

УДК 621.891

**А.Н. Болотов, И.В. Горлов, О.О. Новикова,
М.В. Васильев**

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МАГНИТОЖИДКОСТНЫХ ПОДШИПНИКОВ ГОРНО-ДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Рассмотрен вопрос рационального выбора материалов пар трения для подшипников скольжения горно-добывающего оборудования, смазываемых нанодисперсным магнитным маслом. Приведены методики испытаний, оборудование, технологии получения новых антифрикционных материалов (полимерных, керамических, аморфных) и полученные результаты.

Ключевые слова: трение и износ, магнитная жидкость, микродуговое окисление.

М агнитожидкостные подшипники [1] были созданы относительно недавно, но уже показали свои большие потенциальные возможности для применения в перспективных машинах и механизмах горнодобывающих и горноперерабатывающих предприятий. Использование таких подшипников в узлах трения бурового, горнодобывающего оборудования обеспечит ему высокие характеристики надежности, эффективную и экономичную работу. Основное достоинство магнитожидкостных подшипников заключается в том, что в широком нагрузочно-скоростном режиме они работают автономно в гидродинамическом режиме смазки за счет самоорганизующегося в магнитном поле замкнутого цикла поступления масла в зону трения.

Однако при высоких нагрузках на подшипник или малых скоростях вращения вала (например, в момент пуска или останова) толщина смазочной пленки недостаточна для разделения трущихся поверхностей, и граничное трение становится доминирующим. В этом режиме происходит

износ поверхностей, и поэтому он менее предпочтителен, чем гидродинамический, но, тем не менее, избежать его не всегда удастся. В отличие от известных подшипников, работающих при граничной смазке, в магнитожидкостных подшипниках содержится большое количество резервного масла и обеспечивается непрерывная регенерация его на фрикционном контакте. В подшипниках, например, заполненных немагнитным пластичным смазочным материалом, отсутствует механизм надежной подачи его в зону трения, а в подшипниках с пористыми втулками для поступления масла из пор подшипник предварительно должен разогреться за счет фрикционного тепла, т.е. заведомо он не может работать с малым трением.

Основная задача, которая должна быть решена для создания долговечных магнитожидкостных подшипников, работающих при граничной смазке, часто в условиях вибраций и ударных нагрузок, заключается в правильном выборе материалов вала, втулки и смазочного масла.

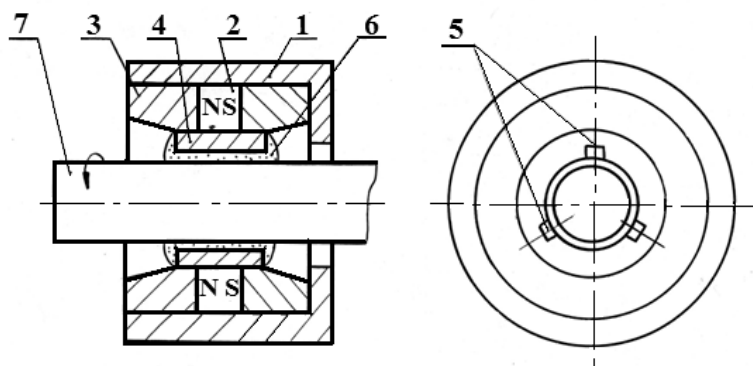


Рис. 1. Принципиальная схема магнитожидкостного подшипника

Описание опытного подшипника. При граничном режиме смазки изучались свойства базового магнитожидкостного подшипника (рис. 1) с симметричной магнитной системой. Подшипник состоит из немагнитного корпуса 1, внутри которого установлен постоянный магнит 2, два осесимметричных магнитопровода 3 и немагнитная втулка 4. Втулка имеет одну или несколько смазочных канавок 5, расположенных в ненагруженной зоне подшипника. Конфигурация внутренних поверхностей магнитопроводов 3 выбирается в зависимости от требуемых характеристик магнитного поля в зоне канавок и области 6, где удерживается резервный объем магнитного масла. При любой конфигурации магнитопроводов 3 магнитное поле между ними и валом 7 должно иметь градиент, направленный по оси в сторону магнита. Для замыкания магнитной цепи подшипника вал 7 должен быть изготовлен из магнитомягкого материала.

