

Обзорная статья

К. т. н. А. С. Нилов¹, к. т. н. В. И. Кулик¹, д. т. н. А. П. Гаршин² (✉)

¹ Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ», Санкт-Петербург, Россия

² ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет», Санкт-Петербург, Россия

УДК 666.762.81:621.83.059.1

АНАЛИЗ ФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОРМОЗНЫХ КОЛОДОК ДЛЯ ВЫСОКО-НАГРУЖЕННЫХ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ С ДИСКАМИ ИЗ КЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Приведен анализ основных тенденций, существующих в технологии производства современных фрикционных материалов и тормозных колодок с использованием керамических материалов (керамоматричных композитов — КМК) в высоконагруженных автомобильных тормозных системах на основе тормозных дисков из КМК с SiC-матрицей, армированной углеродными волокнами. Для сравнения также подробно анализируется ряд других материалов и технологий, используемых для изготовления тормозных систем.

Ключевые слова: керамические материалы, фрикционные керамические материалы, тормозные диски, тормозные колодки, керамоматричные композиты (КМК), композиты с SiC-матрицей, полимерные композиционные материалы, металлокомпозиты, углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), газо- и жидкофазные процессы получения УУКМ и КМК.

ВВЕДЕНИЕ

Тормозные системы являются одними из важнейших систем автомобильного, железнодорожного и авиационного транспорта. Элементы тормозных систем должны обеспечивать долговременность срока эксплуатации, независимость трибологических характеристик от температурных и погодных условий, стабильность при длительных сроках эксплуатации тормозных систем, малошумность и комфорт процесса торможения и т. д. Эти требования главным образом определяются комплексом физико-механических, теплофизических и трибологических характеристик материалов фрикционной пары.

Пара трения в автомобиле состоит, как правило, из тормозного диска и тормозных колодок, накладок и т. д. Тормозные диски в основном изготавливают из серого чугуна, различных марок сталей, титановых сплавов и композиционных материалов с металлической, углеродной и керамической матрицами, армированными абразивными порошковыми материалами, углеродными и керамическими волокнами. Вместе

с тем перечень материалов и композиций для тормозных дисков достаточно ограничен.

В отличие от тормозных дисков для тормозных колодок, производимых различными фирмами, базовый выбор материалов и, самое главное, количество различного рода добавок определяют огромное количество типов тормозных колодок. Тем не менее рецептуры и технологии формования фрикционных колодок являются, как правило, самой закрытой частью производственного процесса и в открытой печати практически не публикуются [1]. Причем фирмы-изготовители, как правило, разрабатывают их под соответствующие материалы тормозных дисков, температурные режимы и характер торможения, минимальность износа фрикционной пары, сроки эксплуатации, минимальную зависимость от погодных условий, экологичность и экономичность производства и эксплуатации, комфорт вождения автомобиля и его обслуживания и др. Среди крупнейших мировых производителей тормозных колодок можно отметить «Federal Mogul», «Honeywell», «TMD Friction», TRW, «Allied Signal», «Ferodo» (основатель — Великобритания), «Otto Zimmermann» (основатель — Германия), «Masuma» (Япония), «Hankook FRIXA» (Южная Корея), EBC, «Brembo Group» (главный офис в Италии, тормозные системы для



А. П. Гаршин

E-mail: apgarshin@gmail.com

автомобилей Porsche и Ferrari), ATE, «Akebono Roadhouse», «Finwhale», «Bosch», «Lockheed», «Nisshinbo» (NBK), «Sumitomo», «Akebono» (Япония), «Kashiyama», LPR и др. В странах СНГ — АТИ, ТИИР, «МарКон» (г. Ярославль), завод «АККОР» (г. Набережные Челны), Нижегородский завод по производству тормозных колодок «ЮККА» (Россия); «Dafmi», «Best» (Украина), ГНУ ИПМ, ПРУП «Молодечный завод порошковой металлургии» (Беларусь) и др.

Сложные условия работы тормозных устройств в автомобильном, железнодорожном и авиационном транспорте (температура в зоне контакта тормозных колодок при экстренном торможении может достигать 1000–1200 °С) требуют поиска термостойких и износостойких материалов для создания нового поколения фрикционных материалов и тормозных систем современного транспорта. Одним из весьма перспективных материалов для этой цели могут служить керамические композиционные материалы (керамоматричные композиты — КМК), отличающиеся комплексом таких эксплуатационных свойств, как высокий коэффициент трения, повышенная износ-, коррозионно- и теплоустойчивость (температура успешной эксплуатации может достигать 1200 °С), невысокие плотность и ТКЛР, отсутствие шума при торможении.

Общей тенденцией развития и совершенствования современных транспортных средств являются повышение мощности и увеличение скорости движения. Это приводит к тому, что температура в зоне трения фрикционной пары в условиях экстренного торможения может превышать 1200 °С. Эти обстоятельства постоянно стимулируют исследования по созданию новых типов фрикционных материалов с более высокими эксплуатационными характеристиками. Среди фрикционных материалов последнего поколения, которые потенциально могут быть использованы в высоконагруженных системах торможения, особое место занимают керамические композиционные материалы (керамоматричные композиты — КМК) с карбидкремниевой матрицей, армированной углеродными и другими типами волокон [2]. В настоящее время фрикционные КМК начинают активно применяться для производства тормозных дисков. Одна из важнейших проблем при разработке эффективных тормозных систем на основе тормозных дисков из КМК заключается в подборе для них соответствующих тормозных колодок, которые могли бы выдерживать жесткие условия эксплуатации (нагрев выше 1000 °С и абразивный характер трибоконтакта) и при этом иметь комплекс высоких триботехнических, физико-механических, теплофизических, эко-

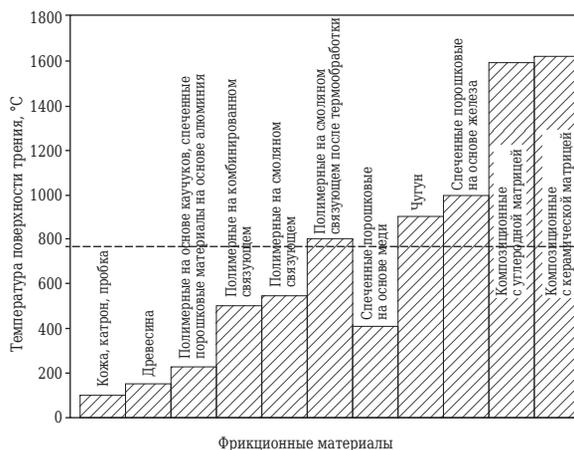


Рис. 1. Основные типы фрикционных материалов, применяемых в парах трения транспортных средств, и их эксплуатационные температурные диапазоны. Пунктирная линия — средний характерный температурный уровень эксплуатации пар трения с тормозным диском из КМК

логических и экономических характеристик. На рис. 1 показаны допустимые температурные диапазоны эксплуатации основных типов фрикционных материалов, применяемых в парах трения транспортных средств [3]. Из приведенного на рис. 1 перечня фрикционных материалов можно выделить следующие типы, которые по их температурному диапазону эксплуатации удовлетворяют требованиям к парам трения с тормозным диском из КМК: металлических, с металлической матрицей и с полимерной, углеродной и керамической матрицами. Цель данной работы — анализ особенностей этих типов фрикционных материалов для тормозных колодок и оценка возможности их использования в паре с тормозными дисками из КМК.

