

ISSN 0032-4795

ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ

Powder Metallurgy

7/8' 2013

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор

В. В. СКОРОХОД

Зам. главного редактора

М. С. КОВАЛЬЧЕНКО

Ответственный секретарь редакции

Т. А. МАЛЫШЕВСКАЯ

Члены редколлегии

Г. А. БАГЛЮК, М. В. БУЛАНОВА,
Г. Г. ГНЕСИН, А. Г. КОСТОРНОВ,
В. А. ЛАВРЕНКО, О. Д. НЕЙКОВ,
Ю. Н. ПОДРЕЗОВ, А. В. РАГУЛЯ,
Г. Г. СЕРДЮК, Ю. М. СОЛОНИН,
Л. И. ЧЕРНЫШЕВ, М. Б. ШТЕРН

Научные эксперты

Т. Я. ВЕЛИКАНОВА, В. И. ДЫБКОВ,
Я. В. ЗАУЛИЧНЫЙ, В. И. ИВАЩЕНКО,
Л. М. КУЛИКОВ, Г. С. ОЛЕЙНИК

Международный редакционный совет

Р. А. АНДРИЕВСКИЙ (Россия),
В. Н. АНЦИФЕРОВ (Россия), С. М. БАРИНОВ
(Россия), М. БОВУАР (Франция),
Г. ДАННИНГЕР (Австрия), А. Ф. ИЛЮЩЕНКО
(Беларусь), Б. КИБАК (Германия),
В. И. КОСТИКОВ (Россия), В. КРСТИЧ
(Канада), Е. ОЛЕВСКИЙ (США), В. Е. ПАНИН
(Россия), М. РИСТИЧ (Сербия),
Н. К. ТОЛОЧКО (Беларусь),
Д. УСКОКОВИЧ (Сербия), Н. ФРАГЕ
(Израиль), Ф. ФРОЕС (США), К. ХАБЕРКО
(Польша), М. ШАФРАН (Польша)

Свидетельство о регистрации

КБ №86 от 16.09.93

Адрес редакции:

03142 Киев, ул. Кржижановского, 3
Институт проблем материаловедения
им. И. Н. Францевича Национальной академии наук Украины
☎(044) 424 14 01; publ@ipms.kiev.ua

Учредитель:

Институт проблем материаловедения
им. И. Н. Францевича Национальной академии наук Украины

Журнал включен в Перечень научных изданий Украины, в которых могут публиковаться результаты диссертационных работ на соискание научных степеней доктора и кандидата наук в области химических, технических и физико-математических (физика) наук

Журнал переиздается на английском языке издательством "Springer"
под названием "*Powder Metallurgy and Metal Ceramics*"

Журнал "*Powder Metallurgy and Metal Ceramics*" представлен в "Academic Search", "Chemical Abstracts Service" (CAS), "Compendex", CSA/Proquest, "Current Abstracts", "Current Contents/Engineering", "Computing and Technology", "Gale", "Google Scholar", "INIS Atomindex", "Journal Citation Reports/Science Edition", "Materials Science Citation Index", OCLC, "Science Citation Index Expanded" (SciSearch), SCOPUS, Summon by Serial Solutions, TOC Premier

М. Н. Свирид, Э. Вайс,
Л. Б. Приймак, В. Н. Бородий, А. Е. Якобчук

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПАР ТРЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Визначено можливість керування процесами відновлення і зношування при терті залежно від місця розташування магнітних полюсів за допомогою електромагнітних технологій. Встановлено можливість відновлювати в магнітному полі окремо (не розбираючи механізм) як сталевий поршень, так і циліндр, що складається з мідного сплаву. Розроблено методику відновлення поверхонь тертя у робочому середовищі, модифікованому порошками різної магнітної природи в імпульсному магнітному полі. Досліджено вплив імпульсного магнітного поля на трибологічні властивості пари тертя у робочому середовищі з нанопорошками різної магнітної природи. Встановлено, що поверхні найбільш функціональні за умов впливу імпульсного магнітного поля S/N-напряму.

Ключові слова: тертя, мастило, магнітне поле, порошок, робочий зразок, контртіло, зношування, відновлення.

