

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Кулик В.И., Нилов А.С.

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

Ключевые слова: узлы трения, антифрикционный материал, керамика, металлокерамика, керамоматричные композиты.

Аннотация. Проведен анализ перспектив применения антифрикционных керамических материалов в высоконагруженных узлах трения горнодобывающей техники. Показано, что материалы на основе монокристаллической керамики, металлокерамики и, прежде всего, керамоматричных композитов могут рассматриваться как эффективная альтернатива традиционным антифрикционным материалам.

PROSPECTS FOR THE USE OF CERAMIC MATERIALS IN FRICTION UNITS OF EQUIPMENT IN THE MINING INDUSTRY

Kulik V.I., Nilov A.S.

Baltic State Technical University "VOENMEH", St. Petersburg

Keywords: friction units, antifrictional material, ceramics, cermet, ceramic-matrix composites.

Abstract. The analysis was made of the prospects for the use of antifriction ceramic materials in highly loaded friction units of mining equipment. It is shown that materials based on monolithic ceramics, cermets and, first of all, ceramic-matrix composites can be considered as an effective alternative to traditional antifriction materials.

В современной горнодобывающей промышленности применяются десятки типов механизмов (карьерные экскаваторы, самосвалы, проходческие комбайны, подающие конвейерные линии и др.), выполняющих самые различные задачи. Техничко-экономическая эффективность и надежность эксплуатации данного оборудования во многом зависит от сохранения показателей качества, используемых узлов трения (подшипники, направляющие, радиальные и торцовые уплотнения и др.) в течение всего периода их эксплуатации в составе механизмов. Так как эти трибосистемы работают в особых условиях эксплуатации, как правило, к ним предъявляют более жесткие требования, чем к узлам трения, используемым в других отраслях техники.

При производстве узлов трения их надежность, прежде всего, достигается за счет применения современных конструкционных материалов триботехнического назначения и методов их обработки. Одним из главных

требований к антифрикционным материалам пары трения является обеспечение необходимых, в заданных условиях работы, коэффициента трения и износостойкости. Эти триботехнические характеристики являются функциями физико-механических свойств материалов пары трения, условий работы (вид смазки, свойства и температура окружающей среды) и режимов трения (скорость относительного движения, контактное давление). Применительно к оборудованию горнодобывающей промышленности при выборе материалов для высоконагруженных узлов трения необходимо учитывать такие факторы, как: эксплуатация в запыленной атмосфере с высокой влажностью, что ускоряет абразивный и химический износ поверхностей трения; вибрационные и ударные воздействия, вызывающие разбалансировку, усталостное изнашивание и растрескивание материалов; работа узлов при температурах, которые могут превышать допустимые.

В настоящее время для создания антифрикционных материалов используют металлические, керамические, пористые, твердосплавные, полимерные, графитовые и различные композиционные материалы. Антифрикционные материалы применяют в виде объемных элементов и тонких покрытий. Самыми распространенными антифрикционными материалами зоны трения являются баббиты, нанесенные на стальную основу, имеющие очень низкие коэффициенты трения при наличии смазки. Тем не менее, все баббиты имеют существенный недостаток – низкое сопротивление усталости, что ухудшает работоспособность узла трения, особенно эксплуатируемого в условиях частого цикла нагревания и остывания (пуска/остановки или смены режимов работы), химического и абразивного износа. Кроме того, для них характерны: выкрашивание; низкое сопротивление вибрации при разбалансировке роторов; чувствительность к режимам смазки, качеству масла; значительный износ в условиях «сухого» трения (в период пуска, особенно тяжелых роторов).

Более стойкими к абразивному износу являются оловянистые и оловянисто-цинковые бронзы и алюмооловянные сплавы. Но и они принципиально не решают проблему снижения абразивного и химического износа.

Большой интерес для использования в высоконагруженных узлах трения представляют пористые антифрикционные материалы. Обычно такие материалы перед использованием в узлах трения пропитывают жидким смазочным материалом. Детали из них могут применяться в парах трения при недостаточной смазке или при недопустимости применения жидкой смазки. Эти пары трения устойчиво работают и в условиях обильной смазки. С точки зрения большей стойкости к абразивному и химическому износу, а также градиентам температур, при достаточно низком коэффициенте трения в условиях смазки, особый интерес представляют пористые металлокерамические спеченные или электролитически полученные материалы на основе меди или железа с твердыми (керамическими) и антифрикционными порошковыми добавками (MoS_2 , BN , CaI_2 , графит и др.).

Эти материалы имеют относительно высокую пористость (объем пор 20–40%), что способствует адсорбированию и удержанию масляной пленки, обеспечивающей граничное трение в паре трения. Например, железографитовые спеченные материалы (ЖГр-1; ЖГр-3 и др.) используют при удельных нагрузках до 600 МПа, скорости скольжения до 6 м/с и температуре до 150 °С. Коэффициент трения в этих условиях составляет 0,04–0,06. При меньших нагрузках скорости скольжения могут достигать 20–30 м/с. Существенным ограничением такого рода антифрикционных материалов являются повышенные требования к качеству масла в процессе эксплуатации – при повышенных температурах поры могут закупориваться продуктами окисления масла и узел трения теряет свойство самосмазываемости, особенно в случае возникновения ситуации «сухого» трения.

