

впрыска. При увеличении нагрузки предварительные впрыски один за другим прекращаются, пока при полной нагрузке двигатель не перейдет в режим основного впрыска. Оба дополнительных впрыска необходимы для регенерации сажевого фильтра.

Рис. 6. График процесса двойного впрыска и характер распыления топлива

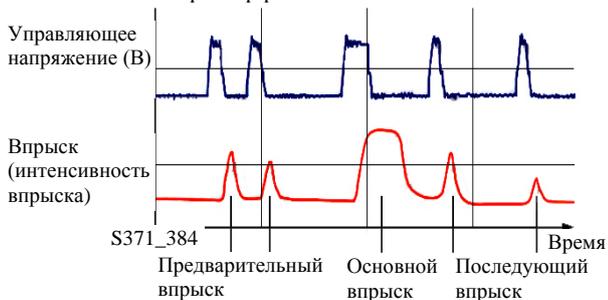


Рис. 7. Зависимость управляющего напряжения и давления топлива от времени

Для предотвращения опорожнения аккумулятора через форсунку с зависшей иглой или клапаном управления, а также повреждения соответствующего цилиндра дизеля авторами предложено на входе топлива в форсунку устанавливать аварийный ограничитель подачи топлива. В нем используется принцип возникновения разницы давлений по обе стороны от клапана 1 (рис. 8) при прохождении топлива через его жиклеры 2. Сечение жиклеров, затяжка пружины 3 и диаметр клапана подбираются по максимальной продолжительности и расходу, т. е. по подаче топлива.

1 2 3

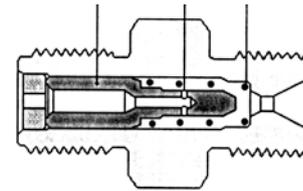


Рис. 8. Аварийный ограничитель подачи топлива через форсунку  
**ВЫВОД**

Учитывая сказанное выше, можно сделать вывод, что установка системы впрыска Common rail на дизельных двигателях позволит повысить мощность на 35–45 %, уменьшить расход топлива до 15 %, снизить токсичность выхлопных газов на 20 % и уровень шумности до 10 %. Введение аварийного ограничителя оборотов двигателя повысит надежность и ресурс описанной выше системы и машины в целом. Это в итоге увеличит мощность двигателя, снизит расход топлива и токсичность выхлопных газов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.masheka.ru/>
2. <http://adt.by/content/view/629/58/>
3. <http://maz.by/>
4. <http://www.powertrain.ru/yamz650th.html>
5. <http://www.park5.ru/articles/1/311>
6. <http://www.powertrain.ru/yamz650pr.html>
7. <http://www.floodovercar.ru/index.php/techdocs/38-cars-systems/89-common-rail.pdf>
8. Дениелс, Д. Современные автомобильные технологии / Д. Дениелс. – М.: АстрельАСТ, 2003. – С. 72–77.
9. Система управления дизельными двигателями. – М.: Изд-во «За рулем», 2011. – С. 280–299.

Поступила 10.01.2012

УДК 621.891

## МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ ПОДШИПНИКИ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ

Канд. техн. наук, доц. ГОРЛОВ И. В., доктора техн. наук, профессора БОЛОТОВ А. Н., ЗЮЗИН Б. Ф.

Магнитожидкостные подшипники [1] были созданы относительно недавно, но уже отмечены 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, 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 в условиях вибраций и ударных нагрузок, заключается в правильном выборе материалов вала, втулки и смазочного масла.

**Описание опытного подшипника.** При граничном режиме смазки изучались свойства базового магнитожидкостного подшипника (рис. 1) с симметричной магнитной системой. Подшипник состоит из немагнитного корпу-

са 1, внутри которого установлены 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.

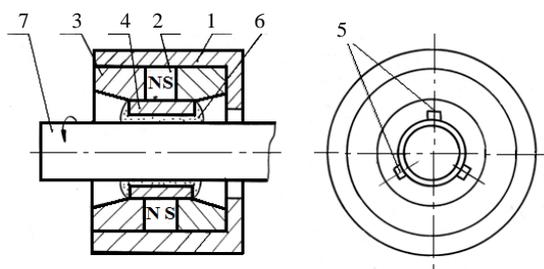


Рис. 1. Принципиальная схема магнитожидкостного подшипника

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 конфузурной 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.