Введение

Эксплуатационная надежность и долговечность машин определяется условиями поддержания механизмов как составных их частей в рабочем состоянии. Поэтому ужесточаются требования к подвижным узлам механизмов с повышенными эксплуатационными параметрами. Современные сложные машины управляются мощными гидравлическими механизмами, в состав которых входят перекачивающие агрегаты. Процесс эксплуатации требует повышения эффективности работы трибосопряжений и продления их ресурса путем выбора рационального метода восстановления. Эксплуатационные параметры агрегатов необходимо поддерживать в рабочем состоянии, своевременно обслуживать и ремонтировать, желательно — в процессе работы [1].

Известно много методов восстановления механизмов машин, но все они предусматривают демонтаж. Актуальной становится технология безразборного восстановления узлов машин, что значительно сокращает себестоимость ремонта и продлевает эксплуатационный ресурс машины.

Ремонт и восстановление рабочих деталей насосов прецизионных пар отличается высокой трудоемкостью, связанной с точностью изготовления деталей. Предметом нашего исследования является пара цилиндр–поршень с жесткими требованиями по допускам (до 3–5 мкм).

Существует множество методов восстановления рабочих поверхностей. Остановимся на методах физического воздействия энергией высокой концентрации. К ним относятся: лазерное воздействие; воздействие магнитным полем; упрочнение сталей с использованием магнитного поля и высокоскоростного трения; наплавка и напыление легирующими металлами; электроискровая и ионно-плазменная обработки [2].

© М. Н. СВИРИД, Э. ВАЙС, Л. Б. ПРИЙМАК, В. Н. БОРОДИЙ, А. Е. ЯКОБЧУК, 2013

Множество работ посвящено восстановлению прецизионных пар трения с применением диффузионных методик [3], ревитализантов [4], вакуумного напыления после предварительной механической обработки [5], нанотехнологий [6].

Среди ремонтных способов восстановления деталей получили распространение изготовление деталей под ремонтный размер, сварка и наплавка, пластическая деформация, постановка добавочной детали, металлизация, электроэрозионная обработка, напекание порошков, получение гальванических покрытий, использование полимерных материалов.

Малоизвестным, но перспективным является метод восстановления под действием магнитного поля. При обработке инструмента резанием появляется термо-ЭДС, которая влияет на процесс резания и эксплуатационную стойкость инструмента. Под действием термо-ЭДС в зоне резания появляется электромагнитная индукция, вызывающая налипание микрочастиц на лезвие инструмента. Это приводит к увеличению силы трения и абразивному изнашиванию инструмента. Для защиты от этого явления в зону резания вводят компенсирующую электродвижущую силу или намагничивают деталь так, чтобы полярность намагниченного инструмента и детали была противоположна полярности термо-ЭДС. В результате при обработке сталей возрастает стойкость резцов, режущая кромка которых была северным полюсом магнита. Оптимальная скорость резания составляет 15 м/мин. Намагничивающей обработке подвергают резцы, развертки, сверла, плашки, метчики и др. [6].

В. Д. Евдокимов со своими учениками [7] разработали методику упрочнения сталей с применением магнитного поля и высокоскоростного трения. Исследования проводили при высоких скоростях скольжения — 70–100 м/с. Силовое магнитное поле пронизывало поверхность трения образца вне зоны фрикционного контакта, когда деформированные микрообъемы подвергались воздействию магнитного поля спустя короткое время после выхода из зоны контакта или, наоборот, перед входом в неё. Такая методика позволила в течение 30 с повысить износостойкость образцов трения в 1,5 раза [7].

Магнитную обработку используют для улучшения свойств конструкционных материалов, воды, растворов, дисперсных систем и др. Магнитную и термомагнитную обработку также широко применяют в машиностроении для увеличения стойкости и надежности работы лезвийного режущего инструмента и динамически нагруженных деталей машин. Незначительная стоимость и высокая производительность применяемых в промышленности устройств и современных установок, а также простота технологии магнитно-импульсной обработки (МИО) позволяют рекомендовать ее для различных областей народного хозяйства страны. Внедрение МИО позволит уменьшить остаточные и усталостные напряжения в деталях и конструкциях, повысить стойкость режущего инструмента из слабомагнитных материалов. При магнитном воздействии вещество изменяет свои физические и механические свойства. Улучшение свойств у прошедших МИО ферромагнитных деталей достигается за счет направленной ориентации свободных электронов вещества внешним полем, вследствие чего увеличиваются тепло- и электропроводимость материала [8].