Фрикционные композиты с полимерной матрицей

До 90-х годов XX века производители тормозных колодок успешно применяли фрикционный композиционный материал на основе полимерной матрицы, армированной асбестовыми волокнами. Свойства асбеста гарантировали стабильный и достаточно высокий коэффициент трения, а высокий температурный порог (до 800 °С) допускал широкое поле эксплуатации материала. Однако из-за экологической опасности асбеста производство колодок с асбестовыми добавками неуклонно снижается. Хотя используемый в тормозных колодках длиноволокнистый хризотил-асбест не угрожает здоровью людей в отличие от разновидностей асбеста, относящихся к амфиболам [4]. Композиции с полимерной матрицей условно подразделяют на полиметаллические (с содержанием волокнистых и порошковых металлических добавок 30–70 %), малометаллические (с содержанием

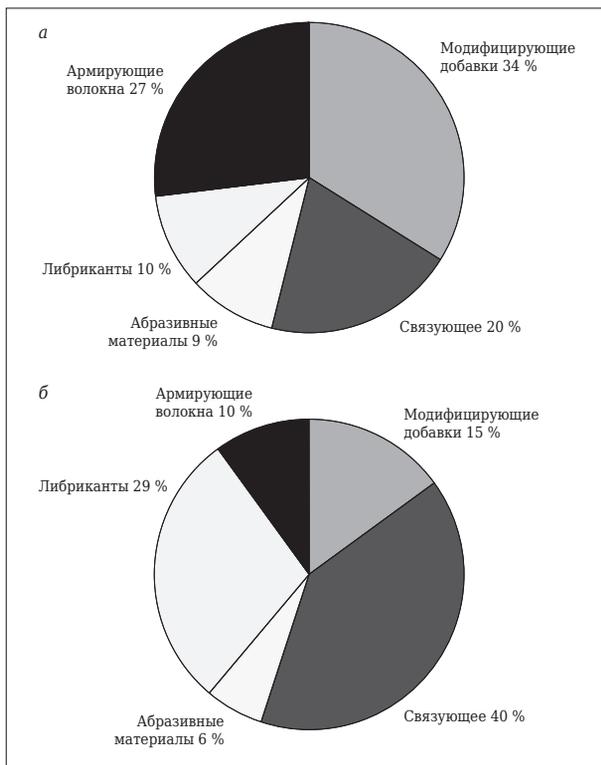


Рис. 2. Типовые составы композиций колодок на основе полимерной матрицы: а — по данным патента US 6080230; б — колодки фирмы «Ferodo»

металлических добавок 10–30 %) и безасбестовые органические (non-asbestos organic — NAO, или просто органические), в которых вместо металлических добавок используют органические и керамические волокнистые и порошковые материалы.

Фрикционные материалы с полимерной матрицей, как правило, содержат четыре типа компонентов: полимерные смолы, или компаунды, абразивные наполнители, модифицирующие добавки и различного рода армирующие материалы (рубленые волокна, войлок, сетка и т. д.) [5]. Некоторые типовые составы композиций тормозных колодок показаны на рис. 2 [6].

В качестве *полимерной связи*, как правило, используют каучуки (до 200 °С) и фенольные смолы или их модификации [6, 7], которые выдерживают температуру на поверхности трения до 400–450 °С. Небольшого повышения температур эксплуатации можно достичь за счет применения полиамидных смол типа АПИ-2, но они гораздо менее технологичны [8].

К основным типам *абразивных добавок* относятся порошки следующих материалов: SiO₂, Al₂O₃, SiC, B₄C, TiC, WC, Fe₂O₃, Fe₃O₄, Cr₂O₃, MgO, ZrSiO₄ и др. [6, 7, 9, 10]. Как правило, используются абразивные материалы твердостью по Моосу от 7 до 9.

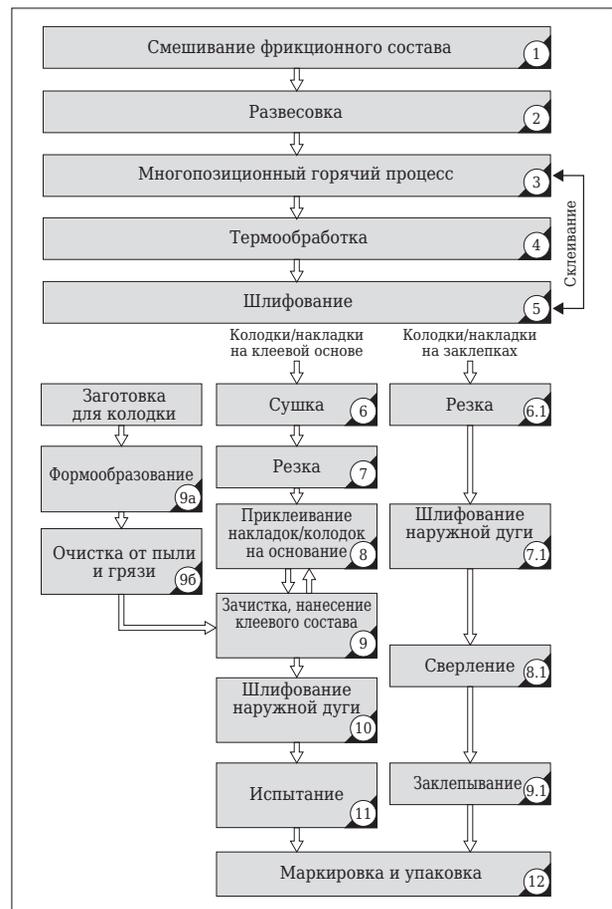


Рис. 3. Блок-схема типового технологического процесса получения автомобильных тормозных колодок на основе композиций с полимерной матрицей

Введение *модифицирующих добавок* направлено на решение широкого круга задач — образование пленки трения и стабилизацию самого процесса трения (либриканты), снижение износа, повышение коэффициента трения, теплостойкости и теплопроводности. Среди наиболее используемых модифицирующих добавок можно выделить CaSiO₃, Ca(OH)₂, CaCO₃, BaSO₄, MoO₃ и либриканты — MoS₂, графит, кокс, Sb₂S₃, PbS, Cu₂S [6, 7, 10]. В качестве модифицирующих добавок можно использовать также металлические порошки — Fe, Cu, Al, Sb и др., которые, помимо решения задач повышения теплопроводности, создания пленки трения и снижения износа, могут выполнять роль абразивных добавок.

В качестве *армирующих материалов* используют металлические (например, Fe, Cu, сталь) и органические (арамидные и углеродные) волокна, керамические волокнистые материалы (микрофибра из K₂TiO₃, Mg₄Si₆O₁₅(OH)₂·6H₂O (сепиолит), Al₂O₃, стеклянные и базальтовые волокна) [6, 7, 9]. Волокнистые наполнители, помимо повышения прочности и жесткости ма-

териала колодки, как и металлические порошки, улучшают триботехнические и теплофизические характеристики фрикционного материала.

