

М. Н. Свирид, канд. техн. наук, доц.,
И. А. Кравец, док. техн. наук, проф.,
С. Н. Заднепровская, асп.,
А. Ю. Сидоренко, канд. техн. наук, доц.,
Г. А. Волосович, канд. техн. наук, проф.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РЕВЕРСИВНОМ ТРЕНИИ В ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Национальный авиационный университет, E-mail: color7@ukr.net

Приведены результаты исследований материалов при реверсивном трении в импульсном магнитном поле. Исследовано влияние импульсного магнитного поля на трибологические свойства пары трения, установлены оптимальные параметры восстановления прецизионных пар трения.

Обзор исследований. В исследованиях [1] установлено, что магнитные поля (МП) с индукцией 1–10 Тл могут вызывать в диамагнитных диэлектрических кристаллах и полимерах долговременные остаточные изменения их пластических свойств. Работы [2; 3] объясняют это влиянием МП на кинетику и выход спин-зависимых реакций в подсистеме парамагнитных структурных дефектов, которые влияют на подвижность дислокаций.

Магнитопластический эффект впервые был обнаружен в 1985 г. в Институте кристаллографии РАН группой профессора В.И. Альшица [4]. Эффект заключается в смещении нововведенных краевых дислокаций в кристаллах NaCl, помещенных в постоянный магнит или электромагнит с индукцией до 1 Тл, также в кристаллах наблюдалось изменение пробега дислокаций и микротвердости.

Магнитопластический эффект может быть использован при:

- управлении пластическими свойствами материалов в процессе их штамповки,ковки и других формообразующих процессов;
- иницировании релаксации внутренних механических напряжений в тех материалах, где термически стимулированная релаксация невозможна;

– создании новых методов исследования элементарных актов пластической деформации на электронно-спиновом уровне [5].

Наибольшую сложность для экспериментаторов представляло изучение влияния МП на пластичность металлов. Первые исследования проведены на Cu, Al, Ag [6; 7].

Авторы [8] установили экспериментально, что обработка кристаллов C_{60} в импульсном (однополупериодная синусоида) МП уменьшает микротвердость образцов, а обработка в постоянном магнитном поле не приводит к изменению микротвердости образцов. Причиной изменения микротвердости может быть движение дислокаций. Таким образом, авторы обнаружили магнитоэластический эффект в кристаллах C_{60} при обработке в импульсном МП.

Магнитное поле также оказывает влияние на дислокации и их стопоры, что может привести к ускоренному массопереносу по дислокационному или дислокационно-диффузионному механизму. Этот эффект наблюдается в переменном МП и отсутствует при воздействии на образец постоянным МП [9].

При наложении импульсного магнитного поля (ИМП) происходит перемагничивание образца [10] и изменяется период доменной структуры. Таким образом, доменные границы, которые двигаются при намагничивании, активно взаимодействуют с дислокациями, что приводит к более эффективному массопереносу. Это взаимодействие носит магнитоупругий характер и может играть роль при повышенных температурах, когда атомные перемещения интенсивнее и среда диффузии сохраняется ферромагнитной.

Цель работы: исследовать образование трибологических плёнок под действием импульсного МП:

- при однополупериодном сигнале электрического тока на МП и прерыванием сигнала с частотой 6,25; 12,5; 25 и 50 Гц;
- при выпрямленном сигнале электрического тока на МП и соответственно прерыванием сигнала с частотой 6,25; 12,5; 25 и 50 Гц;
- исследовать топографии поверхностей, определить оптимальный режим работы пары трения.

Материалы и методика исследований. Исследования проводились на трибологической установке (рис. 1), которая состоит

из источника питания, осциллографа, прерывателя, амперметра для регистрации тока в зоне трения, амперметра для регистрации тока, проходящего через магнитопровод, катушки индуктивности, емкости для рабочей среды, емкости для рабочей среды, нагрузки, узла трения [11].