В большинстве работ, посвященных исследованию магнитной обработки, рассмотрено влияние электромагнитных полей на эксплуатацион-

ные свойства сталей. В частности, авторы работы [9, 10] установили, что импульсная электромагнитная обработка сверл увеличивает их стойкость в 1,3–2 раза по сравнению с обработкой постоянным магнитным полем. Также они пришли к выводу, что эффект от магнитной обработки сильнее проявляется в закаленных сталях, чем в отожженных. Это объясняется распадом остаточного аустенита (ОА) в предварительно закаленных сталях, который подтвержден экспериментально уменьшением процентного содержания ОА в закаленных образцах после электромагнитной обработки [11, 12].

В работе [13] обобщены данные о влиянии электромагнитных полей и высокоскоростного однонаправленного трения скольжения на триботехнические свойства поверхностных и глубинных слоев сталей. Показано, что при определенных режимах трения возникают вторичные структуры в поверхностных слоях сталей, которые улучшают их эксплуатационные свойства. Это позволяет в несколько раз повысить износостойкость поверхностей трения при обычных условиях эксплуатации с повышением нагрузочных способностей, коррозионной стойкости и механических свойств.

Исследования [14, 15] показали, что импульсная магнитная обработка металлов позволяет повысить их твердость и прочность. Металл упрочняется под действием основной и отраженной ударных волн. Степень остаточной деформации при импульсном упрочнении значительно меньше, чем при упрочнении статическим деформированием.

Для нанесения покрытий толщиной до 100 мкм наиболее эффективными технологиями остаются электрохимические (но они вызывают коррозию рабочих поверхностей механизма, что является недостатком этих технологий). Долговечность силовых агрегатов перекачивающего механизма во многом зависит от работы трибопары поршень–цилиндр, которая рассчитывается в соотношении к техническим параметрам всего механизма. Повышение технологичности восстановления прецизионных поверхностей трения плунжерных насосов импульсным магнитным полем по безразборным технологиям с использованием рабочих жидкостей позволяет значительно уменьшить трудозатраты на обслуживание этих насосов.

Цель настоящей работы — осуществить процессы насыщения поверхности трения в маслах и рабочих жидкостях с высоким удельным электросопротивлением при помощи магнитного воздействия на модификаторы и добавки; использовать параметры магнитного поля для восстановления узла трения без разборки механизма со значительным сокращением расхода ресурсов.

Методика исследований

Для достижения поставленной цели изучили влияние равномерного импульсного электромагнитного поля на материалы разной магнитной природы при нестабильном состоянии трибоузла и определили параметры магнитного поля, необходимые для восстановления поверхности трения в масляных средах.

Изучены процессы, происходящие между поверхностями физических объектов, цилиндром и поршнем, с одной стороны, и энергетическими составляющими трения, магнитным полем и модификаторами масла — с другой.

Основываясь на результатах работы [16], исследования проводили по схеме палец-плоскость на машине с возвратно-поступательным движением. При этом изучили интенсивность изнашивания при трении в моторном масле М10Г2к. С целью интенсификации процесса восстановления поверхности в магнитном поле применяли модификаторы в виде порошков с различными магнитными свойствами. Подготовку поверхности рабочего образца проводили механическим способом, притирая на абразивной микронной шкурке, после чего промывали спиртом и взвешивали на аналитических весах АДВ-200М с точностью до 10^{-4} г. После этого образец (длиной 33 мм и диаметром 4 мм) размещали в съемном наконечнике машины трения с нагрузкой 3,5 МПа при скорости возвратно-поступательного движения 0,12 м/с в центре контртела, рабочий участок которого составлял 40 мм. Материалом образца служила сталь 45, закалённая на мартенсит, а контртелом — сплав латуни ЛС59-1. Как среду использовали масло М10Г2к. Исследования проводили при наложении магнитного поля с различными направлениями линий (рис. 1) и без него.

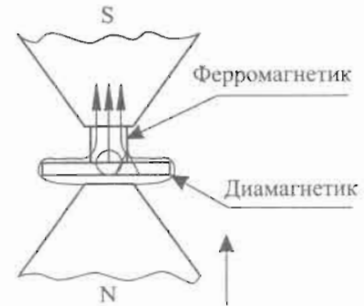


Рис. 1. Схема направления магнитных линий в зоне трения

В зону трения для ускоренных модельных исследований добавляли модификаторы с различными магнитными свойствами: ферромагнетик — никель (до 20 мкм), парамагнетик — олово (до 20 мкм) и диамагнетик — цинк (до 40 мкм). Величина магнитной индукции составляла 0,15 Тл.