Другой тип триботехнических материалов – монолитные керамики (SiC, Al₂O₃, AlN, BN, Si₃N₄ и др.) обладают высокими тепло- и износостойкостью, низким коэффициентом трения при наличии смазки. Применение этих материалов в десятки раз повышает ресурс узлов трения и вдвое снижает их массу [1]. Благодаря низкой химической активности они могут выдерживать воздействие агрессивной среды. Как преимущество следует также отметить низкое значение коэффициента температурного расширения керамики, что обеспечивает стабильность размеров узла трения. Благодаря высокой твердости материала удастся повысить класс чистоты обработки поверхности и, тем самым, снизить коэффициент трения. Однако, характерный для монолитной керамики, низкий уровень трещиностойкости, деформируемости и стойкости к тепловым ударам приводит к высокому риску разрушения в результате динамических и вибрационных нагрузок и градиентов температур.

Монолитная металлокерамика, например WC-Co, существенно более прочна и менее хрупка, нежели традиционные конструкционные керамики, что обуславливает возможность их работы со значительно большими нагрузками, а также обеспечивает их лучшую технологичность и эксплуатационную устойчивость. Тем не менее, такого рода керметы уступают конструкционным керамикам, в частности, SiC-керамикам, по износостойкости и по химической стойкости.

Другим классом керамических материалов являются керамоматричные композиты (КМК), армированные непрерывными или дискретными волокнами. У них стойкость к тепловым ударам более, чем в пять раз выше, чем у монолитной керамики, а ударная вязкость разрушения достигает значений 14–17 кДж/м² (у монолитной SiC-керамики 3–4 кДж/м²) [2]. Из всех триботехнических КМК наиболее широкое распространение получили композиты с SiC-матрицей, армированной углеродными волокнами (УВ) – материалы типа C_f/SiC. Благодаря высокой твердости, теплостойкости и стойкости к абразивному износу карбида кремния C_f/SiC-композиты являются одними из самых перспективных материалов для высоконагруженных узлов трения по сравнению с традиционными антифрикционными материалами (главным образом металлическими и металлокерамическими).

Необходимо отметить, что актуальной задачей практического применения КМК является разработка эффективной технологии их получения. Это связано с тем, что производство изделий из КМК осуществляется с помощью, как правило, достаточно сложных и длительных процессов уплотнения волокнистых каркасов матричным материалом, основанных на различных твердо-, жидко- и газопарофазных методах. Каждая из этих групп методов базируется на принципиально разнообразных физико-химических процессах и приводит к получению КМК, отличающихся как составом и структурой, так и их свойствами. Более подробно методы уплотнения каркаса рассмотрены в работе [3].

Выделим те методы, которые можно рассматривать, как наиболее привлекательные с технико-экономической точки зрения для изготовления узлов трения оборудования горнодобывающей промышленности.

1. Твердофазный метод, в основе которого лежат технологические процессы, используемые в порошковой металлургии: спекание, горячее прессование и т. п. Матричный материал здесь применяется в виде порошка (например, смесь порошков SiC и спекающих добавок), который совмещается с волокнистым наполнителем и помещается в пресс-форму, где под воздействием высоких температуры и давления происходят образование монолитного КМК и формование изделия. Достоинства метода – сравнительно короткий одностадийный технологический цикл и возможность получения высокоплотных КМК с низкой пористостью.

2. Метод жидкофазного силицирования, основанный на инфильтрации пористой углеродсодержащей заготовки расплавом кремния (процессы LSI – Liquid Silicon Infiltration). В результате химического взаимодействия между расплавом Si и углеграфитовыми компонентами заготовки образуется конечный продукт – SiC-матрица. Наиболее широко при этом используется модификация метода LSI, основанная на жидкофазном силицировании карбонизированных углепластиков. Достоинства метода: КМК имеет достаточно высокую прочность и теплопроводность, плотную и практически беспористую структуру; процесс относительно недорог и производителен вследствие его небольшой продолжительности.

Вместе с тем, для изготовления элементов узлов трения используются и другие методы, которые характеризуются высокой остаточной пористостью (10-15% и более), получаемых КМК: жидкофазные PIP-процессы (Polymer Infiltration and Pyrolysis), основанные на пиролизе кремнийорганической матрицы углепластикового полуфабриката, и газофазные CVI-процессы (Chemical Vapor Infiltration), основанные на осаждении матричного материала на поверхности нагретых армирующих волокон при разложении, фильтрующихся через пористый каркас газообразных химических реагентов. В принципе, эти методы могут быть эффективны для получения пористых антифрикционных КМК.