На рис. 3 показана типовая блок-схема технологического процесса получения автомобильных тормозных колодок на основе композиций с полимерной матрицей [11]. Основные стадии этого процесса — смешивание фрикционного состава, горячее прессование, соединение с металлической основой, механическая обработка. Изготавливаемый по этой схеме тип тормозных колодок нашел широкое применение для стальных тормозных дисков. Однако у них есть серьезное ограничение — низкая термостойкость и, соответственно, низкая износостойкость при высоких температурах на поверхности трения, которые даже с учетом химической или термической модификации материала связки не должны превышать 800 °С. Так, установлено, что при повышении температуры на поверхности колодок из композита на полимерной связке от 100 до 350 °С их износ возрастает более чем в 5 раз [12].

Вместе с тем имеется информация о применении тормозных колодок с полимерной матрицей в паре с тормозными дисками из КМК. Например, приводятся результаты исследования такой фрикционной пары с коэффициентом трения примерно 0,6 [13] (рис. 4). Однако получаемые в работе температуры на поверхности трения 100–120 °С, вполне допустимые для материалов с полимерной матрицей, все же не характерны для реальных условий эксплуатации тормозных систем с дисками из КМК. На рис. 5 показаны зависимости коэффициента трения фрикционной пары диск из КМК – полимерная колодка и традиционной пары диск из серого чугуна – полимерная колодка от давления и температуры [1]. Видно, что для диска из КМК фрикционная пара демонстрирует более стабильные триботехнические характеристики в диапазоне 100–500 °С.

Таким образом, тормозные колодки на основе композитов с полимерной матрицей, в принципе, могут быть использованы в паре с дисками из КМК, однако их практическое применение должно быть ограничено относительно малонагруженными тормозными системами.

Фрикционные композиты на основе металлической матрицы

Композиты с металлической матрицей еще часто называют металлокерамическими [9] или металломатричными [14]. Металломатричные тормозные колодки получают спеканием различного рода металлических порошков с фрикционными (абразивными) порошками и до-

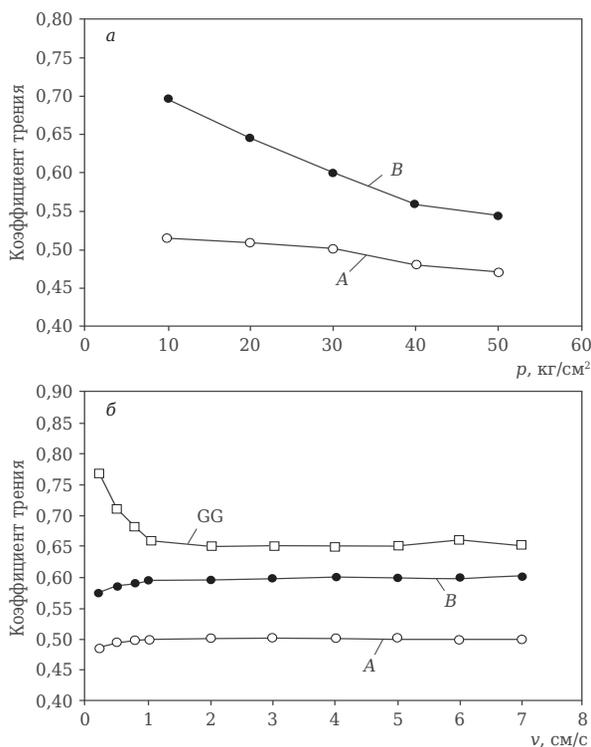


Рис. 4. Зависимости коэффициента трения фрикционной пары КМК – полимерный композит от давления p (а) и скорости v (б) по данным [13]; образцы А и В из КМК различаются содержанием остаточного углерода и кремния; GG — образец серого чугуна

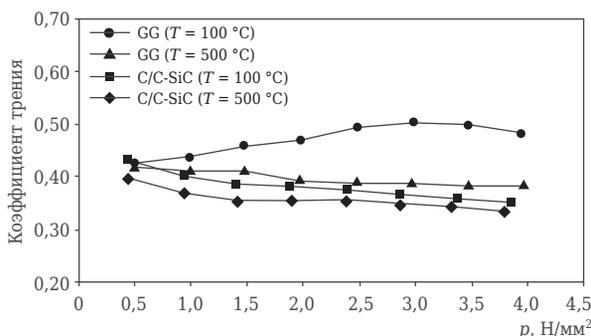


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения тормозных дисков на основе серого чугуна (GG) и КМК (C/C–SiC) в комбинации с полимерной тормозной колодкой от давления и температуры по данным [1]

бавками, стабилизирующими процесс трения и обеспечивающими отсутствие схватывания (либриканы). Наибольшее распространение получили материалы на основе железа и меди. Спеченные фрикционные материалы наиболее эффективно используют в тяжелонагруженных тормозных устройствах и фрикционных муфтах, что определяется их высокими износостойкостью, коэффициентом трения, теплоустойчивостью и теплопроводностью.

Фрикционные материалы на основе меди имеют, как правило, меньшие коэффициент

Таблица 1. Состав некоторых фрикционных порошковых материалов на медной основе [9]

Марка материала	Состав, мас. %						Другие добавки
	Cu	Sn	Pb	Fe	графит	Ni	
МК-5	72	9	8	4	7	–	–
М-140	73	9	8	4	4	–	1,5 % муллита
ФМ-1	71	9	5	4	4	–	3 % ситалла, 4 % молибдена
ФМ-2	79	–	6	4	4	–	3 % ситалла, 4 % нитрида бора
ФМ-8	69	8	8	4	7	1	3 % оксида иттрия

Таблица 2. Состав некоторых фрикционных порошковых материалов на основе железа [9]

Марка материала	Состав, мас. %					Другие добавки
	Fe	Cu	Ni	графит	Pb	
ФМК-8	45	–	25	7	–	10 % Cr; 6 % W; 7 % Cu ₂ S
СМК-80	48	23	–	–	–	6,5 % Mn; 6,5 % BN; 10 % B ₄ C; 3,5 % SiC; 2,5 % MoS ₂
ФЖ-3	74	6	–	8	–	3 % ситалл; 6 % BaSO ₄ ; 3 % Mo
ФЖ-6	75	4	–	8	–	4 % ситалл; 6 % BaSO ₄ ; 3 % нитрид ванадия
ФЖ-8	62	3	–	10	15	5 % ситалл; 3 % ZnSO ₄ ; 2 % Sn

трения и предельные температуры эксплуатации, чем материалы на основе железа, зато они более теплопроводны. При высокой температуре на поверхности трения материалы на основе меди (бронза), имеющие относительно низкую температуру плавления, проявляют склонность к схватыванию с контртелом, приводящую к вырыванию частичек материала. Поэтому применение спеченных материалов на основе меди ограничивается изготовлением узлов трения, в которых температура на поверхностях трения не превышает 300 °С [9], хотя, по другим источникам [15], она может достигать 500–650 °С.

