

ПРИМЕНЕНИЕ КЕРАМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ В КОНСТРУКЦИЯХ УЗЛОВ СЦЕПЛЕНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННОЙ АВТОТРАНСПОРТНОЙ ТЕХНИКИ

Нилов А.С.¹, Жуков Д.А.²

*¹Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург;*

*²Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I, Санкт-Петербург*

Ключевые слова: автотранспортная техника, «сухие» и «мокрые» узлы сцепления, фрикционные материалы, керамоматричные композиты.

Аннотация. Проведен анализ перспектив применения композитов с SiC-матрицей в элементах системах сцепления «сухого» и «мокрого» типа высоконагруженной автотранспортной техники. Рассмотрены базовые технологические процессы, составы, эффективные области применения и достигаемые триботехнические характеристики рассматриваемых композитов. Показано, что такие композиты могут рассматриваться как эффективная альтернатива традиционным фрикционным материалам.

THE USE OF CERAMIC MATRIX COMPOSITES IN THE DESIGNS OF CLUTCH UNITS OF HIGHLY LOADED MOTOR VEHICLES

Nilov A.S.¹, Zhukov D.A.²

¹Baltic State Technical University "VOENMEH", Saint-Petersburg;

²Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, Saint-Petersburg

Keywords: motor vehicles, "dry" and "wet" clutch units, friction materials, ceramic matrix composites.

Abstract. The analysis of the prospects for the use of composites with SiC -matrix in the elements of "dry" and "wet" type clutch systems of heavily loaded motor vehicles has been carried out. The basic technological processes, compositions, effective fields of application and achieved tribotechnical characteristics of the considered composites are considered. It is shown that such composites can be considered as an effective alternative to traditional friction materials.

В настоящее время все большее внимание уделяется вопросам повышения надежности и сроков эксплуатации высоконагруженных систем сцепления трансмиссий автотранспортной техники, облегчению их управления, снижению трудоемкости технического обслуживания, независимости и стабильности трибологических характеристик от температурных и погодных условий, снижению производственных и эксплуатационных затрат и т.п. Именно муфта сцепления, как правило, лимитирует ресурс и наработку между регулировками и ремонтами трансмиссий. При этом существующая тенденция, связанная с увеличением энергонасыщенности и единичной мощности транспортных средств, приводит

к ужесточению условий работы муфты сцепления как при трогании их с места, так и в процессе движения. Передача крутящего момента в таких сцеплениях осуществляется за счет сил трения нажимным, фрикционным и опорным дисками. Скольжение элементов сцепления генерирует тепловую энергию за счет трения. Высокая скорость скольжения может приводить к существенному повышению температуры и, как следствие, к термомеханическим напряжениям и деформациям, высокому механическому износу, трещинам и другим видам повреждения диска сцепления.

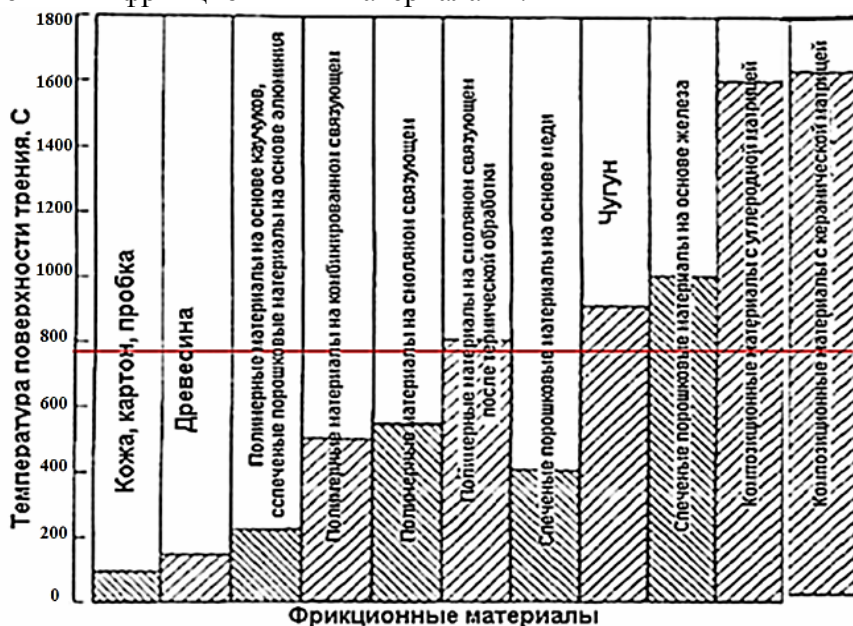
Фрикционные дисковые сцепления подразделяются по виду трения на «сухие» и работающие в масле («мокрые»). Существует достаточно много конструктивных схем исполнения муфт сцепления, но при этом основной ее фрикционной структурной единицей является пара трения «вращающийся ведущий диск – стационарный ведомый тормозной диск». Ведущие и ведомые диски могут быть изготовлены из мономатериала, либо с применением фрикционных накладок. Фрикционные накладки выполняются в виде колец, секторов, лепестков трапециевидной формы и других видов.