Подшипник работает следующим образом. При вращении вала магнитное масло из смазочной канавки магнитными силами прижимается к нему, намазывается на поверхность вала и заполняет радиальный зазор. В конфюзорной части зазора масло создает

нагрузконесущий смазочный слой и под действием избыточного давления частично вытекает через торцы втулки в область с резервным маслом и там охлаждается. Более холодное резервное масло затягивается магнитным полем в смазочную канавку и восполняет потери масла в смазочном слое. Для замыкания магнитной цепи подшипника вал 7 должен быть изготовлен из магнитомягкого материала.

Во втулке подшипника в центральной ее части выполнено кольцевое углубление, равное по ширине толщине магнита, поэтому втулка имеет две отдельных опорных поверхности. Для того чтобы создать условия для работы подшипника при граничной смазке в широком нагрузочно - скоростном диапазоне выбрано отношение длины опорной поверхности к диаметру вала, равное $l/d=0,25$. Втулки подбирались по валу с таким условием, чтобы относительный диаметральный зазор был около $3 \cdot 10^{-3}$. Учитывая, что суммарная высота микровыступов R_z вала и втулки составляла не менее 5 - 6 мкм, коэффициент нагруженности ϵ подшипника, работающего при граничной смазке, не должен быть более 1 - 1,5 и рассчитываться по формуле:

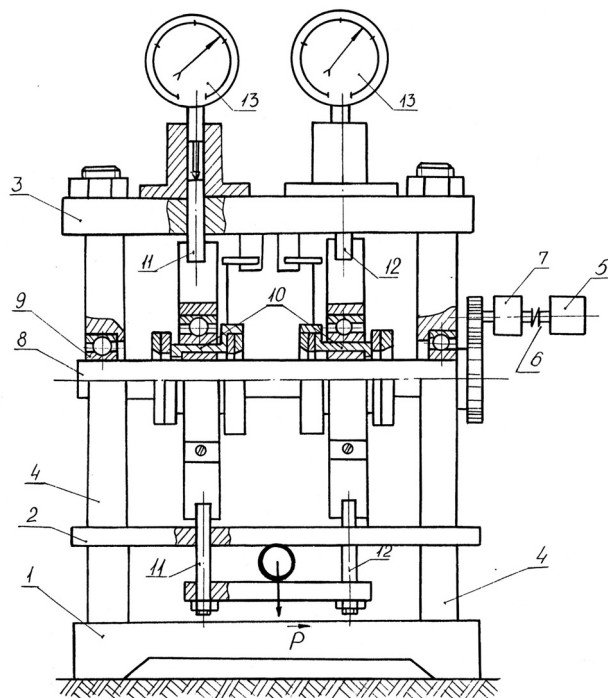


Рис. 2. Схема установки для исследования подшипников

$$\varepsilon = \frac{P\psi^2}{\eta\omega},$$

где P – удельное давление, Ψ – относительный зазор, η – коэффициент вязкости, ω – частота вращения вала. Исходя из этого, определялись конкретные условия испытаний.

Экспериментальное оборудование. Схема установки, использованной для исследования радиальных подшипников скольжения, изображена на рис. 2. Отличительные особенности установки заключаются в следующем:

- простота конструкции позволяет проводить испытания практически всех приемлемых радиальных подшипников скольжения с различной структурой магнитной цепи;

- возможность проводить испытания двух подшипников в одинаковом нагрузочно - скоростном режиме, что позволяет быстро и надежно сравнивать эффективность работы различных конструкций и сокращает время для сбора статистического материала;
- самообеспечивается соосное расположение вала и втулки.