В основе «медной» металлокерамики лежит медный порошок. Дополнительно могут вводиться различные по составу и количеству металлические добавки, такие как Sn, Pb, Zn, Fe, Ni, Ti, Al, Si, Mo, W и др. [9, 16, 17]. Среди этих добавок олово повышает прочность и твердость основы, мало влияя на коэффициент трения. Иногда олово частично или полностью заменяют более дешевым цинком. Эффективно повышает прочность материала также добавка алюминия, который увеличивает давление схватывания меди со сталью, улучшает жаропрочность и коррозионную стойкость порошкового фрикционного материала. В «медной» керамике к меди добавляют также сурьму, титан, никель, железо, молибден, вольфрам и другие металлы, способствующие снижению температуры на поверхности трения. В качестве компонентов, придающих материалу высокие фрикционные свойства, используют такие порошки, как SiO₂, Al₂O₃, SiC, B₄C, TiC, WC, Cr₂O₃, AlN и др., а также различные интерметалли-

ды — FeMo, FeCr, FeTi, FeW, FeV и т. п. В качестве смазки, предохраняющей фрикционный материал от чрезмерного износа, применяют графит, MoS₂, FeS, Cu₂S, VS₂, Li₂S, CaF₂, BN, BaSO₄, Fe₂(SO₄)₃ и др. В табл. 1 приведены составы некоторых отечественных фрикционных порошковых материалов на медной основе.

Фрикционные материалы на основе железа применяют главным образом для жесткого торможения с температурой на поверхности трения до 1200 °С. Для повышения теплопроводности добавляются порошки меди, а для улучшения триботехнических характеристик материала в него могут вводить такие же фрикционные и стабилизационные добавки, что и в материалы на основе меди, с оптимально подобранными составами. Некоторые типы фрикционных металлокерамических материалов на основе железа приведены в табл. 2. Типовой технологический процесс получения металлокерамических колодок включает подготовку шихты фрикционного состава, смешение, подпрессовку шихты, высокотемпературное спекание, механическую обработку (рис. 6) [18]. Соединение фрикционных колодок с металлическим основанием происходит на этапе спекания или на этапе сборки путем механического соединения или пайки.

Металлокерамические тормозные колодки на основе железа являются, пожалуй, самыми коммерчески привлекательными для использования их в паре с тормозными дисками из КМК. Результаты исследований по применению таких фрикционных пар трения [14, 19, 20] показали их высокие и стабильные триботехнические характеристики в широком интервале контактно-

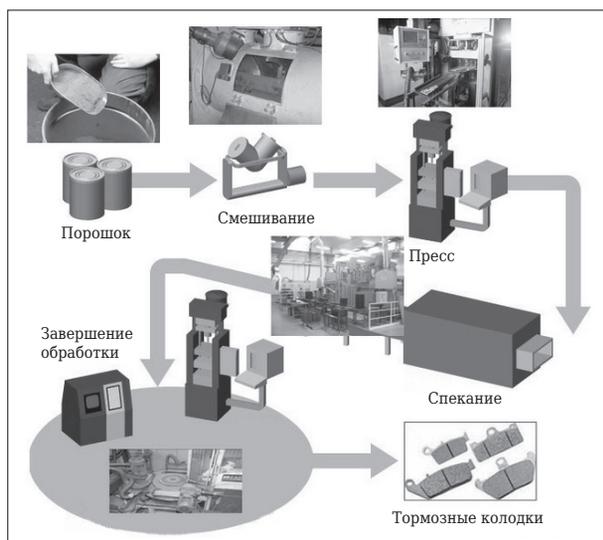


Рис. 6. Укрупненная схема типового технологического процесса получения металлокерамических колодок по данным [18]

го давления, скорости скольжения и температуры на поверхности трения. Кроме того, износ тормозных колодок относительно невысок, в то время как износ тормозного диска практически отсутствовал или был минимальным.

В работе [14] приведены также результаты исследования триботехнических характеристик фрикционной пары на основе тормозного диска из КМК и тормозной колодки из металломатричного композита. В частности, на рис. 7 показаны зависимости коэффициента трения от давления и относительной скорости, в том числе в сравнении с фрикционной парой серый чугун – металлокерамика. Видно, что пара КМК – металлокерамика обеспечивает значительно более стабильный коэффициент трения в исследованном диапазоне давлений и скоростей.

В работе [21] для пары трения тормозной диск из КМК – тормозная колодка из металлокерамики на основе железа также были получены высокие показатели коэффициента трения и низкие значения износа тормозного диска в широком диапазоне эксплуатационных температур по сравнению со стальным прототипом (рис. 8).

В работах [22, 23] приведены результаты определения триботехнических характеристик (коэффициент трения в зависимости от скорости и средний износ контртела) для образцов из КМК в паре с контртелом из фрикционной металлокерамики типа ФЖ-11 и композиции на основе порошков железа и керамической добавки нитрида алюминия (разработка ИПМ, Беларусь). Для сравнения были проведены испытания традиционной фрикционной пары чугун – ФЖ-11, а также пары КМК и металло-

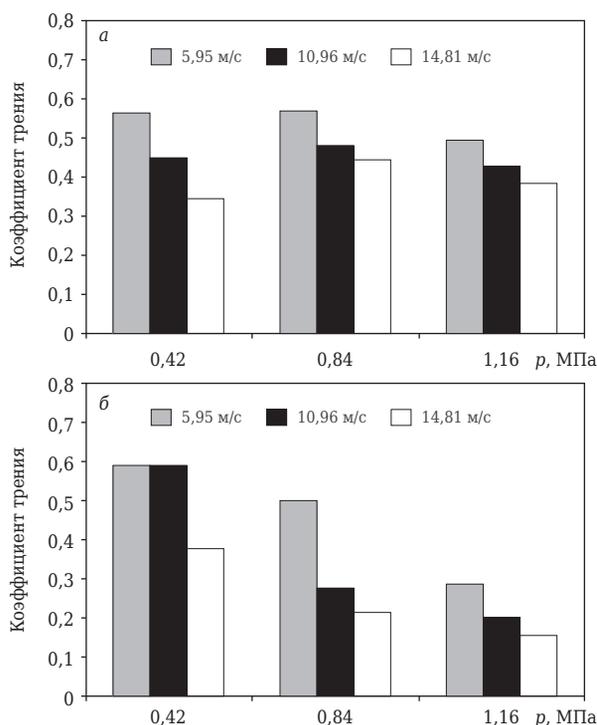


Рис. 7. Средний коэффициент трения в зависимости от давления p и относительной скорости для фрикционных пар: а — КМК – металлокерамика; б — серый чугун – металлокерамика

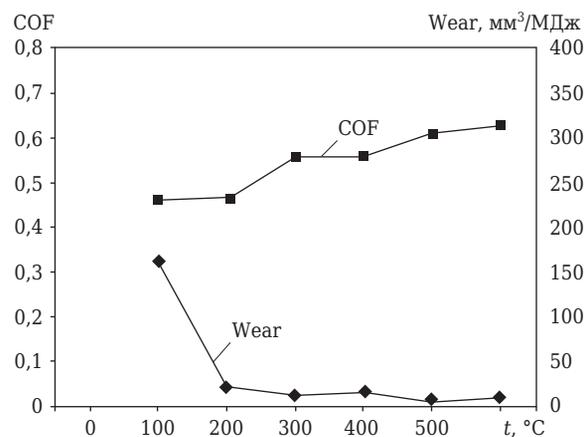


Рис. 8. Зависимости коэффициента трения COF и объемного износа Wear от температуры t поверхности трения для фрикционной пары КМК – металлокерамика

керамики на медной основе типа ФМ (рис. 9). Установлено, что использование фрикционной пары КМК – ФЖ-11 позволяет увеличить коэффициент трения почти в 2 раза по сравнению с традиционной парой чугун – ФЖ-11 и в 3 раза по сравнению с парой КМК – ФМ при сохранении того же уровня износа контртела.