В узлах сцепления нашли применение различные фрикционные материалы: металлы (сталь и чугун); материалы на целлюлозно-бумажной основе; композиционные материалы (КМ) на основе полимеров (каучуков, термо- и реактопластов); металлокерамические материалы; материалы на основе углеродной композиции; керамоматричные КМ. Для каждого типа фрикционного материала характерны свои условия эксплуатации, энергонагруженности и конструктивного исполнения элемента трения.

Вместе с тем, для дисков сцепления, предназначенных для высокоскоростной и тяжелой техники, как колесной, так и гусеничной характерны высокие механические и температурные условия эксплуатации. Так, например, для дисков сцепления автомобиля Porsche Carrera GT характерны скорости вращения двигателя более 20000 об^{-1} и температуры трибоконтакта более 800°C [1]. Таким образом, учитывая, что для высоконагруженных «сухих» дисковых сцеплений, температуры на поверхностях трения могут достигать более 800°C , а как отмечается в работе [2], то такие температуры возможны и для «мокрых» сцеплений, можно выделить следующие типы фрикционных материалов, которые по их температурному диапазону эксплуатации в той или иной степени удовлетворяют требованиям фрикционного контакта: металлические, композиции с металлической, углеродной и керамической матрицами (рис. 1) [3]. И как отмечается в работе [4] особое место для высоконагруженных автотранспортных средств занимают фрикционные материалы последнего поколения – керамоматричные композиты (КМК) с SiC-матрицей, армированной углеродными волокнами (УВ) - C_f/SiC .

КМК применяются для повышения эффективности фрикционных систем, особенно для высокоскоростных и высоконагруженных транспортных средств, когда температура на поверхности пары трения может достигать 1273-1473 К. Фрикционные КМК типа C_f/SiC имеют очень хорошие

триботехнические характеристики – высокий коэффициент трения, его малую зависимость от скорости транспортного средства на начало торможения, температуры поверхности в зоне трения, контактного давления и погодных условий. КМК имеют наименьший износ при эксплуатации по сравнению с традиционными фрикционными материалами.



Красная линия – достигаемые температуры в зоне трибоконтакта в высоконагруженных узлах сцепления

Рис. 1. Основные типы фрикционных материалов, применяемых в парах трения транспортных средств, и их эксплуатационные температурные диапазоны

Необходимо отметить, что конструктивная, техническая и экономическая эффективность применения КМК в элементах фрикционных систем во многом определяется используемым методом их изготовления и структурой получаемого КМК. Среди методов получения фрикционных КМК на текущий момент времени наибольшее распространение получили газофазные и жидкофазные способы или их комбинации.

Фрикционные изделия из КМК также могут быть получены с помощью газофазных CVI-процессов (Chemical Vapor Infiltration). Тем не менее, следует отметить, что, несмотря на то, что газофазные методы получения КМК позволяют изготавливать материал с высокими физико-механическими характеристиками, однако при этом процесс получения является весьма длительным по времени и трудоемким, и, соответственно, сам материал очень дорогим.

Среди методов получения фрикционных изделий из КМК наибольшую привлекательность с экономической точки зрения имеют жидкофазные методы: PIP-процессы (Polymer Infiltration and Pyrolysis), основанные на пиролизе кремнийорганической матрицы углепластикового полуфабриката, и

LSI-процессы (Liquid Silicon Infiltration), основанные на жидкофазном силицировании пористых заготовок, в состав которых входят углеграфитовые компоненты [5].