Результаты исследований

Основой процесса трения является образование защитных плёнок на рабочей поверхности и условия их существования без разрушения длительное время в зависимости от воздействия внешних сил. При возвратно-поступательном движении поверхностно-деформационные нагрузки на материал приводят структуру в нестабильное состояние, что значительно снижает работоспособность сопряжённых пар трения.

Нагрузка оказывает превалирующее влияние на трибологические параметры взаимодействующих поверхностей. Элементы окружающей среды

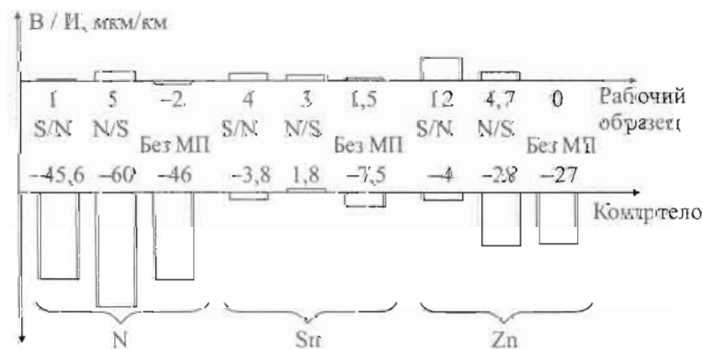


Рис. 2. Диаграмма трибологических параметров стали 45(М) по ЛС59-1 в масле М10Г2к под действием магнитного поля: В — восстановление; И — износ рабочего образца



Рис. 3. Топографии поверхности трения без магнитного поля

(масло), а также входящие в состав узла трения материалы взаимодействуют между собой в процессе относительного перемещения поверхностей, испытывая при этом направленное влияние магнитного поля. В результате образуются вторичные структуры трения.

Свободное существование модификаторов в масле подтверждается результатами трибологических исследований (рис. 2).

Наиболее мягкий материал — олово — механически втирается в поверхность, повышая положительный градиент износа более твердого рабочего образца до $+1,5$ мкм/км, тогда как поверхность характеризуется пятнами растёртых конгломератов (рис. 3). Цинк же значительно мягче рабочего образца и компенсирует насыщением изношенную часть материала стали, причем поверхности трения характеризуются пятнистым намазыванием цинкового порошка.

Влияние добавок никеля изменяет трибологические и поверхностные параметры за счёт повышения твёрдости порошка в процессе деформации до уровня контртела, что представляет абразивный характер изнашивания (рис. 3). Образец при этом имеет износ до 2 мкм/км (рис. 2) с характерными абразивными параметрами (рис. 3).

При трибологических испытаниях в магнитном поле с помощью модельных материалов параметры изнашивания приобретают противоположный характер (рис. 2). При модифицировании масла ферромагнитным порошком (Ni) пара трения “сталь 45(М) по латуни” характеризуется суммарным износом -48 мкм/км без воздействия магнитного поля (МП) (рис. 2), что объясняется изначальной твёрдостью никелевого порошка, благодаря которой он работает как абразив по латунному контртелу. Стальной образец имеет твёрдость 8500 МПа, поэтому конгломерат из порошка намазывают на стальную поверхность (рис. 4). В магнитном поле (рис. 2) рабочий образец прибавляет в размерах 1–5 мкм/км в зависимости от направления магнитного поля, а контртело изнашивается в диапазоне от -45 до -60 мкм/км. Механизм изнашивания базируется на влиянии направленного действия магнитного поля, ферромагнитный Ni втягивается в зону трения и прилипает к рабочему образцу, играя роль прослойки, которая царапает контртело. Магнитное поле в зависимости от направления прижимает порошок или к рабочему образцу, или к контртелу. Таким образом, ферромагнитные составляющие перемещаются перпендикулярно зоне контакта между поверхностями трения.