Установка состоит из пространственной рамы, играющей роль несущей конструкции, включающей нижнюю плату 1, среднюю плату 2, верхнюю плату 3, соединенные стойками 4. К раме крепится привод из электродвигателя постоянного тока 5, муфты 6, планетарного редуктора 7, зубчатой передачи, передающей вращение валу 8. Вал 8 опирается на внутренние кольца шарико-

подшипников 9, запрессованных в стойках 4. Различные конструкции подшипников скольжения, смазываемых магнитными и традиционными маслами, размещаются в нагрузочных узлах 10. Давление на подшипник создается набором грузов, приложенных через рычажную систему. С противоположных сторон к нагрузочному узлу 10 прикреплены тяги 11 и 12 для передачи нагрузки от рычажной системы и для измерения суммарного износа с помощью индикаторов перемещений, закрепленных в стаканах верхней платы 3. Момент трения снимался с корпуса исследуемого подшипника и определялся с помощью тензобалки.

Диаметр вала, в контакте с которым работали опытные подшипники,

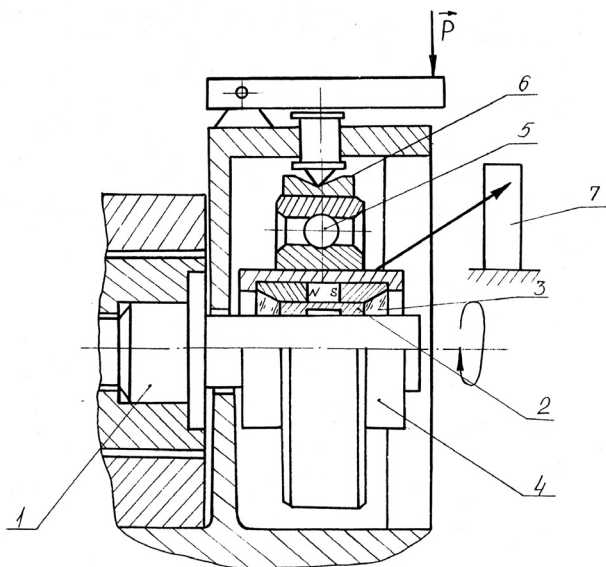


Рис. 3. Модернизированный узел трения машины СМЦ-2

равнялся 20 мм и был изготовлен из стали У8А или 40Х. Частота вращения вала изменяется от 1 до 30 с⁻¹, контактные давления в диапазоне 0,1 - 2 МПа (при длине втулки, равной диаметру).

Измерения износа производились дискретно через 5-7 часов. Измерялся суммарный износ втулки и вала после отключения электродвигателя и охлаждения подшипникового узла до комнатной температуры. За величину износа принималась разность между диаметрными зазорами в подшипнике до и после каждого цикла испытаний. Систематическая ошибка определения износа не более 0,3 мкм.

Для испытаний крупногабаритных подшипников с диаметром вала более 30 мм использовалась машина трения СМЦ-2, которая была модернизирована в основном для того, чтобы можно было измерять небольшие моменты трения и прикладывать радиальную нагрузку к подшипникам с диаметром корпуса более 150 мм.

Для удовлетворения требованиям узел трения машины СМЦ-2 был подвергнут переделке. Модернизированный узел трения машины СМЦ-2 представлен на рис. 3. На вал 1 шпиндельного узла опирается втулка 2 подшипника 3, смазываемого магнитным маслом. Корпус подшипника скольжения 4 установлен во внутреннем кольце шарикоподшипника 5, к наружному кольцу которого через призму 6 прикладывается радиальная нагрузка. В корпусе 4, выполненном из немагнитного материала, располагается набор постоянных магнитов, магнитопроводов и втулка. Момент трения с корпуса подшипника скольжения

воспринимается упругим элементом с наклеенными к нему тензорезисторами.

