

УДК 622.24.051.55

В. М. Волкогон, докт. техн. наук; **С. К. Аврамчук**,
А. С. Климанов, кандидаты техн. наук; **А. В. Кравчук**, инж.

*Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины,
г. Киев, Украина*

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ В ОПОРАХ СКОЛЬЖЕНИЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ ПАР ТРЕНИЯ

The experimental data of tribotechnical researches of pair friction «a firm alloy - polycrystalline super a hard material on a basis wBN» are given. The opportunity of use of such pair friction is shown as the axial bearing of sliding in cone bits.

Введение

Тяжелонагруженные пары трения в рабочих органах и узлах машин и механизмов подвержены интенсивному изнашиванию в процессе эксплуатации, особенно в условиях ограниченной смазки. К таким объектам можно отнести шарошечные долота, которые широко применяются в разведочном бурении, при проведении буровых работ на нефть и газ, а также для сплошного бурения скважин различного назначения в горнодобывающей промышленности и строительстве с очисткой забоя от шлама промывочной жидкостью или сжатым воздухом. Ресурс работы долота определяется многими факторами, важнейшими из которых являются горно-геологические условия (крепость, абразивность и блочность горных пород, степень однородности горного массива, его обводненность и т. п.) и связанные с этим условия эксплуатации (нагрузка на долото, частота вращения, смазочно-охлаждающая среда). Анализ работоспособности шарошечного долота типа 244,5 ОК-ПГВ различных производителей в условиях эксплуатации горнообогатительных комбинатов Криворожского бассейна показывают, что, в основном, отказы долота наблюдаются из-за выхода из строя опорного подшипника скольжения (60–70 %), поэтому работы, направленные на повышение срока службы деталей пар трения опоры долот, являются безусловно актуальными. Пара трения осевого подшипника скольжения представляет контактирующие между собой торец цапфы на лапе корпуса долота и опорную шайбу (подпятник), запрессованную в полость корпуса шарошки, расположенной у вершины его конуса. В процессе работы долота его опора испытывает значительные динамические нагрузки, которые сопровождаются выделением тепла. Для снижения температуры в зоне контакта пары трения предусматривают в цапфе пяты продувочное отверстие соосное с опорой или же используют твердые смазки [1].

Рассмотрение процесса изнашивания контактирующей пары трения свидетельствует о его комплексном характере, включающем такие явления как взаимодействие при относительном перемещении поверхностей трения, изменения, происходящие в поверхностном слое материалов, разрушение поверхностей [2]. При этом механическое взаимодействие поверхностей выражается во взаимном внедрении и зацеплении микронеровностей в совокупности с их соударением в случае высокого уровня микрошероховатости, поэтому состояние поверхности пары трения имеет большое значение, а молекулярное взаимодействие проявляется в виде адгезии и схватывания. Следует отметить, что схватывание свойственно только металлическим поверхностям и отличается от адгезии более прочными связями. Изменение на поверхностях трения обусловлены пластической деформацией, повышением температуры и химическим взаимодействием окружающей среды. Пластические деформации приводят к изменению структуры поверхностного слоя материала, что при температуре ниже температуры рекристаллизации приводит к наклепу и его упрочнению на некоторую глубину, однако у самой поверхности микротвердость неизменна. Температура, превышающая порог рекристаллизации, способствует повышению пластичности, а на некоторых локальных участках, в условиях высоких нагрузок – формированию закалочных структур. Пластические деформации, возможные высокие температурные градиенты и структурные изменения вызывают напряжения в материале пары трения, которые могут повлиять на его износостойкость. Поэтому к материалам пары трения долота предъявляются высокие требования. Они должны обладать высокой прочностью, твердостью, теплостойкостью, износостойкостью. При изготовлении деталей осевой пары трения в шарошечном долоте нашли применение быстрорежущая сталь, твердые сплавы и наплавочные материалы типа стеллит. Например, по данным [3], пята и опорная шайба долота фирмы «Глиник» (Польша) изготавливаются из твердых сплавов, в то время как фирма «Бейкер Хьюз» (США) использует для этой цели быстрорежущие стали, как и Дрогобычский долотный завод (Украина), который применяет при изготовлении пяты сталь Р9М4К8, а для опорной шайбы – сталь Р6М5.