Достоинствами КМК, получаемых по технологии PIP, являются широкая возможность управления составом получаемых композиций, отсутствие термической и химической деградации армирующих УВ и порошковых добавок при проведении пиролиза полимерного связующего. Главным недостатком технологии PIP, при получении КМК является повышенная пористость матрицы. Эта проблема может решаться путем увеличения количества циклов пропитка-пиролиз, но это сразу приводит к резкому удорожанию получаемого материала.

Наиболее широко здесь используется модификация метода LSI, основанная на жидкофазном силицировании карбонизированных углепластиков. Применение дисков сцепления из КМК, полученных по технологии LSI, в трансмиссии автомобиля Porsche Carrera GT позволило выдерживать температуры трибоконтакта выше 800°C, уменьшить диаметр дисков на 30% с 240 до 169мм, и, соответственно, снизить весовые показатели блока сцепления более чем на 50% с 7,6 до 3,5кг [1]. Данные процессы обладают рядом достоинств по сравнению с другими методами получения КМК: конечный материал имеет достаточно высокую прочность и теплопроводность; матрица имеет плотную, практически беспористую структуру; процесс относительно недорог и производителен вследствие его небольшой продолжительности. Однако при получении КМК методом LSI, в отличие от методов CVI или PIP, как правило, происходит повреждение УВ расплавом кремния, что вызывает снижение механических свойств КМК (табл. 1).

Табл. 1. Механические и теплофизические свойства КМК, полученные по разным технологиям [4, 6]

Свойства / Метод	CVI	PIP	LSI	LSI
Армирующий наполнитель	УВ-ткань	УВ-ткань	УВ-ткань	Дисперсные УВ
Содержание волокон, об.%	42...47	50	60	-
Плотность, г/см ³	2,1...2,2	1,8	2,0	2,4
Пористость, %	10...15	8	2	<1
Прочность при растяжении, МПа	300...320	260	110	20...30
Модуль Юнга, ГПа	90...100	110	50...55	20...30
Изгибная прочность, МПа	450...500	240	80...140	50
Теплопроводность, Вт/м·К $\perp$	6..7	5...6	12...23	20...40
КЛТР $\perp$, 10^{-6} K^{-1}	5	5	6...6,5	3
КЛТР $\parallel$, 10^{-6} K^{-1}	3	2	1,0...1,5	1,85

КЛТР – коэффициент линейного термического расширения;

$\perp$, $\parallel$ – перпендикулярно и параллельно плоскости скольжения соответственно.

Среди структурного исполнения дисков сцепления из КМК наибольшее распространение получили диски из тканевых и хаотично-армированных углеродных волокнистых наполнителей [4]. Технология получения дисков

сцепления из КМК на тканевой основе технологически несколько проще, т.к. связана с получением крупнолистовых полуфабрикатов с последующим вырезанием из них (как правило, гидрорезанием) сложнопрофильных заготовок или готовых изделий (рис. 2, 3).

Полуфабрикаты из хаотично-армированных углепластиков получают, как правило, методом горячего прессования, что требует предварительных операций изготовления сечки из УВ, их совмещения с полимерным связующим (обычно пульвербакелитом) и единичного формования в пресс-форме [4]. Такая технология несколько дороже, КМК на их основе имеют значительно более низкие физико-механические характеристики по сравнению с композитами, армированными непрерывными волокнами, но зато позволяет получать изделия более сложной геометрической формы. Кроме того КМК, полученный по такой технологии, имеет более высокие показатели коэффициента трения [7] и теплопроводности в направлении, перпендикулярном плоскости скольжения (см. табл. 1).

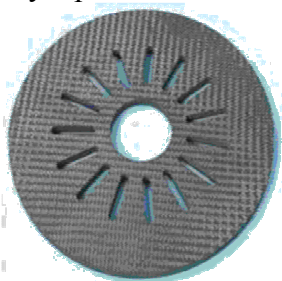


Рис. 2. Фотография диска сцепления из КМК на тканевой основе фирмы Porsche [1]

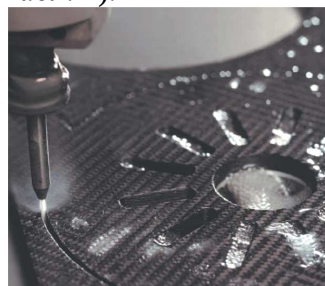


Рис. 3. Технологическая операция получения диска из КМК гидрорезанием [1]

Для КМК на основе УВ, уложенных параллельно плоскости трения, характерно наличие достаточно низкой трансверсальной теплопроводности. В работе [4] было показано, что одной из проблем при использовании фрикционных КМК с высоким коэффициентом трения является снижение коэффициента трения при достижении определенной температуры на поверхности трибоконтакта. Причем на фоне уменьшения коэффициента трения температура на трибоповерхности КМК продолжает расти. Эта проблема возникает, как правило, вследствие недостаточно высоких характеристик теплопроводности КМК в направлении, перпендикулярном плоскости трения, что ограничивает отвод тепла с поверхности трибоконтакта.