В табл. 3 приведены результаты триботехнических испытаний на машине трения МТ-3 тормозного диска из КМК с двумя типами металлокерамических колодок на основе железа

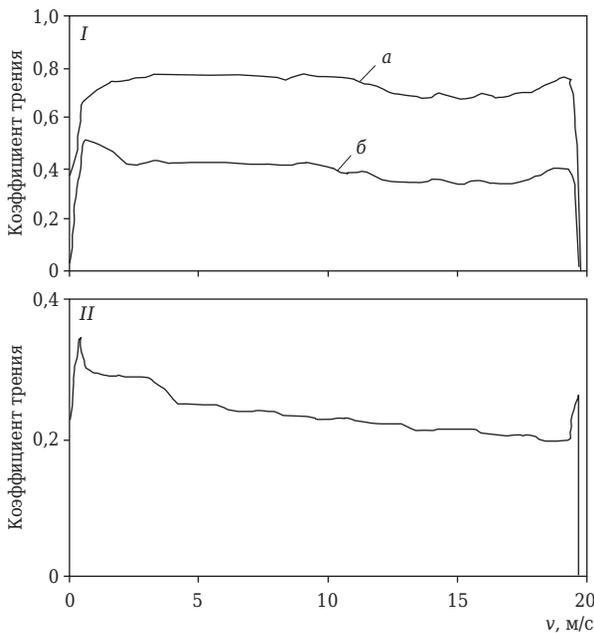


Рис. 9. Кривые зависимостей коэффициента трения от скорости v для различных пар трения: *I* — пары трения с ФЖ-11 (*a* — КМК – ФЖ-11, *б* — чугун – ФЖ-11); *II* — пара трения КМК – ФМ

с добавлением соответственно порошков карбида кремния и нитрида алюминия [22]. Полученные результаты показывают, что применение более твердых порошков (SiC) в составе металлокерамических колодок способствует повышению коэффициента трения, однако при этом отмечается существенно больший износ как контртела, так и самого тормозного диска из КМК. Такое различное поведение материала контртела, по-видимому, связано с разными механизмами разрушения твердых включений при фрикционном нагружении. В процессе износа твердые керамические добавки выходят на трущуюся поверхность и вступают в контакт с компонентами КМК. Как отмечается в работе [22], возможны два варианта их поведения.

Согласно первому варианту предполагается, что керамические частицы не разрушаются в процессе трения и вовлекаются в процесс поверхности КМК до тех пор, пока сопротивление деформированию не превысит силы сцепления поверхностей. В результате этого происходит

разрыв в плоскости контакта с существенной потерей массы. При этом такие частицы обеспечивают высокий коэффициент трения фрикционного материала, однако при этом вызывают относительно высокий износ как фрикционного КМК, так и самого металлокерамического контртела. Согласно второму варианту предполагается, что твердые включения контртела разрушаются в процессе работы. В этом случае они также вовлекаются в процесс КМК, однако разрушаются в процессе контакта с КМК с образованием мелких фрагментов. Эти фрагменты керамических частиц, как правило, внедряются в фрагментированный слой материала контртела, обеспечивая его прочностные свойства и уменьшение степени износа.

Реализация одного из двух вариантов и, соответственно, выбор конкретных абразивных компонентов и их долей в фрикционной композиции тормозных металлокерамических колодок во многом определяются соотношением твердости керамических добавок контртела и керамической матрицы КМК. В данном исследовании введение твердых SiC-частиц в металлокерамическую композицию приводило к реализации первого варианта поведения фрикционной пары, а менее твердых частиц AlN — к реализации второго варианта поведения керамических частиц на поверхности контакта фрикционной пары.

Как отмечается в работе [22], на характер процесса трения и триботехнические характеристики пары трения КМК – металлокерамика существенно влияют фазовый состав и соотношение структурных компонентов в самом тормозном диске из КМК. Так, варьируя объемной долей углеродных волокон (УВ) и, соответственно, долей карбидкремниевой матрицы, можно в широких пределах изменять показатели коэффициента трения и износа диска из КМК и металлокерамических колодок. В табл. 4 приведены результаты триботехнических испытаний пар трения из КМК с различной долей углеродного волокна и металлокерамического контртела на основе железа, графита и порошков карбида кремния. Результаты показывают, что наибольший коэффициент трения обеспечивает фрикционная пара с КМК-40, а наименьший износ

Таблица 3. Результаты триботехнических испытаний различных пар трения

Пара трения		Коэффициент трения		Износ (палец), мг/км		Износ (диск), мг/км	
диск	палец	I*1	II*2	I	II	I	II
КМК	Fe, C, AlN	0,38	0,41	1,49	1,58	0,06	0,63
	Fe, C, SiC	0,9	0,95	1,24	2,79	0,57	2,1

*1 Испытание при давлении 0,42 МПа.

*2 Испытание при давлении 0,51 МПа.

Таблица 4. Результаты триботехнических испытаний пар трения из КМК различного состава и металлокерамического контртела [22]

Начальное содержание УВ в углепластике, об. %	Тип КМК	Коэффициент трения	Износ КМК, мг/км	Износ контртела, мг/км
20	КМК-20	0,58	0,85	3,53
30	КМК-30	0,52	1,01	2,21
40	КМК-40	0,87	0,79	3,00
45	КМК-45	0,69	0,25	1,55

Таблица 5. Различные варианты рецептур УУКМ для тормозных колодок, получаемых методом PIP

Состав	Содержание компонента, %, в различных типах тормозных колодок			
	ZP01	ZP08	ZP13	ZP14
Углеродные волокна	34	33	33,5	29
SiC	12	9	20	17,5
Порошок железа	–	3,5	4	–
Графит	–	5	4	4
CaF ₂	4	2,5	–	–
Кокс	–	–	–	7
Фенольная смола и другие компоненты	50	47	38,5	42,5

имеет КМК-45. Вместе с тем наиболее предпочтительным по совокупности триботехнических характеристик является КМК-45; фрикционная пара характеризуется относительно высоким коэффициентом трения и самым минимальным износом керамического композиционного материала и контртела.

Фрикционные углерод-углеродные композиционные материалы

Фрикционные композиции на основе углеродной матрицы (главным образом с углеродными волокнами) изначально применяли для тормозных дисков из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ). Тем не менее, в настоящее время колодки из УУКМ с различной модификацией состава применяют в паре со стальными, алюмоматричными и керамическими тормозными дисками [24, 25]. Фрикционные материалы на основе УУКМ могут быть получены двумя способами или их комбинациями — жидкофазным, путем карбонизации полимерной матрицы углепластикового полуфабриката (PIP-процессы), или газофазным, путем осаждения пироуглерода из углеродсодержащей газовой среды в пористом волокнистом каркасе (CVI-процессы).