Исследуемые материалы трения. Для исследований выбраны следующие сочетания материалов вала и втулки: полиамид-сталь, латунь-сталь, бронза-сталь, сталь-сталь, керамика-сталь. По конструктивным причинам втулка всегда была из немагнитного материала. Учитывая возможное абразивное действие частиц магнитного масла, материалы подбирали таких марок, у которых выше твердость. Втулки, изготовленные из цветных антифрикционных материалов: латуни ЛЖМц 59-1-1, бронзы БРАЖ9-4 и немагнитной стали 12Х18Н9Т хотя и имеют твердость достаточно высокую для указанного класса материалов, но в то же время значительно уступают по твердости частицам магнетита.

Для сравнения один из вариантов втулки изготовлен из полимерного материала – полиамида ПА- 6. Пред-

полагалось, что износостойкость этого и других относительно мягких материалов возрастает при трении самопроизвольно за счет установленного нами эффекта упрочнения поверхности включениями из частиц дисперсного магнетита.

Перспективным является применение для магнитоожидкостных узлов трения деталей с оксидными керамическими покрытиями, полученными новым методом - анодированием в электролитическом разряде или иначе микродуговым окислением (МДО) [2]. Сущность процесса получения покрытия сводится к электрохимическому окислению вентильного металла в режиме анодного искрового или микродугового разряда. Для исследований были выбраны втулки из алюминиевого сплава с нанесенным на них корундовым покрытием. Установка для получения покрытий состоит из конденсаторного источника тока и ванны с рубашкой охлаждения, заполненной водным электролитом. Базовым электролитом являлся водный раствор технического жидкого стекла и гидроксида натрия, содержание которых было около 6 г/л и 2 г/л соответственно. Формовка покрытия осуществлялась в течение 4 - 5 часов при плотности тока 0,1-0,15 А/см² и напряжении, изменяющемся от 450 В в начале процесса до 670 В в конце.

В первые несколько десятков минут после начала процесса формовки покрытия происходит нарастание на поверхности рыхлого слоя, образованного из неорганических полимеров силиката натрия, частично прореагировавшего с алюминием. В этот период времени формовка покрытия протекает в режиме анодного искрового разряда. Затем искровой разряд переходит постепенно в дуговой. Температура в локальных областях на

поверхности алюминия, где протекает дуговой разряд, повышается настолько, что создаются условия для образования кристаллического оксида алюминия. Рост оксидной пленки продолжается около 3 часов, после чего ее толщина достигает критического значения, и если процесс не остановить происходит отслаивание покрытия.

Максимальная толщина оксидной пленки на поверхности алюминиевых сплавов, при которой еще сохраняется ее высокая адгезия к подложке, составляет около 100 мкм. Общая толщина покрытия, образующегося на поверхности металла с учетом стеклообразного слоя около 300...400 мкм.

Микротвердость покрытия возрастает по мере уменьшения его толщины. Верхний стеклообразный слой имеет микротвердость 4-5 ГПа, нижний, граничащий с металлом, 15-20 ГПа. Покрытия с наиболее высокой твердостью и прочностью образуются на алюминиевом сплаве Д16. Адгезия оксидного слоя к металлу очень высокая - $(2 - 4) \cdot 10^8$ Н/м², что достигается за счет образования сильных химических связей. Все покрытия, полученные анодированием, имеют некоторую пористость. Оксидный слой МДО - покрытия содержит поры в пределах 5-15 %, силикатный - до 40 %. Средний диаметр пор колеблется от 5-10 до 30 мкм, причем при уменьшении пористости диаметр, как правило, увеличивается. Изучение фазового состава оксидного слоя МДО - покрытия показало, что он, в основном, состоит из α и γ модификаций Al_2O_3 (корунда). В небольшом количестве в этом слое покрытия содержатся оксиды кремния (до 9 %), железа (до 2 %), натрия (до 2 %). Таким образом, МДО - покрытие имеет гетерофазный состав, причем высокопрочная дисперсная фаза $\alpha-Al_2O_3$ окружена