Одной из основных проблем применения фрикционных КМК в узлах сцепления является подбор соответствующего контртела, способного, с одной стороны, обеспечивать максимальные показатели коэффициента трения в паре с этими материалами, а, с другой стороны, выдерживать экстремально жесткие температурные и абразивные условия трибоконтакта с минимальными значениями износа. Одним из требований к тормозным колодкам, помимо обеспечения высоких и стабильных триботехнических характеристик, является обеспечение такого характера процесса трения, когда

их износ в значительно большей степени превышает износ дисков, при этом имея минимально возможные значения. Наиболее эффективными фрикционными материалами в паре с КМК, с точки зрения теплостойкости и при этом минимальности износа, высоких значений и стабильности коэффициента трения в условиях температуры трибоконтакта выше 600-800°C при «сухом» трении являются металлокерамика на основе железа или меди (до 500-600°C) и композиции с керамической и углеродной матрицей (рис. 4). При этом в последнем случае предпочтение отдается композициям с керамической матрицей, ввиду повышенной склонности к окислению, и соответственно термомеханическому износу, КМ с углеродной матрицей при температурах выше 450°C.

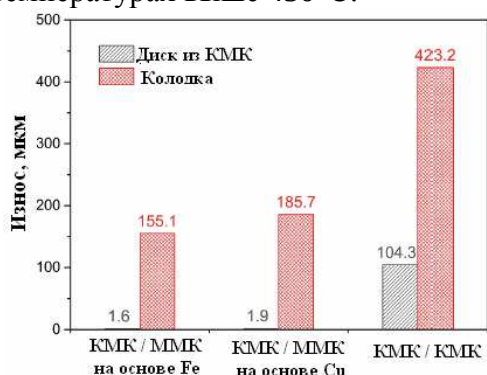


Рис. 4. Зависимости величин износа диска из КМК с тремя типами колодок после 255 торможений [8]

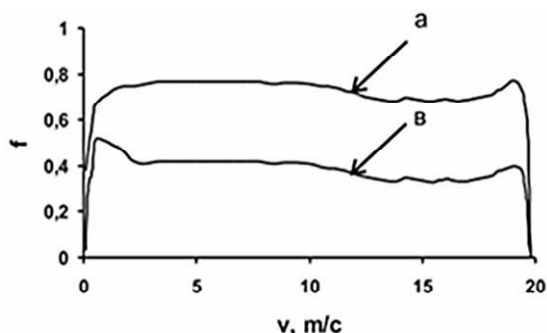


Рис. 5. Кривые зависимости коэффициентов трения от скорости для различных пар трения: а - «КМК – металлокерамика на основе железа ФЖ-11», в - «Чугун – ФЖ-11»

В работе [9] определено, что при высоком и стабильном коэффициента трения (рис. 5) величины износа металлокерамических фрикционных элементов на основе железа для пары трения «КМК – металлокерамика ФЖ-11» были относительно небольшими, в то время как износ элементов из КМК практически отсутствовал или был минимальным.

Задача организации пары трения КМК / КМК, с целью минимизации их износа, может решаться, например, путем подбора для КМК дисков и накладок оптимального соотношения базовых структурных компонентов материалов – УВ и SiC-матрицы. В работе [9] установлено, что пары образцов с различным (высоким и низким) начальным содержанием УВ обеспечивают более высокий и стабильный коэффициент трения в зависимости от скорости по сравнению с парами образцов с одинаковым (высоким) начальным содержанием УВ. Также показано, что КМК с разным содержанием УВ характеризуются и значительным различием их износа (более чем в 3 раза), причем более низкий износ наблюдается у КМК с малым содержанием УВ (большей долей SiC матрицы). С другой стороны снижение поверхностного износа трущихся фрикционных КМК (в разы) возможно путем нанесения на

их поверхности SiC-покрытий реакционного типа или газофазных SiC-покрытий методом CVD [7], либо созданием структур КМК градиентного типа, в которых поверхностные фрикционные функциональные слои состоят полностью или главным образом из SiC-фазы по отношению к внутренним слоям с высоким содержанием углеродных волокон и обеспечивающих повышенный уровень прочности и трещиностойкости композитному элементу узла сцепления [4].