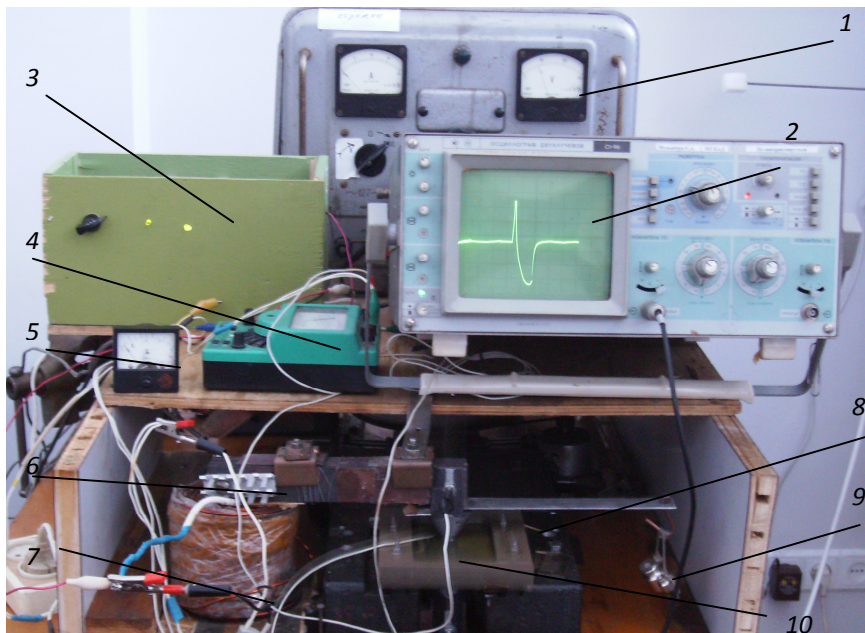


Рис. 1. Установка для исследования материалов на трение и износ при реверсивном трении в магнитном поле: 1 – источник питания; 2 – осциллограф; 3 – прерыватель; 4 – амперметр для регистрации тока в зоне трения; 5 – амперметр для регистрации МП; 6 – магнитопровод; 7 – катушка индуктивности; 8 – емкость для рабочей среды; 9 – нагрузка; 10 – узел трения

Направление магнитного поля задавали с помощью диодов $VD1$ и $VD2$ в соответствии схемы на рис. 2, при этом необходимо было изменять позицию прерывателя. Контакты 1 и 2 контролировали положение прерывателя при проведении эксперимента. Если прерыватель расположен в позиции 1, то катушкой индуктивности создается магнитное поле N/S, а прерыватель позволял подавать импульс тока на катушку с частотой 6,25 – 25 Гц. При расположении прерывателя в позиции 2

создавалось магнитное поле с направлением S/N и также регулировался электрический ток с частотой 6,25 – 25 Гц.

Характер сигнала показан на рис. 3, а. Несущая частота составляет 50 Гц сетевого напряжения, а огибающая частота прерывателя в зависимости от поставленной задачи 6,25 – 25 Гц.

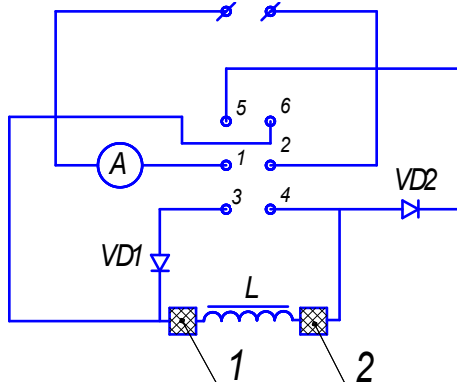


Рис. 2. Электрическая схема подключения установки: 1 – расположение прерывателя для создания МП с направлением N/S; 2 – расположение прерывателя для создания МП с направлением S/N

