность слоев твердого раствора железа и меди дисперсностью 0,2–2,5 мкм.

2. Установлено и объяснено влияние состава порошковых материалов «железо – углерод» на их фрикционные свойства. Кривые зависимостей объемного износа и коэффициента трения от содержания углерода имеют минимум и максимум в диапазоне 1–2,5 % и 9 % содержания углерода соответственно. Характер зависимости износа и фрикционных свойств от концентрации углерода объясняется изменением структуры основного материала и поверхностного слоя с ростом содержания углерода. При содержании углерода до 1 % материал имеет ферритно-перлитную структуру, которая превращается в перлитную при 2,5 % углерода, при этом поверхностный слой состоит из наклепа и мезослоя, препятствующих износу. При содержании углерода 4–9 % материал имеет структуру заэвтектоидной стали, а поверхностный слой разрушается за счет выкрашивания частиц цементита без образования наклепа и мезослоя, что в совокупности с ростом пористости и снижением прочности связи между участками матрицы обеспечивает как высокий износ, так и коэффициент трения. При содержании углерода 11–15 % структура материала представляет собой сочетание участков заэвтектоидной стали, доэвтектического чугуна и свободного углерода (общее содержание которого по объему по сравнению с железом составляет ~ 6:1 при 15 % углерода по массе). Изнашивание поверхностного слоя этих материалов также представляет собой выкрашивание частиц свободного цементита без образования наклепа и мезослоя. Однако рост содержания свободного углерода до 8–12 %, во-первых, ведет к образованию графитовой пленки, несколько снижающей коэффициент трения, во-вторых, разрушение материала происходит не столько по металлической матрице, сколько по участкам графита, что снижает объемный износ. При этом коэффициент трения уменьшается не более, чем на 18 % при росте содержания углерода с 9 до 15 % вследствие наличия в зоне трения твердых цементитных частиц металлической матрицы.

3. Установлено и объяснено влияние хрома на фрикционные свойства порошковых материалов «железо – углерод – хром». Легирование порошковых материалов «железо – углерод» хромом в количестве 0,5 % ведет к значительному росту износостойкости вследствие упрочнения структуры материалов карбидами хрома. При этом максимальная износостойкость достигается при добавлении 1–2 % хрома благодаря образованию более развитой карбидной сетки (по сравнению с содержанием хрома 0,5 %), и в этом диапазоне практически не зависит от его концентрации, так как количество карбидов по границам зерен не изменяется.

В пятой главе изложены результаты исследований влияния фрикционного

наполнителя на структуру и фрикционные свойства материала.

1. Установлено влияние фрикционного наполнителя (оксидов алюминия и кремния) на фрикционные свойства порошкового материала: изменение объемного износа носит немонотонный характер с минимумом при содержании 7 % (для оксида алюминия #110) и 3 % (для глинозема Г-00 и оксида кремния); коэффициент трения не зависит от концентрации фрикционного наполнителя (в рассматриваемых пределах) вследствие превалирующего влияния деформационной составляющей, определяемой действием собственно частиц наполнителя в поверхностном слое порошкового материала, по сравнению с адгезионной составляющей, определяемой ферритной матрицей материала.

2. Немонотонный характер изменения объемного износа при использовании оксидов алюминия и кремния в качестве фрикционного наполнителя объясняется совместным влиянием измененного поверхностного слоя с повышенной микротвердостью, а также износостойкой фазы – частиц наполнителя. С ростом концентрации наполнителя выше оптимального значения содержание его частиц в поверхностном слое увеличивается настолько, что, распределяясь по границам зерен, они играют роль концентраторов напряжения, активизируя процесс разрушения поверхностного слоя, что ведет к усилению объемного износа.

3. Разница в значениях коэффициента трения при использовании наполнителей в виде оксидов алюминия и кремния объясняется различием твердости частиц этих материалов: частицы оксида кремния, имеющие меньшую твердость, реализуют на 45 % больший коэффициент трения по сравнению с частицами оксида алюминия.

