

УДК 629.113

СОВРЕМЕННЫЕ ФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМАХ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

В. В. Бернацкий, к. т. н., доц. / Н. Н. Макаренко, магистр
Университет машиностроения (МАМИ)

Современная модель развития и совершенствования автомобилей и транспортно-технологических комплексов включает в себя следующие аспекты: снижение массы, повышение мощности и увеличение скорости движения. А значит, актуальнее становится проблема повышения активной безопасности, которая во многом определяется эффективностью работы тормозных систем.

К тормозным системам предъявляется достаточно большой перечень требований, соблюдение которых гарантирует обеспечение безопасности при торможении, выполнение постоянно возрастающих нормативных требований к величине тормозного пути, времени торможения, допускаемому замедлению, долговременности срока эксплуатации, экономичности и технологичности процесса изготовления и ремонта, независимости эксплуатационных характеристик от температурных и погодных условий.

Эффективность торможения автомобиля во многом определяется свойствами установленных на нём шин. Вопросу исследования характеристик шин при торможении при работе в составе тормозной системы посвящено большое количество исследований, как теоретических, так и экспериментальных.

В данной работе рассматривается другой аспект функционирования тормозной системы, влияющий на эффективность торможения.

Одна из наиболее ограниченных по ресурсу автомобильных пар трения — пара «тормозной элемент — колodka». Условия её работы характеризуются как особо тяжёлые. Это обусловлено высокими контактными давлениями (до 10 МПа) и интенсивным разогревом поверхности трения (до 600 °С и выше).

Основными фрикционными материалами современных тормозных систем являются чугун, спечённые мате-

риалы на основе порошков различных металлов, металлокерамика, различные полимерные материалы, в том числе с применением асбеста. Однако всё возрастающие требования по энергонагруженности тормозных устройств, а также Конвенция МОТ № 162 «Об охране труда при использовании асбеста» приводят к необходимости проведения исследований по созданию новых типов фрикционных материалов с более высокими эксплуатационными характеристиками.

Основными факторами, влияющими на работоспособность фрикционной пары трения, являются максимальная температура и её градиент по толщине фрикционного элемента, а также величины статической и динамической нагрузок, которые приводят к возникновению тепловых и механических напряжений в материале фрикционного элемента.

При оценке работы тормозных систем исходят в основном из трёх параметров: коэффициента трения, его стабильности во времени и скорости износа фрикционного материала. Значения коэффициента трения в основном зависят от температуры поверхности трения, скорости движения транспортного средства и удельного давления контакта пары трения. Стабильность коэффициента трения — это показатель того, насколько однородно трение в течение периода торможения. Износ трущихся поверхностей определяется либо по потере массы элемента пары трения, либо по их линейному или объёмному износу.

Среди современных фрикционных материалов последнего поколения, которые нашли бы практическое применение в высоконагруженных системах торможения, особое место занимают композиционные материалы на основе углеродной и керамической матриц, армированных различными типами волокон. Данные материалы обладают значительными преимуществами по сравнению с традиционными фрикционными материалами, прежде всего металлическими и металлокерамическими:

- малая масса (примерно на 40–60 % легче по сравнению с традиционными материалами);

- высокая стойкость к изнашиванию, что позволяет существенно увеличить срок эксплуатации;
- способность поглощать при торможении много большее количество кинетической энергии путём преобразования её в тепловую;
- высокая стойкость к термическому удару;
- высокая допустимая температура эксплуатации — более 1 000 °С.

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) применяются в высоконагруженных узлах трения, для которых характерно высокое тепловыделение. Эти материалы имеют высокий коэффициент трения, особенно при повышенных температурах (0,7–0,8 при температуре выше 400–500 °С; см. рис. 1), и характеризуются высокой его стабильностью независимо от удельного контактного давления на поверхности трения, скорости движения транспортного средства, условий среды, а также они малошумны при эксплуатации. Кроме того, УУКМ отличаются отсутствием такого эффекта, как схватывание тормозных дисков, который характерен для металлокерамических материалов, возникает вследствие локального расплавления металлической матрицы и ведёт к полному или частичному уменьшению скорости вращения колеса.

Основным недостатком УУКМ как фрикционного материала в тормозных системах является его низкий коэффициент трения (0,06–0,18) при отрицательных или невысоких (до 100 °С) температурах. Это обстоятельство влечёт за собой либо применение различных ступенчатых схем торможения, либо прогрев материалов тормозных узлов через несколько предварительных торможений. Для повышения начального коэффициента трения в полимерное связующее могут добавляться абразивные порошки на основе кремния, алюминия, бора. Таким образом, начальный коэффициент трения может быть повышен практически в два раза, но при этом происходит некоторое снижение мак-

симальных величин коэффициента трения при работе фрикционного материала в зоне высоких температур.