Подбор наиболее подходящих материалов для пар трения скольжения можно в каждом отдельном случае сделать только на основании тщательного сопоставления условий работы трущихся деталей, исходных свойств материалов и тех изменений, какие они претерпевают на поверхностях трения, а также при учете других существенных обстоятельств. Согласно [4], существуют следующие некоторые правила подбора материалов пары трения, согласно которым нужно:

сочетать твердый металл с твердым: такие пары трения обладают высокой износостойкостью вследствие малого взаимного внедрения их поверхностей. Нанесение приработочных покрытий повышает надежность пар в наиболее опасный период – во время приработки, при этом высокая точность изготовления и сборки, значительная жесткость конструкции, тщательная приработка, улучшение условий смазывания существенно повышают срок службы пары трения из твердых материалов;

применять в труднодоступных для смазывания конструкциях антифрикционные материалы;

Экспериментальная часть

Выбор материалов. Исходя из приведенных рекомендаций по подбору пары трения, обладающей максимальной износостойкостью в качестве материала опорной шайбы долота, нами исследован поликристаллический сверхтвердый материал (ПСТМ) на основе плотных модификаций нитрида бора, получаемый спеканием порошка вюрцитоподобного нитрида бора в условиях высоких давлений и температур. Он может быть как в однофазном состоянии в виде сфалеритного нитрида бора (BNсф), так и содержать вюрцитоподобную и графитоподобную составляющие.

Основные сравнительные свойства материалов, применяемые в парах трения опоры долота и исследованные в данной работе, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные физико-механические свойства материалов пар трения в опорах

ДОЛОТ				
Материал	Плотность ρ , г/см ³	Твердость, ГПа	Модуль Юнга E, ГПа	Теплопро- водность, Вт/(м·К)
Быстрорежущие стали	7,8	8,5–9,0 (290 K) 4,5–5,5 (870 K)	220	20–25
Твердый сплав группы BK	14,5–14,6	86–88HRA	450–600	18–84
ПСТМ на основе w BN	3,41–3,45	40–54 (HK)	749,6–818	25–30(350 – 360 K) 40–60(900 – 950 K)
Твердый сплав на осно- ве TiC	3,14–3,45	40–54 (HRA)	370–410	15–18

Разработка универсального узла трения. Для триботехнических исследований в качестве базовых были выбраны машины трения TE 92 Micro-Processor Controlled Rotary Tribometer (позиция 5); TE 82HS High Speed Rolling 4-ball Mashine (информация предоставлена Институту проблем материаловедения НАН Украины фирмой «Plint Engineering», раздел Plint: Tribology), а также четырехшариковая машина трения ГОСТ 9490–75 [5].

Общими признаками выбранных схем являются:
компоновка контртела (вращающаяся деталь) и образца (неподвижная деталь);
нагрузка и скорость скольжения;
наличие рабочей смазочной среды.

Нами предложен универсальный узел трения, с помощью которого можно испытывать как материалы для тяжело нагруженных пар трения, так и выполнение подбора масла или смазки, воздушно-эмульсионной среды или смазывающей охлаждающей жидкости и т. п., поскольку в настоящее время подбор материалов для опор скольжения шарошечных долот проводится только при помощи стендовых и натурных испытаний, которые воспроизводят натурные условия, относительно трудоемкие и дорогостоящие. Использование предложенного нами узла трения, обеспечивающего условия для получения достоверной информации по триботехническим характеристикам материалов в тяжело нагруженных опорах скольжения, дает возможность осуществить выбор новых материалов, применяемых для работы в этих механизмах.

Конструкция предлагаемого узла трения приведена на рис. 1.

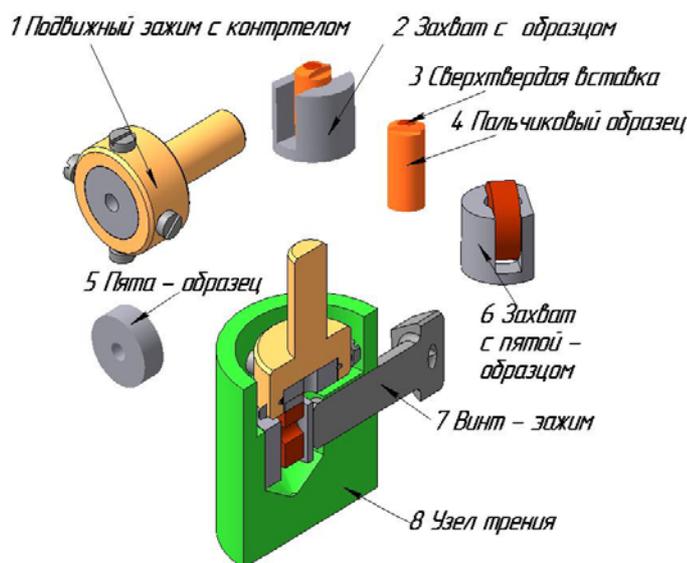


Рис.1. Узел трения для триботехнических исследований.