Для изучения поведения диамагнетика в магнитном поле использовали порошок цинка. Восстановление проявляется приростом размеров рабоче-

го образца в поле S/N до 12 мкм (рис. 2). При модификации масла порошком Zn на поверхности образца наблюдаются следы намазанного цинка (рис. 4), что значительно уменьшает износ пары трения (рис. 2). Трибологическая плёнка образуется потому, что при огибании магнитными линиями плоского диамагнитного контртела в центре рабочего образца формируется зона “магнитной пустоты” (рис. 1), то есть магнитные линии минимальной плотности, куда будут перемещаться диамагнитные составляющие. Так как эта зона, с механической точки зрения, окружена плоскостью трения, в ее пределах в поверхность трения будет втираться находящийся там диамагнетик, и поэтому рабочий образец характеризуется процессом восстановления в диапазоне 4,7–12 мкм/км. Направление

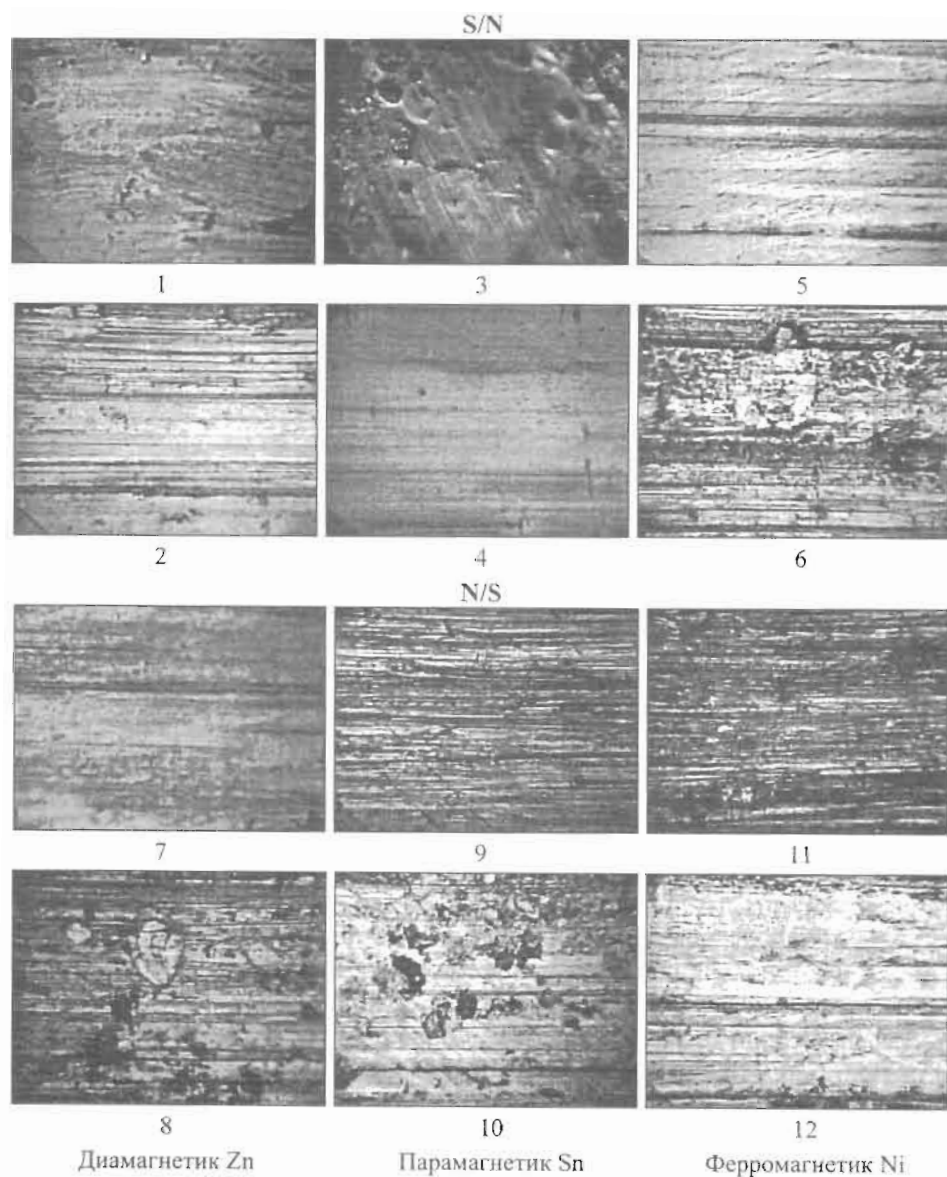


Рис. 4. Топографии поверхностей трения в магнитном поле

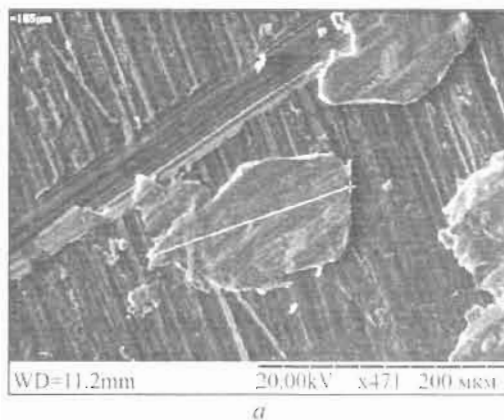
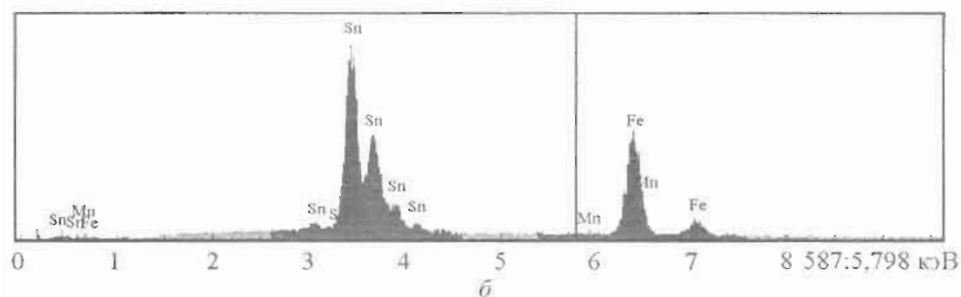


Рис. 5. Трибологические параметры модификатора олова в масле М10Г2к



движения частичек износа контртела и порошка цинка обеспечивается общим магнитным полем, которое проходит по внешней стороне контртела и собирается в образце, изгибаясь по его длине и вынося диамагнитный материал из зоны трения в сторону отрицательного градиента магнитных линий. Поэтому контртело имеет износ до 4 мкм/км при направлении S/N и 28 мкм/км — при N/S (рис. 4, фото 2, 8).

Направление поля определяет условия вырыва составляющих латуни контртела.

Модификация масла парамагнитным порошком (оловом) приводит к восстановлению поверхности рабочего образца (рис. 2), так как твердость олова значительно меньше закаленной стали 45 и уступает латуни. На поверхности трения происходит механическое растирание конгломератов порошка (рис. 5, а). Кроме того, магнитное поле втягивает его в более плотные слои магнитных линий, проходящих через плоскость трения в направлении S/N, обеспечивая присутствие порошка как на поверхности рабочего образца, так и на поверхности контртела.