4. Разница в износостойкости материалов с различными видами оксида алюминия объясняется разной дисперсностью их частиц: более мелкие частицы оксида алюминия #110 (~17 мкм) обеспечивают лучшую (до 5 раз) износостойкость по сравнению с частицами глинозема Г-00 (~24 мкм). При этом частицы оксида кремния (кварца пылевидного), имеющие значительно меньший диаметр (~4,9 мкм), чем частицы оксида #110 и глинозема Г-00, распределяясь по границам зерен в поверхностном слое, способствуют его разрушению, поэтому износостойкость материалов с этим наполнителем до 10 раз ниже износостойкости материалов с оксидом алюминия. Для достижения оптимального сочетания износостойкости и коэффициента трения необходимо использовать смесь оксидов алюминия и кремния.

В шестой главе описана разработка металлокерамического фрикционного материала на основе зависимостей, установленных в главах 4, 5, и оптимизация технологии его изготовления. Также приведены результаты стендовых испытаний модели тормозной колодки из разработанного фрикционного материала в сравнении с моделью из применяемого аналога – полимерного композита ТИ-ИР-300, подтверждающие результаты лабораторных испытаний разработанного металлокерамического фрикционного материала.

Основные выводы и результаты работы:

1. В диссертационной работе благодаря подходу проектирования «снизу –

вверх», включающему исследование влияния отдельных компонентов на свойства фрикционного материала, разработан металлокерамический композиционный фрикционный материал для вагонной тормозной колодки, износостойкость которого 4,5 раза больше, чем у чугуна вагонной колодки по ОСТ 32.194 – 2002 и в 2,8 раза больше, чем у колодки из полимерного композита ТИИР-300 при сохранении эффективности торможения и щадящем воздействии на колесо.

2. Установлено влияние состава порошковых материалов «железо – медь» на их фрикционные свойства и дано объяснение полученных закономерностей с точки зрения структурной приспособляемости материала. Кривая зависимости объемного износа от концентрации меди в железе имеет минимум в диапазоне 30 – 40% содержания меди; при этом коэффициент трения с ростом содержания меди остается постоянным (в пределах погрешности) до 40% меди, а затем монотонно увеличивается. Такой характер зависимостей фрикционных свойств порошковых материалов «железо – медь» от концентрации компонентов объясняется формированием на поверхности трения вторичной структуры – серого слоя, представляющего собой совокупность слоев твердого раствора железа и меди дисперсностью 0,2-2,5 мкм.

3. Установлено и объяснено влияние состава порошковых материалов «железо – углерод» на их фрикционные свойства. Кривые зависимостей объемного износа и коэффициента трения от содержания углерода имеют минимум и максимум в диапазоне 1 – 2,5% и 9% содержания углерода соответственно. Характер зависимости износа и фрикционных свойств от концентрации углерода объясняется изменением структуры основного материала и поверхностного слоя с ростом содержания углерода. При содержании углерода до 1% материал имеет ферритно-перлитную структуру, которая превращается в перлитную при 2,5% углерода, при этом поверхностный слой состоит из наклепа и мезослоя, препятствующих износу. При содержании углерода 4-9% материал имеет структуру заэвтектидной стали, а поверхностный слой разрушается за счет выкрашивания частиц цементита без образования наклепа и мезослоя, что в совокупности с ростом пористости и снижением прочности связи между участками матрицы обеспечивает как высокий износ, так и коэффициент трения. При содержании углерода 11-15% структура материала представляет собой сочетание участков заэвтектидной стали, доэвтектического чугуна и свободного углерода (общее содержание которого по объему по сравнению с железом составляет ~ 6:1 при 15% углерода по массе). Изнашивание поверхностного слоя этих материалов также представляет собой выкрашивание частиц свободного цементита без образования наклепа и мезослоя. Однако рост содержания свободного углерода до 8-12%, во-первых, ведет к образованию графитовой пленки, несколько снижающей коэффициент трения, во-вторых, разрушение материала происходит не столько по металлической матрице, сколько по участкам графита, что снижает объемный износ. При этом коэффициент трения уменьшается не более, чем на 18% при росте содержания углерода с 9 до 15% вследствие наличия в зоне трения цементитных частиц металлической матрицы.

4. Установлено и объяснено влияние хрома на фрикционные свойства по-

рошковых материалов «железо – углерод – хром». Легирование порошковых материалов «железо – углерод» в количестве 0,5% ведет к значительному росту износостойкости вследствие упрочнения структуры материалов карбидами хрома. При этом максимальная износостойкость достигается при добавлении 1 – 2% хрома благодаря образованию более развитой карбидной сетки (по сравнению с содержанием хрома 0,5%), и в этом диапазоне практически не зависит от его концентрации, так как количество карбидов по границам зерен не изменяется.