Несмотря на то, что функциональные возможности металлических фрикционных дисков в высоконагруженных системах сцепления находятся на их температурном эксплуатационном пределе, тем не менее, в литературе широко рассматриваются такие пары трения как «КМК – сталь (чугун)». Так в работе [10] для пары «стальной диск – колодка из КМК» были проведены исследования по определению триботехнических характеристик для данной фрикционной пары в условиях «сухого» трения. По результатам испытаний было показано, что данная пара трения имеет высокий и стабильный коэффициент трения 0,38, а износ составлял 1,1 мкм/цикл и 0,97 мкм/цикл для образца из КМК и стали соответственно.

В другой работе [11], где также проводились трибологические исследования для различных типов фрикционных материалов в паре с образцами из хромистой стали 100Cr6, были определены высокие и достаточно стабильные значения коэффициента трения (0,5...0,6) образцов из КМК (C/SiC) в широком диапазоне скоростей скольжения.

Одним из основных преимуществ фрикционных «мокрых» соединений, работающих в масле, по сравнению с «сухими» вариантами узлов сцепления, является их надежность и долговечность, отсутствие частых эксплуатационных регулировок. Это связано с меньшим изнашиванием пар трения, лучшим отводом теплоты от них и большей стабильностью их коэффициентов трения. Применение смазывания пар трения фрикционного сцепления уменьшает в разы их коэффициент трения, но при этом позволяет почти десятикратно увеличить давление на них и примерно в 2 раза сократить площадь контакта дисков из-за наличия канавок на их поверхности. При этом при подборе материалов пар трения для «мокрых» узлов сцепления резко снижаются требования к их теплостойкости, но возрастают требования к обеспечению максимального и стабильного коэффициента трения и стойкости их к минеральным маслам.

Для пар трения, работающих в масле, в настоящий момент наиболее распространены металлические, металлокерамические, композиты с полимерной матрицей, листовые (бумажные), статические и динамические коэффициенты трения которых лежат в пределах 0,08...0,20.

В качестве перспективного материала для высоконагруженных узлов трения, работающих в условиях смазки, рассматриваются также КМК с различными типами матриц, но, главным образом, с SiC матрицей. В работах [12, 13] проводились трибологические исследования, для определения возможности применения дисков сцепления из КМК в танковых фрикционах

в условиях «мокрого» трения. Проведенные исследования на образцах из КМК на базе нетканых и коротких УВ показали высокие (0,114...0,126) и стабильные (85%) значения коэффициента трения КМК в паре с нержавеющей сталью 30CrSiMoVA (рис. 6), что оказалось выше, чем у пары «сталь – металлокерамика на медной основе» – (0,08...0,11) и (менее 80%) соответственно. После проведения 300 торможений у образцов из КМК износ не отмечался, в то время как у медной металлокерамики он составил 2 мкм при 100 торможениях.

Более высокие показатели коэффициента трения (0,16...0,2) для пары «сталь-КМК» в условиях наличия масляной смазки отмечались в работе [14], а износ образца из КМК, полученного по комбинированной технологии CVI и LSI, при скоростях вращения 5000...6000 об/мин также не отмечался (рис. 7).

Как отмечается в работе [12] малый износ или полное его отсутствие связано с пористой поверхностью образцов из КМК, полученных, главным образом, по технологиям CVI и RIP, которая, удерживая масло на поверхности, постоянно поддерживает тонкую смазывающую пленку между трущимися поверхностями. Кроме того, такая пористая структура улучшает процесс охлаждения КМК во время процесса трения.



Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от скорости вращения диска сцепления из КМК в условиях «мокрого» трения



Рис. 7. Зависимости линейного износа и коэффициента трения (μ) от скорости вращения для пары трения «КМК-сталь» в условиях «мокрого» трения

Следует отметить, что применение дисков сцепления или фрикционных накладок из КМК в трансмиссиях автотранспортной техники в условиях «мокрого» трения обеспечивает их минимальный термомеханический износ в случаях ухода масла или срыва смазывающей пленки, а также сильного абразивного загрязнения синтетического масла.