Габариты узла трения подобраны таким образом, чтобы он мог рассеивать тепловую мощность порядка 100 ватт при температуре в зоне трения не более 120 °С. Размеры контртела и образцов были определены опытным путем и имели такие размеры: диск (контртело) диаметром $20^{-0,5}$ мм, высота $7^{-0,5}$ мм, образцы в виде диска одинаковы по размерам с контртелом, а те, что в виде цилиндра с размерами: диаметром $10^{-0,1}$ мм и высотой $20^{-0,5}$ мм. Шероховатость поверхности образцов и контртела после притирки на стальном круге на порошке карбида бора зернистостью 50 мкм составляла $R_a 0,63-0,32$.

Узел трения состоит из корпуса (чашки), в котором выполнена ступенчатая полость: нижняя ступень для размещения захвата с образцом и верхняя – для смазки и подвижного зажима с контртелом. В захват 2 устанавливают образец 4 и затягивают зажимным винтом (зажимом) 7. После заполнения маслом корпус устанавливают в центрирующее гнездо плиты, закрепленной шпанайзерами на столе настольного сверлильного станка. В патрон станка закрепляют зажим с контртелом, который имеет возможность перемещения за счет шпинделя станка, и осуществляют его контакт с образцом. При этом зона контакта «контртело 1 – образец» с зажимом 2 на 3–4 мм погружена в масло. На рукоять шпинделя подвешивают тарированный груз и включают станок. По истечении заданного времени испытаний станок выключают и разбирают узел трения в обратном порядке.

Для изучения триботехнических свойств пары «твердый сплав ВК10 – ПСТМ» (контртело ВК10, образец ПСТМ) были приняты следующие условия трения:

- частота вращения 1410 об/мин;
- средняя скорость скольжения 1 м/с;
- смазка масло индустриальное И20;
- длительность испытаний не менее 35 мин.

После испытаний определялись форма и размеры пятна контакта на образцах, состояние дорожки трения на контртелах. Проводились также расчеты коэффициента трения и интенсивности изнашивания. Для ведения технической документации была выбрана кадровая

оболочка КОМПАС. Принятые условия испытаний стали базой для разработки методики проведения триботехнических испытаний.

Обсуждение результатов

Основные результаты испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2. Триботехнические характеристики исследованных пар трения

Материалы пары трения: контр-тело – образец	Коэффициент трения	Интенсивность изнашивания образца	Контурное давление A_k , кг/см ²
КТНХ70 – ТНХ70	0,06	$2,3 \times 10^{-6}$	400
ВК10 – КТНХ70	0,055	$4,1 \times 10^{-6}$	450
КТНХ70 – ВК10 *	0,063	$3,5 \times 10^{-7}$	500
ВК10 – ВК10	0,058	$1,8 \times 10^{-7}$	570
ВК10 – ВК10 **	0,05	$1,7 \times 10^{-7}$	600
ВК10 – ПСТМ	0,04	$2,5 \times 10^{-8}$	800

* Заметный износ контртела.

** Контртело с бронзовым покрытием.

Полученные данные исследований свидетельствуют о том, что для всех пар трения характерно формирование устойчивой масляной пленки с несущей способностью от 400 до 800 кг/см², которая определяется видом контактирующей пары, поскольку условия испытаний одинаковы. Одноименные пары изнашиваются более интенсивно, но в случае наличия на них покрытий антифрикционного материала толщиной 50 мкм износ заметно уменьшается.

По иному происходит изнашивание пары трения «твердый сплав – ПСТМ». Пятно износа контртела и испытываемого образца из ПСТМ на основе вюрцитного нитрида бора приведены на рис. 2.



Рис. 2. Характер изнашивания пары трения «твердый сплав – ПСТМ»

Пятно износа после испытаний имеет зеркальную поверхность, шероховатость которой находится на уровне R_a 0,16–0,08. Несущая способность образующейся масляной пленки в паре трения «твердый сплав – ПСТМ» достигает 1000 кг/см², а коэффициент трения характеризуется наименьшей величиной, что, на наш взгляд, обусловлено следующим. ПСТМ на основе вюрцитоподобного нитрида бора представляет собой гетерогенный материал высокой плотности с однородной мелкокристаллической структурой, имеющей размер зерна 0,1–0,3 мкм [6]. Высокая прочность на сжатие (до 4 ГПа), модуль упругости, твердость и теплопроводность в сочетании с высокими значениями трещиностойкости могут обеспечить устойчивость к разрушению при высоких критических нагрузках, на что указывалось в работе [7].