Во втулке подшипника в центральной ее части выполнено кольцевое углубление, равное по ширине толщине магнита, поэтому втулка имеет две отдельные опорные 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  $\varepsilon$  подшипника, работающего при граничной смазке, не должен быть более 1,0–1,5. Он рассчитывается по формуле

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

где  $P$  – удельное давление;  $\Psi$  – относительный зазор;  $\eta$  – коэффициент вязкости;  $\omega$  – частота вращения вала.

Исходя из этого определялись конкретные условия испытаний.

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.

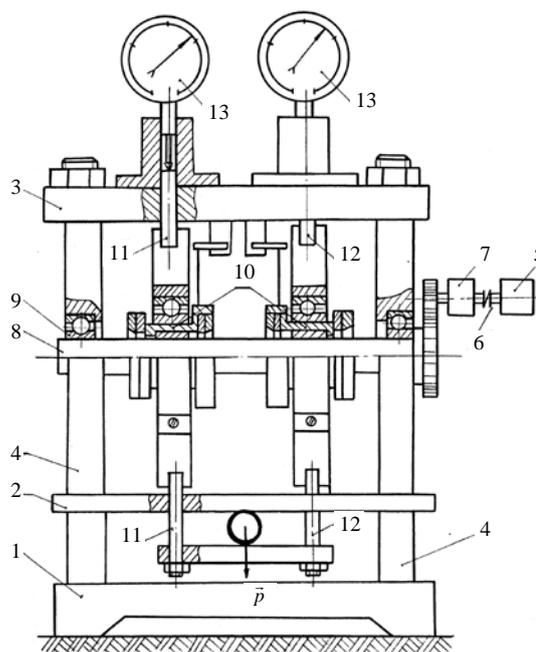


Рис. 2. Схема установки для исследования подшипников

Установка состоит из пространственной рамы, играющей роль несущей конструкции, включающей нижнюю плиту 1, среднюю плиту 2, верхнюю плиту 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 внутреннее кольцо шарикоподшипников 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 плиты 3. Момент трения снимали с корпуса исследуемого подшипника и определяли с помощью тензобалки.

Диаметр вала, в контакте с которым работали опытные подшипники, равнялся 20 мм и был изготовлен из стали У8А или 40Х. Частота вращения вала изменялась от 1 до 30  $\text{с}^{-1}$ , кон-

тактные давления были в диапазоне 0,1–2,0 МПа (при длине втулки, равной диаметру).

Измерения износа производили дискретно через 5–7 ч. Измеряли суммарный износ втулки и вала после отключения электродвигателя и охлаждения подшипникового узла до комнатной температуры. За величину износа принимали 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 использовали машину 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 соответствия 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, располагаются набор постоянных магнитов, магнитопроводов и втулка. Момент трения с корпуса подшипника скольжения воспринимается упругим элементом с приклеенными к нему тензорезисторами.

Для исследований были 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 достаточно высокую твердость для указанного класса материалов, но в то же время зна-

чительно уступают по твердости частицам магнетита.

Для сравнения один из вариантов втулки был изготовлен из полимерного материала – полиамида ПА-6. Предполагалось, что износостойкость этого и других относительно мягких материалов самопроизвольно возрастает при трении за счет установленного авторами эффекта упрочнения поверхности включениями из частиц дисперсного магнетита.

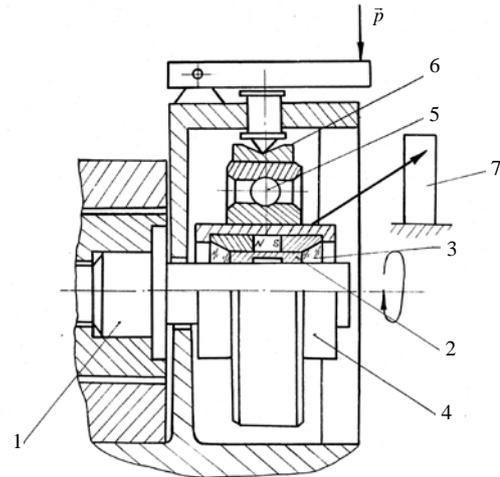


Рис. 3. Модернизированный узел трения машины СМЦ-2

Перспективным является применение для магнитожидкостных узлов трения деталей с окисидными керамическими покрытиями, полученными новым методом – анодированием в электролитическом разряде или иначе микродуговым оксидированием (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 состояла 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 и 2 г/л соответственно. Формовку покрытия осуществляли в течение 4–5 ч при плотности тока 0,10–0,15 А/см<sup>2</sup> и напряжении,

изменяющемся от 450 В в начале процесса до 670 В в конце.