Другим недостатком этих материалов является повышенная окисляемость углеродного волокна и матрицы, начиная с температуры 600–650 °С, что приводит к ускоренной деградации поверхности трения и снижению средней износостойкости при разных температурных и силовых эксплуатационных условиях. Решением данной проблемы является нанесение специальных защитных лакокрасочных покрытий, которые способствуют устранению столь пагубного явления.

Как и углерод-углеродные фрикционные материалы, керамические композиционные материалы (ККМ) используются в тормозных системах высокоскоростных и высоконагруженных транспортных средств, когда температура на поверхности пары трения может достигать 800–1 000 °С.

Керамические композиционные материалы, используемые для фрикционных пар трения, разделяются на армированные различного типа волокнами и неармированные — горячепрессованные и реакционноспечённые.

Фрикционные ККМ имеют очень хорошие триботехнические характеристики: высокий коэффициент трения, его малую зависимость от скорости транспортного средства на начало торможения, температуры поверхности в зоне трения (уменьшение с начальных 0,6–0,7 до 0,45–0,55 при температуре выше 500 °С; см. рис. 1), контактного давления (уменьшение на 10–20 % при увеличении давления до 6... 8 МПа; см. рис. 2) и погодных условий. Материалы с керамической матрицей имеют наименьший износ при эксплуатации по сравнению с УУКМ, который оценивается примерно в 1 мкм на 1 500 км пробега.

Основные проблемы материалов на основе керамической матрицы связаны с их низкой стойкостью к механическим ударным нагрузкам. В связи с этим применение неармированных керамических композиционных

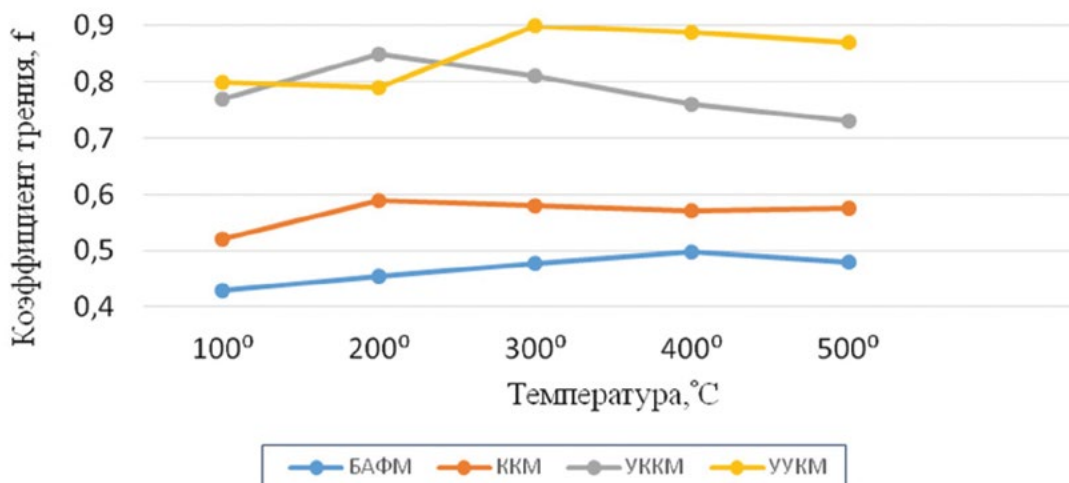


Рисунок 1.
Результаты оценки фрикционных свойств колодок дискового тормоза в зависимости от температуры