Обратное направление осуществляет выход меди и цинка от контртела, в результате чего трибологическая система перемещается в область износа до $-3,8$ мкм/км (рис. 2). Топография поверхности трения характеризуется намазыванием конгломератов олова на поверхности образца (рис. 4, фото 4). Контртело же отличается гладкой поверхностью, то есть олово совместно с образцом истирают поверхность латуни равномерным слоем (рис. 4, фото 9), что сказывается на процессе изнашивания. Направление магнитного поля N/S (рис. 2) характеризуется восстановлением обеих поверхностей, так как магнитное поле действует в сторону контртела. Это означает, что олово принудительно прижимается к контртелу, а уже потом

перемещается на поверхность образца благодаря механической составляющей, образуя на поверхности рабочие пятна контакта (рис. 5, а) с большим содержанием олова (рис. 5, б).

Выводы

Разработана методика восстановления поверхностей трения в рабочей среде, модифицированной порошками разной магнитной природы в импульсном магнитном поле (ИМП).

Исследовано влияние ИМП на трибологические свойства пары трения в рабочей среде с нанопорошками разной магнитной природы и установлено, что поверхности наиболее работоспособны в условиях влияния ИМП S/N-направления.

Установлено, что при использовании электромагнитных технологий возможно управлять процессами восстановления и изнашивания при трении в зависимости от места расположения магнитных полюсов.

Установлена возможность восстановления в магнитном поле по отдельности (не разбирая механизм) как стального поршня, так и состоящего из медного сплава цилиндра.

Определена возможность управления процессами восстановления и изнашивания при трении в зависимости от места расположения магнитных полюсов с помощью электромагнитных технологий. Установлена возможность восстанавливать в магнитном поле по отдельности (не разбирая механизм) как стальной поршень, так и цилиндр, состоящий из медного сплава. Разработана методика восстановления поверхностей трения в рабочей среде, модифицированной порошками разной магнитной природы в импульсном магнитном поле. Исследовано влияние импульсного магнитного поля на трибологические свойства пары трения в рабочей среде с нанопорошками разной магнитной природы. Установлено, что поверхности наиболее функциональны в условиях влияния импульсного магнитного поля S/N-направления.