5. Установлено влияние фрикционного наполнителя (оксидов алюминия и кремния) на фрикционные свойства порошкового материала: изменение объемного износа носит немонотонный характер с минимумом при содержании 7% (для оксида алюминия #110) и 3% (для глинозема Г-00 и оксида кремния); коэффициент трения не зависит от концентрации фрикционного наполнителя (в рассматриваемых пределах) вследствие превалирующего влияния деформационной составляющей, определяемой действием собственно частиц наполнителя в поверхностном слое порошкового материала, по сравнению с адгезионной составляющей, определяемой ферритной матрицей материала.

6. Немонотонный характер изменения объемного износа при использовании оксидов алюминия и кремния в качестве фрикционного наполнителя объясняется совместным влиянием измененного поверхностного слоя с повышенной микротвердостью, а также износостойкой фазы – частиц наполнителя. С ростом концентрации наполнителя выше оптимального значения содержание его частиц в поверхностном слое увеличивается настолько, что, распределяясь по границам зерен, они играют роль концентраторов напряжения, активизируя процесс разрушения поверхностного слоя, что ведет к усилению объемного износа.

7. Разница в значениях коэффициента трения при использовании наполнителей в виде оксидов алюминия и кремния объясняется различием твердости частиц этих материалов: частицы оксида кремния, имеющие меньшую твердость, реализуют на 45% больший коэффициент трения по сравнению с частицами оксида алюминия.

8. Разница в износостойкости материалов с различными видами оксида алюминия объясняется разной дисперсностью их частиц: более мелкие частицы оксида алюминия #110 (~17 мкм) обеспечивают лучшую (до 5 раз) износостойкость по сравнению с частицами глинозема Г-00 (~24 мкм). При этом частицы оксида (кварца пылевидного), имеющие значительно меньший диаметр (~4,9 мкм), чем частицы оксида #110 и глинозема Г-00, распределяясь по границам зерен в поверхностном слое, способствуют его разрушению, поэтому износостойкость материалов с этим наполнителем до 10 раз ниже износостойкости материалов с оксидом алюминия. Для достижения оптимального сочетания износостойкости и коэффициента трения необходимо использовать смесь оксидов алюминия и кремния.

9. Исследовано влияние технологии получения металлокерамического фрикционного материала на его структуру и фрикционные свойства: оптимальным режимом является спекание при температуре 1090⁰ С, что обеспечивает форми-

рование цементитного каркаса по границам зерен и не провоцирует выпотевание меди. Применение отжига при 900 и 1030⁰ С нежелательно, т.к. ведет к формированию зернистых включений цементита, способствующих выкрашиванию материала и росту износа.

Замечания по диссертационной работе:

1. Для создания металлокерамических тормозных колодок автор использует порошки из западных регионов России и зарубежных компаний. Однако Дальневосточный регион обладает огромными запасами минерального сырья и экономически целесообразно использовать местное сырье;

2. В работе нет подробного описания химического и фазового составов материалов созданных тормозных колодок, а также причин повышения фрикционных свойств;

3. Испытания разработанных металлокерамических материалов проводились в лабораторных условиях и не подтверждены эксплуатационными;

4. В качестве исходных материалов для создания тормозных колодок использовался углерод, образующий с железом цементит и оксид кремния, что может способствовать повышению износа, колесных пар, задиров, выщербин и других дефектов;

5. В работе нет технико-экономического обоснования разработанного материала для тормозных колодок;

Однако указанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертации.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что диссертация Шакиной А.В. является законченной научно-квалификационной работой, содержащей научно-обоснованные технические и технологические решения по созданию металлокерамических тормозных колодок.

Диссертационная работа Шакиной Антонины Владимировны удовлетворяет требованиям п.9 раздела II «Положения о присуждении ученых степеней», а сам диссертант заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение).

Заведующий кафедрой

«Подвижной состав железных дорог» ДВГУПС,

д.т.н., профессор

В.М. Макиенко

Подпись  _____
(подписи)

Заверяю _____

Зам. начальника отдела _____

«03» 09 _____ 2014 г.