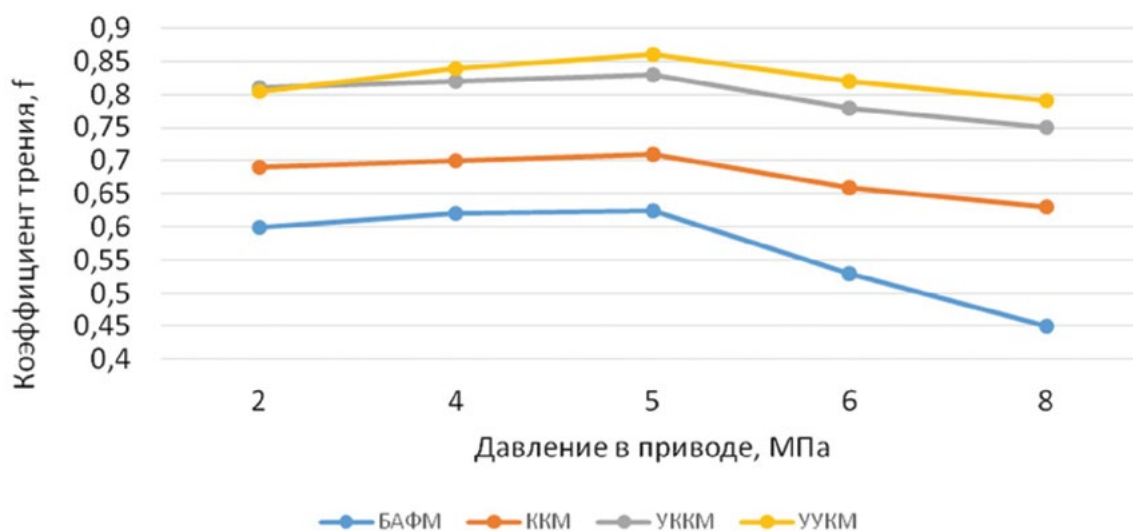


Рисунок 2. Результаты оценки фрикционных свойств колодок дискового тормоза в зависимости от давления в пятне контакта на поверхности трения

материалов считается нецелесообразным. Это обстоятельство приводит к необходимости использования армированных ККМ, которые способны выдерживать высокие ударные нагрузки, возникающие в процессе интенсивного торможения, что, несомненно, ведёт к усложнению технологии их производства и удорожанию всего изделия в целом.

Особое положение среди современных фрикционных материалов занимают углерод-керамические композиционные материалы (УККМ) — волокнистые композиты с карбид-кремниевой матрицей, армированные углеродными волокнами и получаемые методом пропитки углерод-углеродной заготовки расплавом кремния.

Благодаря исключительно высокой твёрдости и стойкости к абразивному износу карбида кремния, такие композиты являются одними из самых перспективных современных материалов для изделий фрикционного назначения.

Первые попытки получения УККМ были осуществлены в СССР более тридцати лет назад, однако немногим более десяти лет назад эти материалы стали рассматриваться в качестве фрикционных материалов для тормозных колодок и дисков. Получаемые по этой технологии фрикционные композиционные материалы

различаются по составу (волокна, наполнители), микроструктуре (содержание керамики, её распределение), свойствам (плотность, прочность, теплопроводность), а также по условиям получения (нанесение покрытий на волокна, температура процесса и т. д.).

Фрикционные УККМ могут иметь различные структуры, полученные либо послойной укладкой ткани или однонаправленных слоёв, либо хаотичным армированием из волокон различной длины (см. рис. 3).

Было выявлено, что применение технологии пресования заготовок, основанной на использовании коротких волокон, позволяет значительно удешевить и упростить производство фрикционных деталей. Кроме того, квазиизотропные композиты, армированные короткими волокнами, имеют более высокую теплопроводность в направлении, перпендикулярном поверхности трения, по сравнению со слоистыми структурами на основе тканей и однонаправленных лент. Это приводит к снижению температуры на поверхности тормозных дисков и, как следствие, к более высокому и стабильному коэффициенту трения и более низкой скорости износа. С другой стороны, композиционный материал, полученный технологией послойной укладки армирующих волокон и обладающий анизотропными

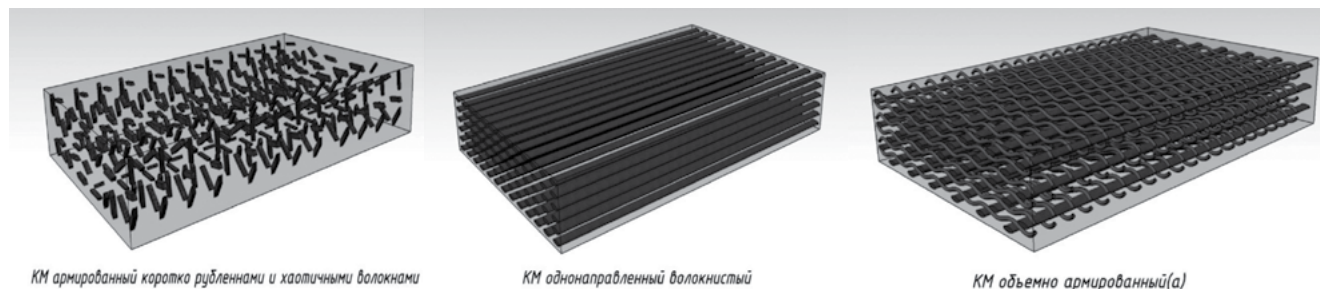


Рисунок 3. Результаты оценки фрикционных свойств колодок дискового тормоза в зависимости от давления в пятне контакта на поверхности трения