Таким образом, проведенный анализ показывает широкие перспективы применения фрикционных керамоматричных композиционных материалов в элементах систем сцепления высоконагруженной автотранспортной техники. Для данных систем КМК могут рассматриваться как эффективная альтернатива традиционным фрикционным материалам.

Список литературы / References

1. Porsche engineering magazine. – 2004. – Iss. 2. – 24p. [Electronic resource]: <https://www.porscheengineering.com/press-magazine-2004-02/>
2. Groetsch D. Experimental investigations of spontaneous damage to wet multi-plate clutches with carbon friction linings / D. Groetsch, U. Stockinger, T. Schneider et.al // Forsch Ingenieurwes. – 2021. – Vol. 85. – P. 1043-1052.
3. Химический каталог: Фрикционные материалы (Chemical catalog: Friction materials) [Electronic resource]: <http://www.ximicat.com/info.php?id=5784>.
4. Krenkel W. Ceramic matrix composites: fiber reinforced ceramics and their applications. – Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. – 418 p.
5. Гаршин А.П. Современные технологии получения волокнисто-армированных композиционных материалов с керамической огнеупорной матрицей / А.П. Гаршин, В.И. Кулик, С.А. Матвеев, А.С. Нилов // Новые огнеупоры. – 2017. – №4. – С. 20-35.
5. Garshin A.P. Modern technologies for obtaining fibrous-reinforced composite materials with a ceramic refractory matrix / A.P. Garshin, V.I. Kulik, S.A. Matveev, A.S. Nilov // New refractories. – 2017. – No. 4. – P. 20-35.
6. Tulbez S. Processing and characterization of carbon fiber reinforced silicon carbide (C/C-SiC) matrix composites // diss. for the degree of Master of Science in Metallurgical and Materials Engineering Department, Middle East Technical University, 2015. – 143 p.
7. El-Hija H.A. Development of C/C-SiC brake pads for high-performance elevators / H.A. El-Hija, B. Heidenreich, W. Krenkel, S. Hugel // International journal of applied ceramic technology. – 2005. – Vol.2. – N 2. – P. 105-113.
8. Comparison of braking behaviors between iron- and copper-based powder metallurgy brake pads that used for C/C-SiC disc / X. Ma, C. Luan, S. Fan et al. // Tribology International. – 2021. – Vol. 154. – ID106686. – 12 p.
9. Кулик В.И. Исследование триботехнических характеристик композиционных материалов с карбидокремниевой матрицей / В.И. Кулик, А.С. Нилов, А.П. Гаршин и др. // Новые огнеупоры. – 2012. – №8. – С. 45-56.
9. Kulik V.I. Study of tribotechnical characteristics of composite materials with a silicon carbide matrix / V.I. Kulik, A.S. Nilov, A.P. Garshin et al. // New refractories. – 2012. – No. 8. – P. 45-56.
10. Xiao P. Preparation, properties and application of C/C-SiC composites fabricated by warm compacted-in situ reaction / P. Xiao, Z. Li, Z. Zhu, X. Xiong // J. Mater. Sci. Technol., 2010. – Vol. 26(3). – P. 283-288.
11. Albers A. Increasing the performance of motor vehicle clutches by the use of ceramic as fiction material and the resulting effects on system design / A. Albers, M. Mitariu, A. Arslan // Proceedings of WTC2005 World Tribology Congress III, 12-16.09.2005, Washington, D.C., USA, 2005. – 7 p.
12. Wang X. Investigation on fabrication and performance of C/C-SiC composites for tank clutch [D]. Changsha: Central South University, 2007.
13. Wang X. Wet friction performance of C/C-SiC composites prepared by new processing route / X. Wang, C. Yin, Q. Huang [et al.] // Journal of Central South University of Technology. – 2009. – Vol.16. – Iss.4. – P. 525-529.
14. Li Z. Wet friction and wear Properties of C/C-SiC composites during different braking speeds / Z. Li, P. Xiao, J. Yue, X. Xiong // Journal of Materials Engineering. – 2013. – Iss.3. – P.71-76.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Нилов Алексей Сергеевич – к.т.н., доцент	Nilov Aleksey Sergeevich – candidate of technical sciences, associate professor
Жуков Дмитрий Александрович – к.т.н., доцент	Zhukov Dmitriy Aleksandrovich – candidate of technical sciences, associate professor
alexey.s.nilov@gmail.com	

Получена 25.01.2022