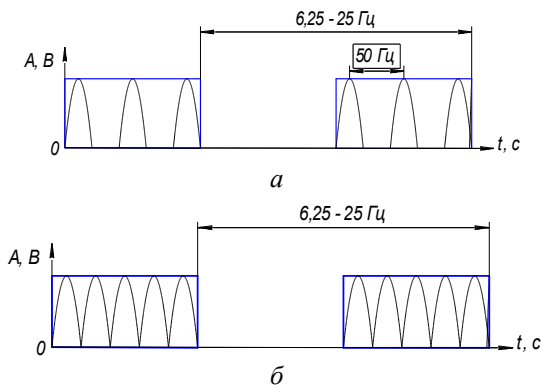


Рис. 3. Частота импульсного тока: а – импульсный однополупериодный ток; б – импульсный выпрямленный ток

Для исследования использовали образцы, близкие по механическим и химическим свойствам к материалам плунжерной пары насоса. Так, рабочий образец, изготовленный из стали 65Г, имел форму цилиндра диаметром 4 мм и длиной 33 мм, закаленный

на мартенсит. Контртело представляло собой пластину из латуни ЛС59-1 размерами 20×50×2 мм. Рабочей средой служило масло М10Г2к, в качестве материала восстановителя в зону трения добавлялся парамагнитный порошок олова. Исследования проводили на скорости трения 0,12 м/с при реверсивном движении пары трения. Нормальную нагрузку на рабочий образец задавали до 3,5 МПа. Магнитное поле носило импульсный характер с величиной магнитной индукции до 110 мТл.

Результаты исследований. Контактная характеристика материалов в процессе трения значительно отражается на эксплуатационных параметрах механизма и учитывать её невозможно [12]. Санкционированное управление перемещением элементов в процессе трения становится актуальной задачей. Для определения условий изнашивания и изменения состояния поверхностей пары трения в ИМП проведены исследования с направлением поля в сторону образца S/N. Импульсная раскачка кристаллической решётки приносит успех в деформации металла [6; 7; 8], но интерес представляет выпрямленное действие МП на деформированную поверхность трения. Для этого изменяем направление тока параллельным подключением к катушке магнитопровода диода. Это позволило отрезать нижнюю полуволну сигнала (рис. 3, б), что в свою очередь, генерировало импульсное МП, направленное в одну сторону.

Такое решение способствовало интенсификации процессов пластической деформации на поверхности трения.

Результаты испытаний на трение стали 65Г по ЛС59-1 в моторном масле М10Г2к представлены на графиках рис. 4, а (ИМП создается согласно рис. 3, а) и рис. 4, б (характер сигнала показан на рис. 3, б). Кривые 3 и 4 характеризуют пару трения (рис. 4, а), с однопериодным сигналом, где виден суммарный износ, что достигает от 7 мкм при импульсе прерывания 6,25 Гц и более 10 мкм при 25 Гц.

Процессы трения в выпрямленном ИМП (см. рис. 3, б) сужают суммарный износ до положительных значений при прерывании с частотой 6,25 Гц, т.е. поверхности восстанавливаются за счёт образования плотных трибоплёнок из состава продуктов износа обоих образцов и химическим взаимодействием составляющих масла. Деформационные процессы при импульсном воздействии прерывателя с частотой 6,25 Гц

активно влияют на кристаллические решётки металлов, активизируя процессы окисления в среде масла. Дальнейшее повышение частоты прерывания снижает эффективность процесса, восстанавливая рабочий образец и доводя суммарный износ до нуля (рис. 4, б кривые 3, 4). Характерные топографии поверхностей трения при переменном воздействии несущей частоты показаны на рис. 5, а и б), где видны окисные плёнки, которые в свою очередь активно разрушаются при трении и уносятся из зоны контакта. Выпрямленное воздействие ИМП значительно уменьшает образование окислов.