Таблица 1. Сводная таблица результатов испытаний фрикционных накладок, изготовленных из безасбестовой композиции с применением армирующего углеродного волокна

Сводная таблица результатов испытаний фрикционных накладок, изготовленных из безасбестовой композиции																										
№ П/П	1-е базовое испытание			2-е базовое испытание			1-е испытание на потерю свойств				2-е испытание на потерю свойств				1-е испытание на восстановление свойств			2-е испытание на восстановление свойств			Испытание на износ					
	Число торможений	Сила трения	Коэффициент трения	Число торможений	Сила трения	Коэффициент трения	Время, мин.	Температура, °F	Сила трения	Коэффициент трения	Время, мин.	Температура, °F	Сила трения	Коэффициент трения	Температура, °F	Сила трения	Коэффициент трения	Температура, °F	Сила трения	Коэффициент трения	Число торможений	Сила трения	Коэффициент трения			
Образец № 1	1	80	0.53	1	70	0.47	0	200	81	0.54	0	200	70	0.47	500	83	0.55	600	70	0.47	1	82	0.55			
	5	78	0.52	5	71	0.47	0.5	290	81	0.54	0.5	270	72	0.48	400	89	0.59	500	75	0.50	20	80	0.53			
	10	80	0.53	10	71	0.47	1	370	80	0.53	1	350	73	0.49	300	86	0.57	400	73	0.49	40	73	0.50			
	15	81	0.54	15	71	0.47	1.5	440	77	0.51	1.5	420	74	0.49	200	82	0.55	300	70	0.47	60	74	0.49			
	20	81	0.54	20	72	0.48	2	510	65	0.43	2	470	74	0.49				200	71	0.47	80	69	0.47			
							2.5	550	66	0.44	2.5	520	74	0.49							100	68	0.45			
Образец № 2	1	78	0.52	1	71	0.47	0	200	81	0.54	0	200	70	0.47	500	70	0.47	600	70	0.47	1	81	0.54			
	5	77	0.51	5	71	0.47	0.5	290	81	0.54	0.5	290	71	0.47	400	81	0.54	500	75	0.50	20	75	0.50			
	10	80	0.53	10	73	0.49	1	360	78	0.52	1	380	72	0.48	300	81	0.54	400	74	0.49	40	76	0.51			
	15	81	0.54	15	73	0.49	1.5	420	76	0.51	1.5	440	71	0.48	200	83	0.55	300	70	0.47	60	71	0.47			
	20	81	0.54	20	75	0.50	2	460	68	0.45	2	490	70	0.47				200	70	0.47	80	70	0.47			
							2.5	490	64	0.43	2.5	540	68	0.47							100	71	0.47			
						3	520	65	0.43	3	630	66	0.45													
						3.5	550	64	0.43	3.5	650	65	0.44													
Сводная таблица результатов испытаний фрикционных накладок, изготовленных из безасбестовой композиции																										
№ П/П	Образец № 1										Образец № 2															
1-е базовое испытание	Число торможений										1		10		20		1		10		20					
	Сила трения										80		80		81		78		80		81					
	Коэффициент трения										0.53		0.53		0.54		0.52		0.53		0.54					
2-е базовое испытание	Число торможений										1		10		20		1		10		20					
	Сила трения										70		71		72		71		73		75					
	Коэффициент трения										0.47		0.47		0.48		0.47		0.49		0.50					
1-е испытание на потерю свойств	Время, мин.										0.5		1.5		2.5		1		2		3					
	Температура, °F										290		440		550		360		460		520					
	Сила трения										81		77		66		78		68		65					
	Коэффициент трения										0.54		0.51		0.44		0.52		0.45		0.43					
2-е испытание на потерю свойств	Время, мин.										0		1		2		3		0.5		1.5		2.5		3.5	
	Температура, °F										200		350		470		540		290		440		540		650	
	Сила трения										70		73		74		70		71		71		68		66	
	Коэффициент трения										0.47		0.49		0.49		0.45		0.47		0.48		0.47		0.44	
1-е испытание на восстановление свойств	Температура, °F										500		400		300		200		500		400		300		200	
	Сила трения										83		89		86		82		70		81		81		83	
	Коэффициент трения										0.55		0.59		0.57		0.55		0.47		0.54		0.54		0.55	
2-е испытание на восстановление свойств	Температура, °F										600		500		400		300		600		500		400		300	
	Сила трения										70		75		73		71		70		75		74		70	
	Коэффициент трения										0.47		0.50		0.49		0.47		0.47		0.50		0.49		0.49	
Испытание на износ	Число торможений										1		40		80		20		60		100					
	Сила трения										82		73		69		75		71		70					
	Коэффициент трения										0.55		0.50		0.47		0.50		0.47		0.47					