менее прочной дисперсионной (матричной) средой $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Были проведены исследовательские работы, направленные на совершенствование технологии МДО. Достигнуто сокращение времени формовки МДО - покрытия в 1,5 - 2 раза при соответствующем уменьшении энергоемкости процесса. Ускорение процесса достигается, в основном, за счет более быстрого формирования технологического силикатного слоя определенной морфологии. Формовка покрытия первоначально в течение нескольких минут проводится в сильно концентрированном электролите, а затем продолжается в стандартном электролите.

С практической точки зрения представляется важным то, что удалось отработать технологию восстановления покрытия на локальных участках поверхности, с которых оно удалено в результате износа или по другим причинам [3]. Проблема восстановления заключалась в том, что в случае проведения формовки нового покрытия в обычном режиме, происходит отслаивание оставшегося покрытия. По предложенной технологии, восстановление проводится в специально подобранном силикатном электролите при малых плотностях тока в течение 2 - 2,5 часов.

Для экспериментальных исследований были выбраны МДО - покрытия, нанесенные на деформируемый алюминиевый сплав Д16. Покрытие наносилось на рабочую поверхность опытных образцов втулок с помощью катода, проходящего через нее. Материалом вала служила закаленная сталь У8А (HRC 60) или сталь 40Х поверхность, которой подвергалась специальной обработки как для снижения абразивной составляющей износа так и усталостного разрушения при трении.

Для придания поверхности стали 40Х высокой твердости в сочетании с удовлетворительной пластичностью, ее подвергали двум различным видам термической обработки. В первом случае поверхность подвергалась лазерной закалке с последующим отпуском (микротвердость около 8 ГПа). Во втором случае для обработки поверхности применен усовершенствованный технологический процесс [4] лазерного оплавления с последующим глубоким охлаждением до температуры жидкого азота (микротвердость около 10 ГПа). Основные параметры обработки (удельная мощность, размер лазерного пятна, время сканирования) подбирали экспериментально такими, чтобы они обеспечивали получение аморфного (бескристаллитного) слоя толщиной не менее 0,2 мм на рабочих поверхностях узла трения, а так же чтобы величины остаточных напряжений в поверхностных слоях были бы по возможности одинаковы.

Смазка подшипников проводилась наиболее перспективным для практических целей магнитным маслом на основе диоктилсебацината. Масло имело намагниченность насыщения 24 кА/м, вязкость в магнитном поле 0,2 Тл и температуре 293 К около 0,08 Па·с. При повышении температуры от указанной до 400 К вязкость масла понижается всего в 2- 2,5 раза, хотя у дисперсионной среды понижается почти на порядок. Предельное напряжение сдвига у магнитного масла в полях, характерных для подшипниковых узлов (около 0,2 Тл), незначительно – 20-30 Па. Такие значения предельного напряжения сдвига существенно изменяют динамику поступления масла в зону контакта и несколько повышают силу трения при пуске. Высокая объемная температура в подшипнике стимулирует развитие процессов деструкции и полимериза-

Фрикционные свойства подшипников, имеющих втулки из различных материалов

Материалы пары трения	Условия трения		Фрикционные свойства	
	P, МПа	v, м/с	f	I _n · 10 ⁻⁹
Сталь У8А – бронза БрАЖ9-4	1	0,6	0,11	0,9
	3	1,1	0,11	3,1
	5	1,5	0,12	4,2
Сталь У8А – латунь ЛЖМц 59-1-1	1	0,6	0,12	1,2
	3	1,1	0,13	3,9
	5	1,5	0,13	5,6
Сталь У8А – сталь 12Х18Н9Т	1	0,6	0,10	0,8
	3	1,1	0,15	1,7
	5	1,5	0,13	3,4
Сталь У8А – керамика	1	0,6	0,07	0,05
	3	1,1	0,09	0,18
	5	1,5	0,09	0,25
Сталь 40 х (закалка) - керамика	1	0,6	0,09	0,06
	3	1,1	0,09	0,16
Сталь 40 х (аморфная) - керамика	1	0,6	0,08	0,05
	3	1,1	0,09	0,14
Сталь У8А-полиамид	1	0,6	0,05	1,4

ции в масле, а так же окисление наночастиц. В используемое магнитное масло введена специальная антиоксидантная присадка, позволяющая длительно эксплуатировать масло при температуре до 450 К.