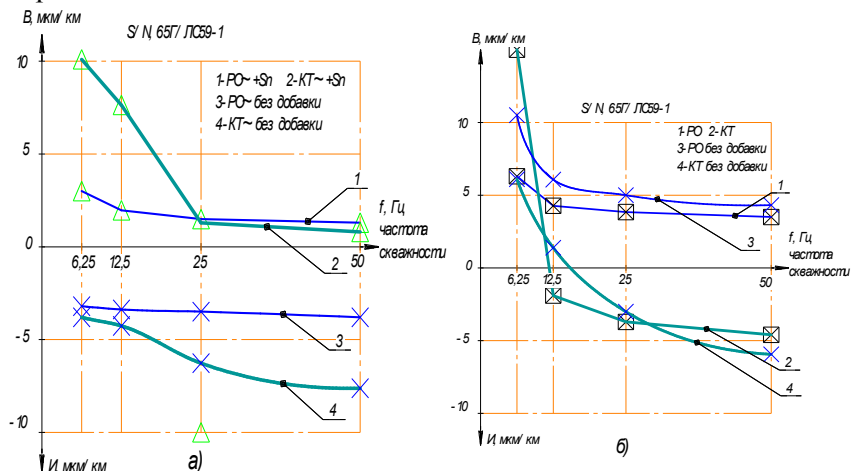


Рис. 4. Графики зависимости износа (восстановления) от частоты прерывания тока при направлении магнитного поля S/N: а – при однополупериодном сигнале электрического тока (см. рис. 3, а); б – при выпрямленном сигнале переменного электрического тока (см. рис. 3, б)

Очевидно, это происходит за счёт более активного вытеснения кислорода из зоны трения, так как активный окислитель элемент диамагнитного происхождения, который в МП смещается в сторону отрицательного градиента действия силовых магнитных линий. Характер поверхности трения показан на рис. 5, в и г.

При добавлении модификатора – парамагнитного порошка олова – наблюдается существенное смещение системы в сторону уменьшения энтропии. Это видно по уменьшению износа как каждого образца в отдельности, так и суммарного износа (см. рис. 4, а кривая 1 – РО и 2 – КТ). Обе кривые сместились в зону восстановления на

частоте прерывании 6,25 Гц, что свидетельствует об активации деформации поверхностей трения, при которой налипает порошок на обе поверхности (см. рис. 6, в и г), особенно на КТ. При условии воздействия выпрямленным ИМП, характер сигнала (см. рис. 3, б), образуются тонкие пленки модифицированного порошка на ферромагнетике – РО (рис. 6, в). На КТ также осаджается олово, тем самым ускоряя процесс восстановления. Поверхность КТ более шероховата, но полученное олово устраняет эти недостатки (рис. 6, г). Повышение частоты прерывания нивелирует активность деформационных составляющих системы трения.