В первые несколько десятков минут после начала процесса формовки покрытия происходило нарастание на поверхности рыхлого слоя, образованного из неорганических полимеров силиката натрия, частично прореагировавшего с алюминием. В этот период формовка покрытия протекала в режиме анодного искрового разряда. Затем искровой разряд переходил постепенно в дуговой. Температура в локальных областях на поверхности алюминия, где протекал дуговой разряд, повышалась настолько, что создавались условия для образования кристаллического оксида алюминия. Рост оксидной пленки продолжался около 3 ч, после чего ее толщина достигала критического значения, и если процесс не останавливали, происходило 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/м<sup>2</sup> 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 с уменьшением пористости диаметр, как правило, увеличивается. Изучение фазового состава оксидного слоя МДО-покрытия показало, что он в основном состоит из  $\alpha$ - и  $\gamma$ -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 дис-

персная фаза  $\alpha-Al_2O_3$  окружена менее прочной дисперсионной (матричной) средой  $\gamma-Al_2O_3$ .

Были проведены исследования, 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. Формовку покрытия первоначально в течение нескольких минут проводили в сильно концентрированном электролите, а затем продолжали 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 ч.

Для экспериментальных исследований были выбраны МДО-покрытия, нанесенные на деформируемый алюминиевый сплав Д16. Покрытие наносили 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 подвергали 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 проводили закалку поверхности лазером с последующим отпуском (микротвердость около 8 ГПа). Во втором случае для обработки поверхности применяли усовершенствованный технологический процесс [4] лазерного оплавления с последующим глубоким охлаждением до температуры жидкого азота (микротвердость

около 10 ГПа). Основные параметры обработки

Материалы пары трения	Условия трения		Фрикционные свойства	
	$P$ , МПа	$v$ , м/с	$f$	$I_h \cdot 10^{-9}$
Сталь У8А – бронза БрАЖ9-4	1	0,6	0,11	0,90
	3	1,1	0,11	3,10
	5	1,5	0,12	4,20
Сталь У8А – латунь ЛЖМц 59-1-1	1	0,6	0,12	1,20
	3	1,1	0,13	3,90
	5	1,5	0,13	5,60
Сталь У8А – сталь 12Х18Н9Т	1	0,6	0,10	0,80
	3	1,1	0,15	1,70
	5	1,5	0,13	3,40
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 40Х (закалка) – керамика	1	0,6	0,09	0,06
	3	1,1	0,09	0,16
Сталь 40Х (аморфная) – керамика	1	0,6	0,08	0,05
	3	1,1	0,09	0,14
Сталь У8А – полиамид	1	0,6	0,05	1,40

(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 также чтобы величины остаточных напряжений в поверхностных слоях были по возможности одинаковы.

Смазку подшипников проводили наиболее перспективным для практических целей магнитным маслом на основе диоктилсебагината. Масло имело намагниченность насыщения 24 кА/м, вязкость в магнитном поле (0,2 Тл) и при температуре 293 К – около 0,08 Па·с. При повышении температуры от указанной до 400 К вязкость масла снижалась всего в 2–2,5 раза, хотя у дисперсионной среды уменьшалась 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 несущественно изменяют динамику поступления масла в зону контакта и несколько повышают силу трения при пуске. Высокая объемная темпера-

тура в подшипнике стимулирует развитие процессов деструкции и полимеризации в масле, а также окисление наночастиц. В используемое магнитное масло вводили специальную антиоксидантную присадку, позволяющую длительно эксплуатировать масло при температуре до 450 К.

Все данные по трению и износу магнитожидкостных подшипников при различных контактных давлениях обобщены в табл. 1. Суммарную интенсивность износа определяли как среднее по двум параллельным испытаниям, если расхождение между ними не превышало 10–15 %, в противном случае испытания повторяли. Продолжительность испытаний на износ подшипников с металлическими втулками была не менее 50 ч, а с упрочненными керамикой – 200–300 ч. Данные в табл. 1 показывают, что износ контакта металл – металл значительно выше, чем контакта МДО – покрытие – металл. Трение в подшипниках с МДО-покрытием также ниже.