Главными достоинствами фрикционных композиций на основе углеродной матрицы являются высокий коэффициент трения, теплостойкость углеродной основы (> 1000 °C), размерно-температурная стабильность. Одна-

ко для этого материала характерны и существенные недостатки, такие как низкий коэффициент трения (0,15–0,20) до 250–300 °C, невысокая теплопроводность в направлении, перпендикулярном поверхности трения, и достаточно высокий износ [26]. Поэтому для надежной эксплуатации тормозных дисков и колодок из этого материала требуются их предварительный прогрев и поддержание в нагретом состоянии. Частично эти проблемы могут быть решены путем введения в состав композиции абразивных материалов и модификаторов, таких как SiC, Al₂O₃, B₄C, бор и металлические порошки или волокна (например, медные) [24, 26].

В научной литературе имеется информация об успешном опыте применения тормозных колодок из композитов с углеродной матрицей, полученной методом PIP, в паре с тормозными дисками из КМК [25, 27]. В работе [27] приведены различные варианты рецептур УУКМ для тормозных колодок, получаемых методом PIP (табл. 5), и результаты их триботехнических испытаний в паре с диском из КМК (табл. 6). Полученные результаты показывают высокую чувствительность трибологических характеристик пар трения к типу применяемых компонентов и их рецептурам. Тем не менее, несмотря на достаточно широкие возможности модифицирования материала колодок из УУКМ, имеющиеся негативные свойства такого материала (малый коэффициент трения до

Таблица 6. Результаты триботехнических испытаний тормозных колодок из УУКМ в паре с диском из КМК

Характеристика	Числовые значения для различных типов тормозных колодок			
	ZP01	ZP08	ZP13	ZP14
$\mu_{\text{ср}}$	0,228	0,24	0,31	0,5
μ_{min}	0,07	0,11	0,18	0,37
μ_{max}	0,52	0,43	0,57	0,62
$\mu_{600\text{ }^{\circ}\text{C}}$	0,16	0,28	0,31	0,45
$\mu_{20\text{ }^{\circ}\text{C}}$	0,09	0,13	0,21	0,55
Износ по массе, г/МДж	0,542	0,405	0,682	1,65
Износ по объему, мм ³ /МДж	276	233	342	1053
Плотность, г/см ³	1,66	1,62	1,69	1,61

250 °С, повышенный износ, в том числе из-за интенсивного поверхностного окисления выше 450 °С) не дают в полной мере рассматривать тормозные колодки из УУКМ в качестве перспективных при использовании их в паре с тормозными дисками из КМК.

Фрикционные керамические композиционные материалы

Следует отметить, что очень часто в рекламных проспектах и аннотациях под керамическими тормозными колодками понимаются различного рода композиции, содержащие абразивные керамические добавки в виде порошков и волокон. Введение во фрикционную композицию колодок таких добавок осуществляется как для металлокерамических, так и для композиционных материалов с полимерной и углеродными матрицами, но они от этого не становятся чисто керамическими. Поэтому правомерно, во избежание путаницы, называть керамическими только тормозные колодки, изготовленные из композиционного материала с керамической матрицей, армированной порошковыми или волокнистыми наполнителями (КМК).

Важнейшая проблема широкого применения этих уникальных материалов в компонентах систем торможения различных транспортных средств заключается в разработке экономически эффективной технологии их получения. В настоящее время наиболее важную операцию технологического процесса производства изделий из волокнисто-армированных КМК — насыщение (уплотнение) волокнистого каркаса матричным материалом реализуют с помощью различных твердо-, жидко- и газофазных методов, а также их комбинаций [1, 2, 28]. Получаемые этими способами изделия фрикционного назначения обладают таким комплексом высоких эксплуатационных характеристик, как высокий и стабильный коэффициент трения, его независимость от темпера-

турных и погодных условий, высокая износостойкость (температура эксплуатации 1200 °С и выше), стойкость к тепловым ударам, низкая плотность, ТКЛР и шумовые характеристики при торможении.

Следует отметить: несмотря на то, что газофазные методы получения композитов с углеродной и керамической матрицами позволяют изготавливать материал с высокими физико-механическими характеристиками, однако сам процесс получения является весьма длительным и трудоемким и, соответственно, сам материал очень дорогим для использования в автомобилях даже бизнес-класса.

Из всех фрикционных КМК наиболее широкое распространение получили композиты с карбидкремниевой матрицей, армированной углеродными волокнами (C/SiC). Среди методов получения фрикционных изделий из КМК наибольшую привлекательность с экономической точки зрения имеют жидкофазные методы: PIP-процессы (основанные на пиролизе кремнийсодержащей полимерной матрицы углепластикового полуфабриката) и LSI-процессы (основанные на жидкофазном силицировании пористых заготовок, в состав которых входят углеграфитовые компоненты). Более подробно особенности и разновидности технологических процессов получения фрикционных изделий из УУКМ и КМК изложены в работе [2]. Соединение фрикционных колодок с металлическим основанием происходит на этапе сборки путем механического соединения или пайки.

Достоинствами композиционных материалов с керамической матрицей, получаемых по технологии PIP, являются широкая возможность управления структурой и компонентным составом получаемых композиций, отсутствие термической и химической деградации армирующих углеродных волокон и порошковых добавок при проведении пиролиза

кремнийсодержащего связующего. Для улучшения триботехнических характеристик такие фрикционные композиции на стадии пропитки кремнийсодержащим связующим могут модифицироваться различными абразивными или стабилизирующими процесс трения добавками, такими как SiO_2 , Al_2O_3 , SiC , B_4C , TiC , WC , MgO , ZrSiO_4 , MoS_2 , SbS_3 , CaF_2 , графит и др. [29]. Из различных методов получения тормозных колодок на основе PIP-процессов представляет интерес двухстадийная технология получения фрикционной композиции, когда на первом этапе пропитки фенольным связующим с последующим пиролизом получается материал с пористой углеродной матрицей, а после второго этапа пропитки кремнийсодержащим связующим и пиролиза получается комбинированная углеродно-керамическая матрица [30]. Причем на первом этапе пропитки в фенольное связующее помимо абразивных и стабилизирующих добавок вводят порошки Ti , Ni или Cr , которые на высокотемпературных стадиях пиролиза образуют при химической реакции с углеродной матрицей разного рода карбиды, улучшающие триботехнические характеристики композиции.

Фирма «Starfire Systems», США, предложила ряд технологических вариантов изготовления тормозных колодок без применения углеродного волокна с использованием PIP-метода [31]. Согласно этим вариантам возможно получение как неармированных, так и армированных фрикционных материалов. Неармированные фрикционные материалы получают пиролизом смеси фенольных смол и кремнийсодержащих полимеров. Армированные фрикционные материалы получают путем смешивания порошков или рубленых волокон меди и/или железа и стекловидного графита, как правило, предварительно связанных фенольным или фурановым связующим, и последующей их пропиткой различного типа кремнийсодержащими связующими. Причем цикл пропитка – отверждение – пиролиз осуществляется не менее 4 раз.