Результаты исследований и их обсуждение. Все данные по трению и износу магнитожидкостных подшипников при различных контактных давлениях обобщены в таблице. Суммарная интенсивность износа определялась как среднее по двум параллельным испытаниям, если расхождение между ними не превышало 10-15 %, в противном случае испытания повторялись. Продолжительность испытаний на износ подшипников с металлическими втулками была не менее 50 часов, а с упрочненными керамикой 200-300 часов.

Как и следовало ожидать, данные в таблице показывают, что износ контакта металл-металл значительно выше, чем контакта МДО - покрытие - металл. Трение в подшипниках с МДО - покрытием также ниже. Применение вала с аморфным покрытием позво-

ляет снизить суммарную скорость изнашивания за счет большей стойкости к абразивному и усталостному износу вала. Как и следовало ожидать, износостойкость пары трения полимер-сталь в рассматриваемых условиях оказалась низкой. Вероятно, это связано не только с низкой абразивной стойкостью полимера, но и с усиленным износом вала шаржированными в полимер частицами магнетита из масла.

В пределах всего срока испытаний интенсивность изнашивания подшипников с упрочненными втулками остается практически неизменной (рис. 4), а для подшипников с металлическими и полимерной втулками снижалась к концу испытаний, что, очевидно, связано с более интенсивным изнашиванием материалов в период приработки и изменением площади контакта вала с втулкой.

На рис. 5 приведены профилограммы поверхностей трения различных материалов. Видно, что на поверхности втулок из сравнительно мягких материалов (сталь, бронза) в

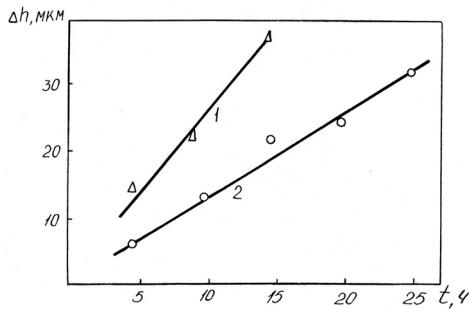


Рис. 4. Динамика износа керамического покрытия при давлении 5 МПа и скорости 1,5 м/с; 1 - поверхность с микротвердостью 9 ГПа, 2 - 18 ГПа

результате абразивного износа появляются глубокие кольцевые риски, которые, конечно же, не способствуют переходу к гидродинамическому трению. Существенных изменений поверхности с МДО-покрытием после трения нет: поверхность сохраняет тот же класс шероховатости, как исходная после тонкого шлифования или становится даже более гладкой.

Интенсивность изнашивания МДО - покрытий зависит от того, какой слой контактирует с валом. На рис.4 для примера показаны кривые износа для случая, когда вал контактирует с самым прочным и твердым слоем, содержащим, преимущественно, оксид алюминия и слоем, лежащим выше и имеющим худшие механические свойства из-за большого содержания в нем стеклообразных продуктов.