Таблица 1

**Фрикционные свойства подшипников, имеющих втулки из различных материалов**

Применение вала с аморфным покрытием позволяет снизить суммарную скорость изнашивания за счет большей стойкости к абразивному и усталостному износам вала. Нетрудно заметить, что износостойкость пары трения полимер – сталь в рассматриваемых условиях оказалась низкой. По мнению авторов, 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 оставалась 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.

$\Delta h$ , мкм

30

20

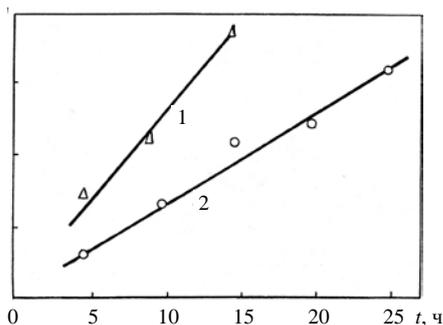


Рис. 4. Динамика износа керамического покрытия при давлении 5 МПа и скорости 1,5 м/с для поверхности с микротвердостью: 1 – 9 ГПа; 2 – 18 ГПа

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

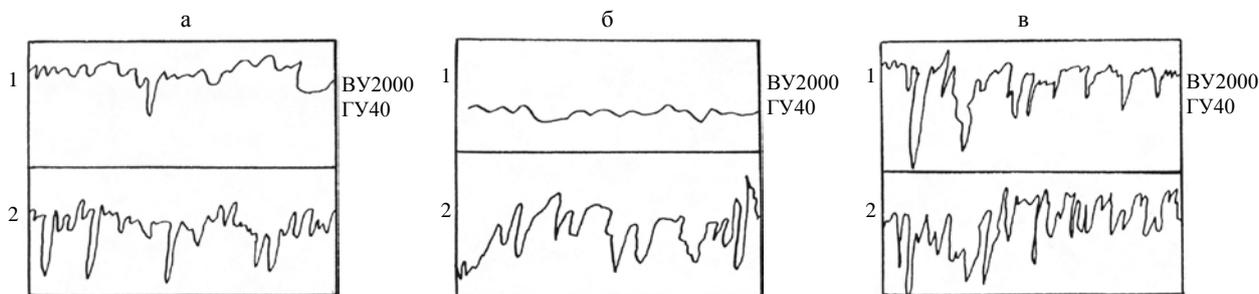


Рис. 5. Профилограммы исходной (1) и изношенной (2) поверхностей материалов: а – сталь 12Х18Н9Т; б – бронза БрАЖ9-4; в – корундовая керамика (ВУ, ГУ – вертикальное и горизонтальное увеличение)

### ВЫВОДЫ

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

- 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;

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.

На рис. 5 приведены профилограммы поверхностей трения различных материалов. Видно, что на поверхности втулок из сравнительно мягких материалов (сталь, бронза) в 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, что и исходная после тонкого шлифования, или становится даже более гладкой.

- 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.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Болотов, А. Н. Магнитоожидкостные подшипники скольжения / А. Н. Болотов, В. В. Новиков, В. Г. Павлов // Трение и износ. – 2004. – Т. 25, № 3. – С. 286–291.
2. Болотов, А. Н. Применение микродугового оксидирования для получения керамического алмазосодержащего материала / А. Н. Болотов, В. В. Новиков, О. О. Новикова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. – № 3. – С. 87–92.
3. Способ электролитического нанесения антифрикционного покрытия на алюминий и его сплавы: пат. Рос. Федерации RU 2220233 C1 7C 25 D 15/00 / А. Н. Болотов, В. В. Новиков, Д. А. Зоренко. – 4 с.

4. **Абрамов, Л. М.** Применение аморфных композиционных покрытий для повышения износостойкости тяжело нагруженных зубчатых передач / Л. М. Абрамов, Ф. Л. Хмурович, И. Л. Абрамов // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел дета-*

*лей технологического и энергетического оборудования.* – Тверь, 2010. – Вып. 3. – С. 182–184.

Поступила 27.03.2012