Главный недостаток технологии получения КМК PIP-методом — повышенная пористость матрицы как следствие удаления летучих компонентов в процессе пиролиза. Эта проблема может решаться путем увеличения количества циклов пропитка – пиролиз, но это сразу приводит к резкому удорожанию получаемого материала. Кроме того, следует учитывать, что при изготовлении 1 кг керамики по технологии PIP образуется 9–10 кг токсичных отходов [32].

Метод LSI, коммерчески предпочтительный для автомобильных тормозных дисков из КМК, также может быть применен для полу-

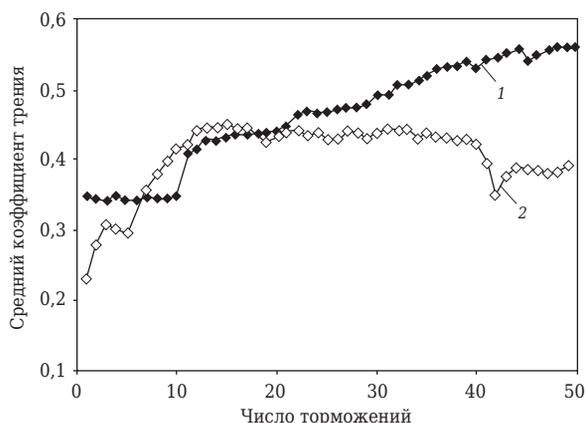


Рис. 10. Зависимость коэффициента трения фрикционных пар C/SiC–C/SiC (1) и диск из серого чугуна – колодка из C/SiC (2) от числа торможений

чения тормозных колодок [1, 33]. Наиболее широко при этом используется модификация метода LSI, основанная на жидкофазном силицировании карбонизированных углепластиков. Данные технологические процессы обладают рядом достоинств по сравнению с другими методами получения КМК: конечный материал имеет достаточно высокие прочность и теплопроводность; матрица имеет плотную, практически беспористую структуру; для реализации процесса требуется относительно простое технологическое оборудование; процесс относительно недорог и производителен вследствие небольшой продолжительности. В состав связующего, которым пропитывается волокнистый материал, обычно входят различные порошкообразные добавки. Например, в полимерное связующее вводят порошки нефтяного кокса, SiC , BN , графита, сульфида марганца и др. [34]. Тем не менее по отношению ко всем рассматриваемым технологическим вариантам получения фрикционных композиций метод LSI не позволяет использовать в качестве добавок многие виды металлических порошков, и в первую очередь кислородсодержащих добавок.

Другим вариантом улучшения эксплуатационных свойств элементов торможения из КМК является разработка градиентных и слоистых фрикционных материалов, в которых высокая износостойкость поверхностных слоев сочетается с высокой ударной вязкостью внутренних слоев [35, 36]. Правда, следует отметить, что наличие поверхностных износостойких слоев в большей степени характерно для тормозных дисков из КМК, так как они являются самым дорогостоящим элементом, рассчитанным на длительный срок эксплуатации, в системе торможения автомобиля, тогда как тормозные колодки являются расходным материалом.

Использование в качестве контртела в паре с тормозным диском из КМК колодок из аналогичного материала обеспечивает высокие триботехнические показатели таких пар трения. Как показано в работе [37], фрикционная пара C/SiC - C/SiC имеет более высокий и стабильный коэффициент трения в зависимости от числа циклов торможения, чем пара диск из серого чугуна – колодка из C/SiC (рис. 10).

Одним из требований к тормозным колодкам из КМК, помимо обеспечения высоких и стабильных триботехнических характеристик в паре с тормозным диском из однотипного материала, является обеспечение такого характера процесса трения, когда их износ в значительно большей степени превышает износ тормозных дисков, имея при этом минимально возможные значения. Эта задача может решаться, например, путем подбора для материалов тормозных дисков и колодок из КМК оптимального соотношения базовых структурных компонентов материалов — углеродных армирующих волокон, SiC-матрицы и остаточного кремния. В работе [22] была предпринята попытка такого рода подбора материалов и установлено, что пары образцов с различным (высоким и низким) начальным содержанием углеродных волокон (пара с объемным содержанием УВ 0,53 и 0,25 соответственно) по сравнению с парами образцов с одинаковым (высоким) начальным содержанием УВ (пара с объемным содержанием УВ 0,41 и 0,48 соответственно) обеспечивают более высокий и стабильный коэффициент

трения в зависимости от скорости ($\mu_{\text{сред}} 0,61$ и $0,46$ соответственно). При этом такие пары трения характеризуются значительным различием величин их износа (более чем в 3 раза), причем более низкий износ наблюдается у КМК с малым содержанием УВ и большей долей SiC-матрицы, тогда как высокое содержание SiC в КМК в обоих образцах пары трения приводит, как правило, к их большому взаимному износу.

Таким образом, проведенный анализ современных фрикционных материалов, применяемых для изготовления тормозных колодок, показал, что в паре с тормозными дисками из КМК в высоконагруженных системах торможения наиболее перспективными являются композиции с керамической матрицей и металлокерамика на основе железа. Следует отметить, что многие авторы [19, 38] считают, что характер процесса фрикционного контакта пары с тормозным диском из КМК существенно отличается от пары с металлическим тормозным диском. Это обстоятельство предполагает проведение специальных триботехнических исследований для тормозных дисков из КМК в паре с колодками из различных типов материалов и, соответственно, разработки соответствующих рецептур фрикционных композиций колодок для тормозных дисков из КМК, которые бы в максимальной степени удовлетворяли производителей и потребителей, в первую очередь по эксплуатационным, экономическим, технологическим и экологическим показателям.

Библиографический список

1. Handbook of ceramic composites ; ed. by Narottam P. Bansal. — Boston : Kluwer Academic Publishers, 2005. — 554 p.
2. **Гаршин, А. П.** Фрикционные материалы на основе волокнисто-армированных композитов с углеродной и керамической матрицей для систем торможения / А. П. Гаршин, В. И. Кулик, А. С. Нилов // Новые огнеупоры. — 2008. — №9. — С. 54–60.
3. **Garshin, A. P.** Braking friction materials based on fiber-reinforced composites with carbon and ceramic matrices / A. P. Garshin, V. I. Kulik, A. S. Nilov // Refractories and Industrial Ceramics. — 2008. — Vol. 49, №5. — P. 391–396.
4. <http://dpgu.ru/article/2011-03-15>. Технология керамических тормозных колодок — происхождение и преимущества.
5. **Eriksson, M.** Surface characterization of brake pads after running under silent and squealing conditions / M. Eriksson, F. Bergman, S. Jacobson // Wear. — 1999. — Vol. 232. — P. 163–167.
6. **Chan, D.** Review of automotive brake friction materials / D. Chan, G. W. Stachowiak // Journal of automobile engineering. — 2004. — Vol. 218. — P. 953–966.
7. **Blau, P. J.** Compositions, functions and testing of friction brake materials and their additives / P. J. Blau. — Reports ORNL/TM-2001/64, 2001. — 38 p.
8. **Муйченко, И. П.** Полиимидные композиционные материалы, формуемые прямым и литьевым прессованием : канд. дис. / Муйченко И. П. — М. : МАТИ, 1986. — 202 с.
9. **Хренов, О. В.** Металлокерамические фрикционные материалы / О. В. Хренов, А. А. Дмитриевич, А. В. Лешок. — Минск, 2011. — 42 с.
10. **Tang, C. F.** Combinatorial screening of ingredients for steel wool based semimetallic and aramid pulp based nonorganic brake materials / C. F. Tang, Y. Lu // Journal of reinforced plastics and composites. — 2004. — Vol. 23, №1. — P. 51–63.
11. http://stanko-produkt.ru/sp/catalog/production_of_automobile_brake_linings_pads.php.
12. **Yun, R.** Performance and evaluation of nonasbestos organic brake friction composites with SiC parti-

cles as an abrasive / R. Yun, S. G. Martynková, Y. Lu // Journal of Composite Materials. — 2011. — Vol. 45, № 15. — P. 1585–1593.