Ключевые слова: трение, масло, магнитное поле, порошок, рабочий образец, контртело, изнашивание, восстановление.

The paper considers the possibility to control the recovery and wear processes during friction depending on the location of magnetic poles using electromagnetic techniques. It is shown that both the steel piston and copper alloy cylinder can be recovered in the magnetic field separately (without disassembling the mechanism). A method is developed for recovering the friction surfaces in the working environment modified by different magnetic powders in the pulsed magnetic field. The influence of the pulsed magnetic field on the tribological characteristics of the friction pair in the working environment with different magnetic powders is analyzed to reveal that the surfaces are the most efficient under the S/N pulsed magnetic field.

Keywords: friction, oil, magnetic field, powder, sample, counterface, wear, recovery.

Список литературы

1. Костецкий Б. И. Надежность и долговечность машин / Б. И. Костецкий, И. Г. Новосовский, Л. И. Бершадский, А. К. Караулов; под ред. Б. И. Костецкого. – К.: Техника, 1975. – 408 с.
2. Евдокимов В. Д. Технология упрочнения машиностроительных материалов: учебное пособие-справ. / В. Д. Евдокимов, Л. П. Клименко, А. Н. Евдокимова; под ред. В. Д. Евдокимова: 2-е изд. – К.: ИД “Профессионал”, 2006. – 352 с.

3. *Гусейнов А. Г. оғлы*. Повышение работоспособности деталей машин и аппаратуры путем восстановления и упрочнения диффузионной металлизацией: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.08. – М., 2002. – 339 с.
4. *Джус Р. М.* Реологічні особливості авіаційних трибосистем при застосуванні технологій триботехнічного відновлення // Системи обробки інформації. – 2007. – Вип. 5, № 63. – С. 43–46.
5. *Костржицкий А. И.* Справочник оператора установок по нанесению покрытий в вакууме / А. И. Костржицкий, В. Ф. Карпов, М. П. Кабанченко, О. Н. Соловьёва. – М.: Машиностроение, 1991.
6. *Галей М. Т.* Изучение влияния магнитного поля на стойкость быстрорежущего инструмента // Станки и инструмент. – 1981. – № 4. – С. 31–32.
7. *Кошарская Л. В.* Влияние электромагнитных полей и высокоскоростного трения без смазки на микротвердость поверхностных и глубинных слоев сталей / Л. В. Кошарская, В. Д. Евдокимов // Тема. – 1999. – № 2. – С. 40–45.
8. *Малыгин Б. В.* Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 112 с.
9. *Бернштейн М. Л.* Термомагнитная обработка стали. – М.–Л.: Металлургия, 1968. – 96 с.
10. *Малыгин Б. В.* Магнитноупрочнение деталей горного и обогащительного производства // Уголь Украины. – 1987. – № 6. – С. 44–46.
11. *Малыгин Б. В.* Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. – М.: Машиностроение, 1989. – 112 с.
12. *Малыгин А. А.* Технологические модели повышения долговечности деталей машин. – К.: Техніка, 1984. – 286 с.
13. *Евдокимов В. Д.* Повышение износостойкости деталей машин фрикционно-магнитным методом / В. Д. Евдокимов, Л. В. Кошарская. – Одесса: Диол-Принт, 2005. – 200 с.
14. *Воробьева Г. А.* О структурных превращениях в металлах и сплавах под воздействием импульсной обработки / Г. А. Воробьева, А. Н. Иводитов, А. М. Сизов // Изв. АН СССР. Металлы. – 1991. – № 6. – С. 131–137.
15. *Дураченко А. М.* Влияние импульсной обработки на релаксационные спектры аморфных сплавов на основе железа и никеля / А. М. Дураченко, Е. Я. Малиночка // Там же. – 1985. – № 6. – С. 167–170.
16. *Пат. 45574 Україна* на корисну модель, МПК G01N 3/56. Пристрій для дослідження матеріалів на тертя та зношування при зворотньо-поступальному русі / М. М. Свирид, А. П. Кудрін, С. М. Задніпровська та ін.; заявл. 29.07.2009; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21.

Аэрокосмический институт
Национального авиационного университета, Киев

Статья поступила
19.12.2012