Таблица 2. Материалы пар трения и их комбинации в компьютерном исследовании теплостойкости различных фрикционных материалов

Пункт рис. 3 Тело трения	а)	б)	в)
Колодка	Асбополимер	ККМ	УККМ с низкой теплопроводностью
Диск	СЧ15	ККМ	УККМ с высокой теплопроводностью

свойствами, в котором высокая износостойкость поверхностных слоёв сочетается с высокой ударной вязкостью внутренних слоёв, является наиболее подходящим для изготовления фрикционных накладок. Получаемые изделия характеризуются низкой теплопроводностью и высокими эксплуатационными качествами.

Компьютерное моделирование температурного исследования теплостойкости различных фрикционных материалов в среде Siemens NX показало следующие результаты.

Критерием сравнения и оценки материалов при исследовании с заданными граничными условиями стал градиент температуры по толщине тел трения. Используемые в исследовании материалы и их комбинации представлены в табл. 2.

Основным преимуществом УККМ является их «программируемость». Применяя различные технологические методы и решения в процессе производства, можно получить материал с требуемыми конечными свойствами, что может являться практическим решением широкого круга проблем, связанных со следующими аспектами:

- высокой энергонагруженностью тормозных систем;
- ограничением применения асбестосодержащих изделий;
- повышением ресурса, тепломеханических и фрикционных качеств фрикционных материалов тормозных систем;
- повышением эффективности работы тормозных систем и активной безопасности движения.

Фрикционные материалы на основе УУКМ и ККМ в первую очередь нашли бы практическое применение в высоконагруженных системах торможения самолётов, скоростных автомобилей и мотоциклов, тяжёлой боевой техники, высокоскоростного железнодорожного транспорта, подъёмно-транспортных устройств.

Технико-экономический эффект от использования новейших фрикционных материалов в тормозных системах серийных автомобилей может включать следующие аспекты:

- снижение неподрессоренных масс и уменьшение гироскопического эффекта;
- улучшение управляемости автомобилей и мотоциклов;
- высокий экономический эффект, получаемый за счёт уменьшения эксплуатационных расходов, свя-

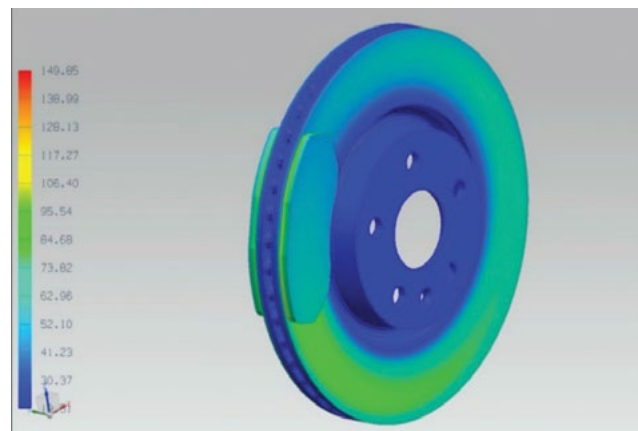
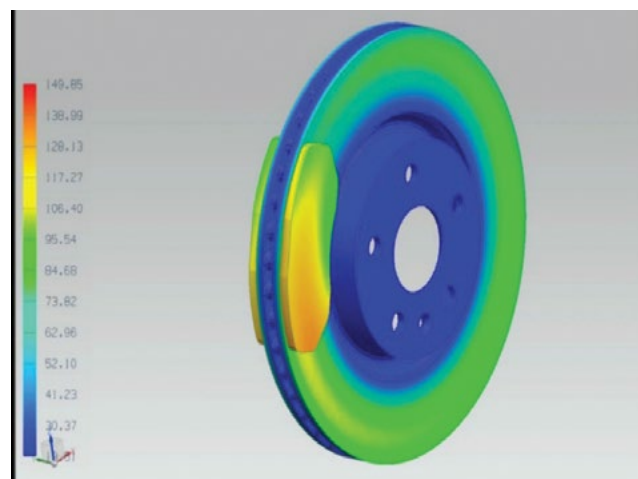
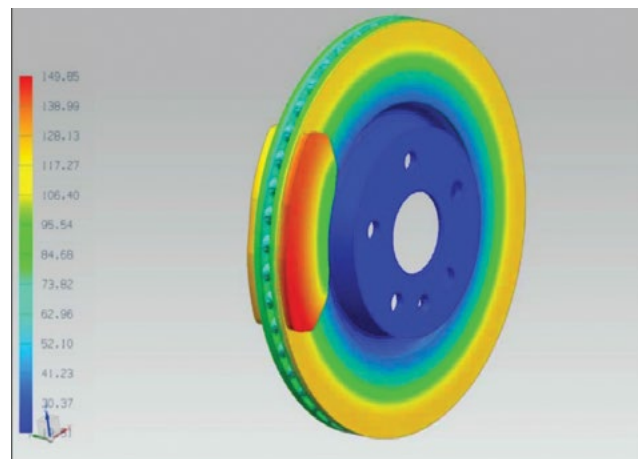