13. **Jang, G. H.** Tribological properties of C/C–SiC composites for brake discs / G. H. Jang, K. H. Cho, S. B. Park [et al.] // Metals and materials international. — 2010. — Vol. 16, № 1. — P. 61–66.

14. **Kermc, M.** Development and use of an apparatus for tribological evaluation of ceramic-based brake materials / M. Kermc, M. Kalin, J. Vizintin // Wear. — 2005. — Vol. 259. — P. 1079–1087.

15. Полимеры в узлах трения машин и приборов : справочник ; под ред. А. В. Чичинадзе. — М. : Машиностроение, 1988. — 328 с.

16. **Kryachek, V. M.** Friction composites: traditions and new solutions (review). Powder materials / V. M. Kryachek // Powder metallurgy and metal ceramics. — 2004. — Vol. 43, № 11/12. — P. 581–592.

17. **Федорченко, И. М.** Современные фрикционные материалы / И. М. Федорченко, В. М. Крячек, И. И. Панаюти. — Киев : Наукова думка, 1975. — 334 с.

18. <http://shopmoto.ru/tech/detail.php?ID=37463>.

19. **Stadler, Z.** Friction and wear of sintered metallic brake linings on a C/C–SiC composite brake disc / Z. Stadler, K. Krnel, T. Kosmac // Wear. — 2008. — Vol. 265, № 3/4. — P. 278–285.

20. **Wang, Y.** Friction surface evolution of carbon fibre reinforced carbon/silicon carbide (Cf/C–SiC) composites / Y. Wang, H. Wu // Journal of the European Ceramic Society. — 2010. — Vol. 30, № 15. — P. 3187–3201.

21. **Krnel, K.** Carbon/Carbon–Silicon–Carbide dual-matrix composites for brake discs / K. Krnel, Z. Stadler, T. Kosmac // Materials and manufacturing processes. — 2008. — Vol. 23. — P. 587–590.

22. **Кулик, В. И.** Исследование триботехнических характеристик композиционных материалов с карбидкремниевой матрицей / В. И. Кулик, А. С. Нилов, А. П. Гаршин [и др.] // Новые огнеупоры. — 2012. — № 8. — С. 45–56.

Kulik, V. I. Study of tribological properties of composite materials with a silicon carbide matrix / V. I. Kulik, A. S. Nilov, A. P. Garshin, V. V. Savich, A. A. Dmitrovich, D. I. Saroka // Refractories and Industrial Ceramics. — 2012. — Vol. 53, № 4. — P. 259–268.

23. **Кулик, В. И.** Триботехнические исследования фрикционной пары «карбидкремниевый композиционный материал – спеченные порошковые материалы на основе металлокерамики» / В. И. Кулик, А. С. Нилов, С. Е. Дёмин // 10-я междунар. науч.-техн. конф. : «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка», г. Минск, Беларусь, 12–14 сентября 2012. — Минск : Белорусская наука, 2012. — С. 85–92.

24. **Пат. US 7338987.** Friction material composition and friction material using the same / Ono M., Nagayoshi T., Inoue M. et al. ; заявл. 21.05.04 ; опубл. 04.03.08.

25. **Пат. US 2010/0065389.** Carbon fiber reinforced carbon matrix composite for brake pad back plate /

Gilboy L. F., Wolf R. A., Morey A. M. ; заявл. 16.09.09 ; опубл.18.03.10.

26. **Старченко, В. Н.** Исследование триботехнических характеристик фрикционных C–C композитов / В. Н. Старченко, М. В. Павленко, В. В. Овчаренко // Вісник СНУ ім. Володимира Даля. — 2011. — № 6. — С. 105–109.

27. **Stadler, Z.** Carbonised-material-based brake pad for a C/C–SiC composite brake disc / Z. Stadler // Materiali in tehnologije. — 2001. — Vol. 35, № 3/4. — P. 205–208.

28. **Li, Zh.** Preparation and properties of C/C–SiC brake composites fabricated by warm compacted — in situ reaction / Zh. Li, P. Xiao, X. Xiong // International journal of minerals, metallurgy and materials. — 2010. — Vol. 17, № 4. — P. 500–505.

29. **Пат. US 6265071.** Brake unit including brake disc and brake lining / Gross G., Haug T., Näumann E. et al. ; заявл. 15.09.98 ; опубл. 24.07.01.

30. **Пат. US 7799250.** Ceramic materials for friction linings / Huener R., Bauer M., Winkermann P. ; заявл. 16.02.06 ; опубл.21.09.10.

31. **Пат. EP 1910245.** Ceramic-forming polymer material / Sherwood W. J., Tarnowski L. A. ; заявл. 21.06.06 ; опубл. 16.04.2008.

32. **Стороженко, П. А.** Новые бескислородные предкерамические полимеры — нанометаллокарбосиланы и наноразмерные наполнители — уникальные материалы для повышения прочности и окислительной стойкости углеграфитов и стабилизации высокопрочной и высокотемпературной керамики / П. А. Стороженко, А. М. Цырлин, С. П. Губин [и др.] // Серия : Критические технологии. Мембраны. — 2005. — № 4 (28). — С. 68–74.

33. **Langhof, N.** The effect of residual silicon in CMC brake pads on friction and wear / N. Langhof, R. Voigt, H. Mucha, W. Krenkel // Proc. 6th European Conference on Braking JEF 2010, Lille, France, 2010. — P. 71–78.

34. **Naslain, R.** Si-matrix composite materials for advanced jet engines / R. Naslain, F. Cristin // MRS Bulletin 09, 2003. — P. 854–858.

35. **Krenkel, W.** C/C–SiC composites for hot structures and advanced friction systems / W. Krenkel // Ceramic engineering and science proceedings. — 2003. — 24 [4]. — P. 583–592.

36. **Пат. WO 2008007411.** Braking band composite structure of a brake disc / Goller R. S., Mauri B., Orlandi M. ; заявл. 13.07.07 ; опубл. 17.01.08.

37. **Blau, P. J.** Research on non-traditional materials for friction surfaces in heavy vehicle disc brakes. Reports ORNVTM-2004/265, 2004. — 42 p.

38. www.eurobrake.net/.../EB2012-FM-01.pdf. Friction films on C–SiC discs after dynamometer tests with different commercial brake pad / W. Osterle, C. Deutsch, I. Dorfel // Thesis of EuroBrake 2012 conference, 16–18 April 2012, Dresden, Germany. ■

Получено 23.03.15

© А. С. Нилов, В. И. Кулик, А. П. Гаршин, 2015 г.