Заключение. Из приведенных данных однозначно вытекает, что наиболее целесообразно втулки для магнитожидкостных подшипников оборудования, используемого в горнодобывающей промышленности, изготавливать из алюминиевых сплавов, а поверхности трения упрочнять методом МДО. Достоинства втулок с МДО - покрытиями следующие:

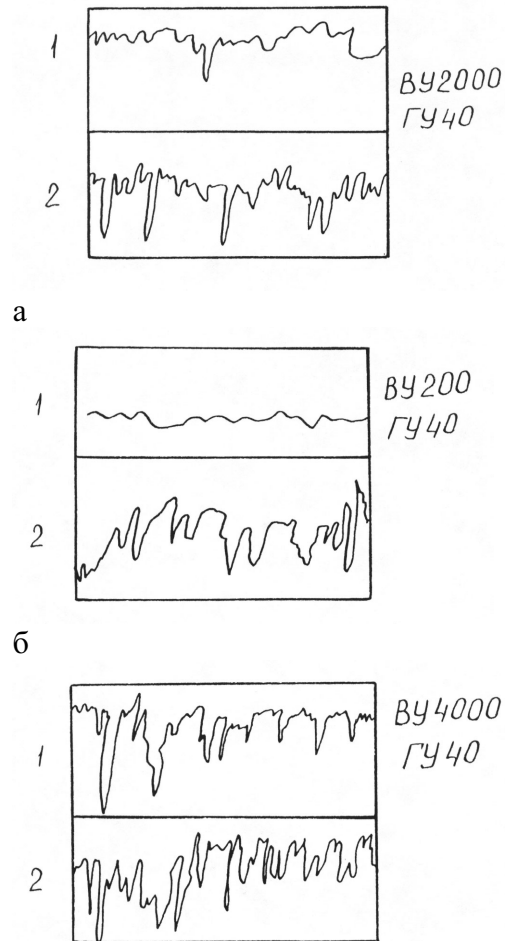


Рис. 5. Профилограммы исходной (1) и изношенной (2) поверхностей материалов: а - 12Х18Н9Т; б - бронзы БрАЖ9-4; в - корундовой керамики (ВУ, ГУ - вертикальное и горизонтальное увеличение)

- сравнительно высокая износостойкость керамического материала покрытия и хорошие антифрикционные свойства;

- износостойкость возрастает по глубине покрытия, что можно использовать для приработки втулок, установленных с перекосом;

- покрытие может быть нанесено на алюминиевый антифрикционный сплав, и тогда даже после разрушения покрытия подшипник не окажется в аварийном состоянии;

- в процессе трения на поверхности покрытия втулки и соответственно

на валу в результате абразивного действия магнитных частиц не образуются макронеровности, неблагоприятные для гидродинамического режима смазки; - технология изготовления втулок с керамическими покрытиями достаточно проста и экономична.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Магнитожидкостные подшипники скольжения* / Болотов А.Н., Новиков В.В., Павлов В.Г. // Трение и износ. - 2004. - Т.25, - №3.- С. 286-291.

2. *Применение микродугового оксидирования для получения керамического алмазосодержащего материала* / Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2006. - № 3. - С. 87 - 92.

3. *А.С. Новикова* Способ электролитического нанесения антифрикционного покрытия на алюминий и его сплавы: патент

Российской Федерации RU 2220233 С1 7С 25 D 15/00/ А.Н. Болотов, В.В. Новиков, Д.А. Зоренко (Россия). – 4 с.

4. *Абрамов И.Л.* Применение аморфных композиционных покрытий для повышения износостойкости тяжело нагруженных зубчатых передач/Абрамов Л.М., Хмурович Ф.Л., Абрамов И.Л.// Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел деталей технологического и энергетического оборудования. Тверь, 2010. В. 3. – С. 182-184. **ПАТ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Болотов Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, alnikbltov@rambler.ru,

Новикова Ольга Олеговна – кандидат технических наук, доцент, onvk@mail.ru,

Горлов Игорь Васильевич – кандидат технических наук, доцент, gorloviv@yandex.ru,

Васильев Максим Викторович – аспирант, makcvasyliiev@ya.ru.

Тверской государственный технический университет.



ИЗДАТЕЛИ УЛЫБАЮТСЯ

Даже самые бесталанные ученые не так обременительны для издателей, как их дети и внуки.