На образцах из КМК на базе нетканых и коротких УВ и SiC, полученных по технологии LSI, проводились трибологические испытания в условиях

«мокрого» трения [4, 5]. Проведенные исследования показали достаточно высокие для антифрикционного материала (0,114-0,126), но при этом стабильные (85%) значения коэффициента трения КМК в паре с нержавеющей сталью 30CrSiMoVA, что оказалось выше, чем у пары «сталь – металлокерамика на медной основе» – (0,08-0,11) и (менее 80%) соответственно. После проведения 300 циклов «пуск-торможение» у образцов из КМК износ не отмечался, в то время как у медной металлокерамики он составил 2 мкм при 100 циклах.

Как отмечается в работе [4] малый износ или полное его отсутствие образцов из КМК, полученных по технологиям CVI и PIP, связано с пористой структурой материала, которая, удерживая масло на поверхности, постоянно поддерживает тонкую смазывающую пленку между трущимися деталями. Кроме того, такая пористая структура улучшает процесс охлаждения КМК во время процесса трения.

Следует отметить, что применение антифрикционных материалов из КМК в высоконагруженных узлах трения горнодобывающего оборудования в условиях «мокрого» трения обеспечивает их минимальный износ и в случаях ухода масла или срыва смазывающей пленки, а также сильного абразивного загрязнения смазочного материала.

Вариантом снижения коэффициента трения и износа при сохранении достоинств КМК, является возможность создания на поверхностях трения слоя из монолитной плотной керамики. Для КМК C_f/SiC оптимальным будут являться слои из SiC, получаемые либо методами газофазного осаждения или реакционного спекания приформованного к заготовке углеродсодержащего слоя на стадии силицирования по технологии LSI [2, 6]. Такой подход позволяет снизить коэффициент трения в узлах трения из КМК в условиях смазки в 2-4 раза [2].

Таким образом, проведенный анализ показывает широкие перспективы использования антифрикционных керамических материалов в высоконагруженных «мокрых» узлах трения горнодобывающей техники. Технически обоснованное применение материалов на основе монолитной керамики, металлокерамики и, прежде всего, керамоматричных композитов в этих узлах позволяет повысить надежность и увеличить ресурс машин, улучшить их эксплуатационные и технико-экономические характеристики, и может рассматриваться как эффективная альтернатива применению традиционных антифрикционных материалов.

Список литературы

1. Панов А.Д. Трибологические особенности конструкционных керамических материалов в подшипниках скольжения / А.Д. Панов, И.М. Панова // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2015. – Т.7, №1. – 9с. [Электронный ресурс] <http://naukovedenie.ru/PDF/78TVN115.pdf>
2. Румянцев В.И. Монолитные и керамоматричные композиционные материалы для износостойких пар трения-скольжения / В.И. Румянцев, Л.Н. Кочерга, А.С. Осмаков, Р.Л. Сапронов. – 2012. – 9 с. [Электронный ресурс] <http://www.virial.ru/upload/medialibrary/1aj/moolit.pdf>

3. 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.
4. Wang X. Investigation on fabrication and performance of C/C-SiC composites for tank clutch [D]. Changsha: Central South University, 2007.
5. 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.
6. Krenkel W. C/C-SiC composites for hot structures and advanced friction systems // Ceramic Engineering and Science Proceedings, 2003. – Vol. 24 [4]. – P. 583-592.

References

1. Panov A.D. Tribological features of structural ceramic materials in sliding bearings / A.D. Panov, I.M. Panova // Online magazine "Science". – 2015. – Vol. 7, №1. – 9p. [Electronic resource] <http://naukovedenie.ru/PDF/78TVN115.pdf>
2. Romyantsev V.I. Monolithic and ceramic-matrix composite materials for wear-resistant friction-sliding pairs / V.I. Romyantsev, L.N. Kocherga, A.S. Osmakov, R.L. Sapronov. – 2012. – 9p. [Electronic resource] <http://www.virial.ru/upload/medialibrary/1aj/moolit.pdf>
3. Garshin A.P. Modern technologies for obtaining fiber-reinforced composite materials with ceramic refractory matrix / A.P. Garshin, V.I. Kulik, S.A. Matveev, A.S. Nilov // New refractories. – 2017. – №4. – P. 20-35.
4. Wang X. Investigation on fabrication and performance of C/C-SiC composites for tank clutch [D]. Changsha: Central South University, 2007.
5. 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.
6. Krenkel W. C/C-SiC composites for hot structures and advanced friction systems // Ceramic Engineering and Science Proceedings. – 2003. – Vol. 24[4]. – P. 583-592.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Кулик Виктор Иванович – кандидат технических наук, доцент, victor.i.kulik@gmail.com	Kulik Viktor Ivanovich – candidate of technical sciences, associate professor; victor.i.kulik@gmail.com
Нилов Алексей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, alexey.s.nilov@gmail.com	Nilov Aleksey Sergeevich – candidate of technical sciences, associate professor; alexey.s.nilov@gmail.com
Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ», Санкт-Петербург, Россия	Baltic State Technical University “VOENMEH”, Saint Petersburg, Russia

Получена 16.11.2020