Повышение антифрикционных характеристик пары трения «твердый сплав – ПСТМ» возможно как из-за формирования устойчивой масляной пленки, так и за счет образования на

поверхности тонкой пленки B_2O_3 или графитоподобного нитрида бора (BN_G), возникающего при обратном фазовом превращении плотных фаз ($BN_{Ca} + BN_B$) $\rightarrow BN_G$ в микрообъемах [8], при взаимодействии контактирующих поверхностей, когда в зоне микроконтактов происходят короткие вспышки (10^{-7} – 10^{-8} с) со значительным выделением энергии. Проведенные нами исследования [9] методом электронной ОЖЕ – спектроскопии стальных образцов, обработанных резанием с наличием ударных нагрузок, показали присутствие на их поверхности кислорода, а также бора и азота. Это дает основание предполагать возможность образования на испытываемых образцах упомянутых тонких антифрикционных пленок. В пользу этого свидетельствуют и данные работы [10]. Изучение фрикционных характеристик ПСТМ из нитрида бора различного фазового состава в паре с термообработанной сталью марки ХВГ (HRC 58–62) на воздухе при сухом трении в условиях ступенчато-изменяемой скорости скольжения $V = 6$ – 14 м/с (величина ступени 2 м/с) при нагрузке 20 Н показали, что для всех материалов характерно плавное снижение коэффициента трения и интенсивности изнашивания, после чего происходит скачкообразное установление постоянного значения этих показателей, которые в сравнении с начальными $f = 1,25$ – $1,68$ снижаются до $f = 0,5$ – $0,62$, а $I = 100$ – 130 мкм/км до $I = 25$ мкм/км. При упомянутой критической скорости происходит качественное изменение процесса трения, сопровождающееся интенсивным пленкообразованием на поверхности контртела, что приводит к стабилизации фрикционных характеристик и установлению минимальных их значений.

Следует заметить, что для однофазного ПСТМ критическая скорость равняется 12 м/с, в то время как для двухфазных образцов ПСТМ она составляет 8 м/с. Данное обстоятельство хорошо согласуется с термической стабильностью различных модификаций нитрида бора и их теплопроводностью [7].

Выводы

Проведенные триботехнические исследования пары «твердый сплав – ПСТМ» показали перспективность использования в тяжелонагруженных парах трения поликристаллического сверхтвердого материала на основе вюрцитного нитрида бора в условиях граничного трения. Показано, что пара трения «твердый сплав – ПСТМ» обладает высокими триботехническими характеристиками и может быть использована в качестве осевого подшипника скольжения шарошечных долот. Предложены конструкция узла трения и методика испытаний триботехнических характеристик различных материалов, близкие по условиям к методам определения смазывающих свойств масел на машине трения ЧШМ.

Литература

1. Бондаренко В. П., Василенко Л. Е., Ганков А. В. и др. Новые пары трения для шарошечных долот // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – К.: ИСМ им. В. М. Бакуля НАН Украины, 2005. – Вып. 8. – С. 262 – 265.
2. Крагельский И. В. Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
3. Бондаренко В. П., Гладков А. В., Гнатенко И. А. и др. Структура и свойства деталей пар трения опор шарошечных долот различных изготовителей // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – К.: ИСМ им. В. М. Бакуля НАН Украины, 2004. – Вып. 7. – С. 225 – 232.
3. Гаркунов Д. Н. Триботехника. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
4. ГОСТ 9490–75. Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения смазывающих свойств на четырехшариковой машине. Изм. введ. 01.01.88 Метод определения трибологических характеристик на четырехшариковой машине.
5. Джамаров С. С., Курдюмов А. В., Олейник Г. С. и др. Особенности формирования микроструктуры спеков на основе вюрцитного VN (гексанита-Р) // Порошковая металлургия. – 1982. – № 8. – С. 32–37.
6. Бондаренко В. П. Триботехнические композиты с высокомодульными материалами. – К.: Наук. думка, 1987. – 232 с.

7. Курдюмов А. В., Пилянкевич А. Н. Фазовые превращения в углероде и нитриде бора. – К.: Наук. думка, 1979. – 188 с.
8. Бухштейн В. И., Тихонцов А. М., Волкогон В. М. и др. Исследование механизма износа двухслойных пластин К10Д при обработке закаленных хромистых сталей // Сверхтв. материалы. – 1989. – № 4. – С. 45–51.
9. Карюк Г. Г., Колесниченко Л. Ф., Юга А. И. и др. Фрикционные свойства материалов на основе плотных модификаций нитрида бора // Порошковая металлургия. – 1984. – № 9. – С. 82 – 87.
10. Примачук В. Л., Бочко А. В., Оветисян А. О. Теплофизические свойства разных модификаций нитрида бора // Порошковая металлургия.– 1983. – № 8. – С. 80 – 82.

Поступила 11.07.07.