Рисунок 4. Компьютерная модель исследования теплостойкости различных фрикционных материалов

занных с приобретением и ремонтом деталей тормозной системы.

Обладая высокими и стабильными триботехническими характеристиками, высокой тепло- и износостойкостью, они весят примерно на 45–65 % меньше по сравнению с традиционными материалами, а срок эксплуатации оценивается не менее чем в 300 тысяч км пробега автомобиля. Кроме того, экономия топлива для автомобилей при их использовании может достигать до 4–6 %.

Потребность рынка в автомобильных тормозных дисках из композиционных материалов с керамической матрицей в ближайшие пять-десять лет оценивается примерно в 120–200 тысяч штук в год. Организация точного промышленного производства решает вопрос о снижении себестоимости изделий, что даёт возможность их использования не только в спортивных автомобилях и автомобилях класса люкс, но и в автомобилях экономкласса. Применение в серийных легковых и грузовых автомобилях в качестве фрикционных материалов ККМ может привести к созданию более надёжных систем торможения, способных сократить путь и время торможения (особенно экстренного торможения), и, как следствие, может существенно повысить безопасность дорожного движения.

Однако более перспективным в ближайшие три-пять лет представляется применение в современных автотранспортных средствах отечественных фрикционных безасбестовых композиционных материалов, армированных различными типами волокон, в том числе и углеродными, которые соответствуют требуемым мировым стандартам.

Испытания, проведённые на производственно-испытательной базе ОАО «КамАЗ», выявили результаты, приведённые в табл. 1. Режимы и порядок проведения испытаний регламентированы стандартом SAE J661a.

Необходимость применения данных материалов заключается также в решении ряда вопросов, связанных с импортозамещением и созданием качественной исследовательской и технической базы для разработки и совершенствования перспективных материалов фрикционного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Федорченко И. М., Крячек В. М., Панаиоти И. И. Современные фрикционные материалы. — Киев, 1975.
2. Полимеры в узлах трения машин и приборов: справочник / под ред. А. В. Чичинадзе. — М., 1988.
3. Мигунов В. П. Современные фрикционные металлокерамические материалы и перспективы их использования в машиностроении // Оптимальное использование фрикционных материалов в узлах трения машин. — М., 1973.
4. Кулик В. И., Нилов А. С. Современные системы торможения на основе фрикционных композитных материалов с углеродной и керамической матрицей // Оборонный заказ: интернет-приложение. — 2007. — № 17 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ozakaz.ru/> (дата обращения: 13.07.2015).
5. Мелешко А. И., Половников С. П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. — М.: САЙНС-ПРЕСС, 2007.
6. Бернацкий В. В., Майоров А. Ф. Стендовое оборудование для испытаний тормозов автомобиля и его совершенствование для возможности оценки работоспособности элементов тормозной системы с АБС. — Журнал автомобильных инженеров. — 2014. — № 2 (85). — С. 36–39.
7. Бернацкий В. В., Красавин П. А., Круглов С. М., Мело Обландо Хорхе Луис. К вопросу корреляции характеристик увода шин при стендовых исследованиях. — Известия МГТУ «МАМИ». — 2013. — Т. 1. — № 2 (16). — С. 68–72.