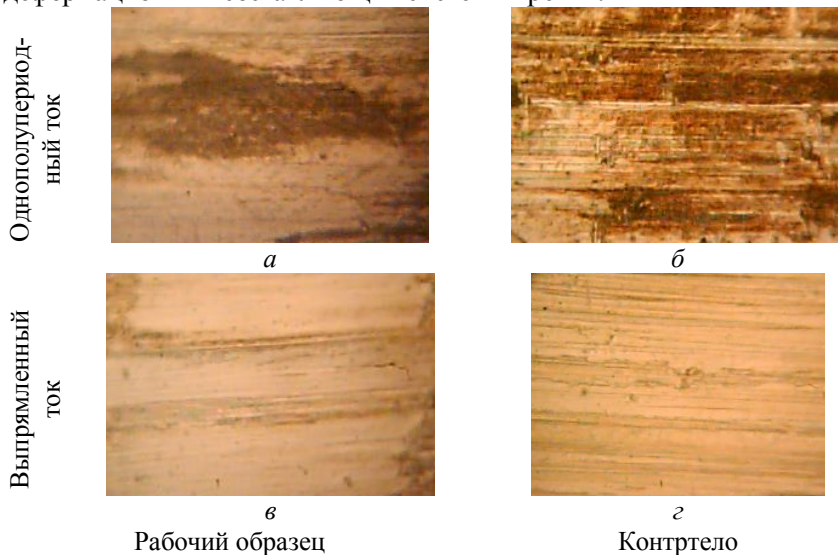


Рис. 5. Топографии поверхностей в среде масла М10Г2к при направлении ИМП S/N

Изменение направления ИМП на N/S смещает процесс перемещения продуктов износа от РО в направлении к КТ. Такой механизм продиктован направлением силовых линий в зазоре магнитопровода (см. рис. 1 позиция б). Направление МП в сторону КТ указывает на участие ферромагнитных частичек в механизме абразивного изнашивания, так как они остаются в зоне действия МП, и активно царапают более мягкий материал КТ. После этого продукты износа латуни – диамагнитного материала – выносятся МП за пределы зоны трения, отчего увеличивается износ КТ. Из

представленного графика (рис. 7, а) видим, что все кривые опустились вниз, что указывает на повышение износа. Кривые 3 и 4 чётко коррелируются топографией поверхности, где видны следы износа на КТ и образование трибологических плёнок на поверхности трения РО (рис. 8, а и б).

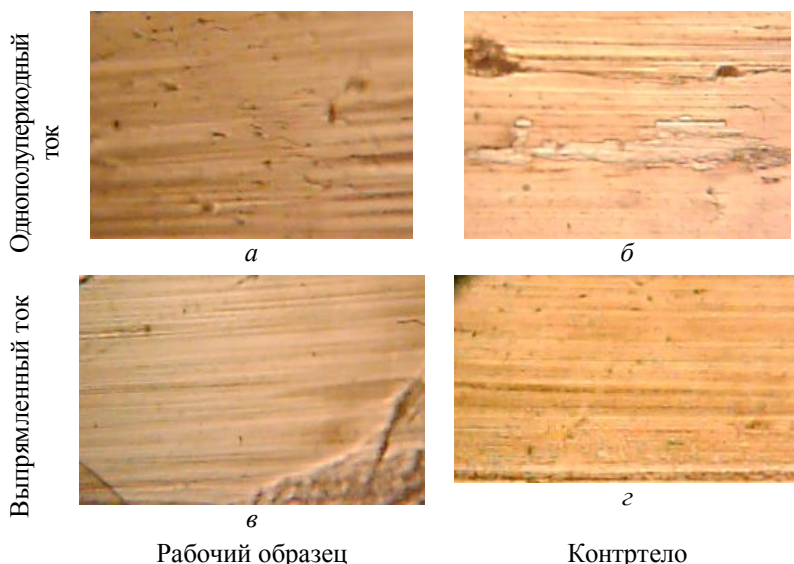


Рис. 6. Топографии поверхностей трения с добавлением модифицирующего порошка олова при направлении ИМП S/N

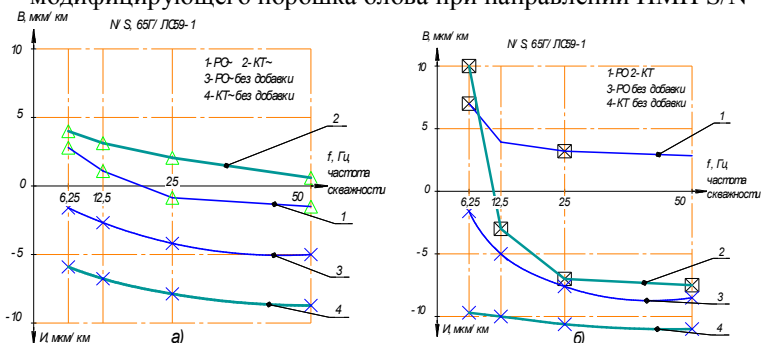


Рис. 7. Графики зависимости износа (восстановления) от частоты прерывания при направлении магнитного поля N/S: а – при однополупериодном сигнале электрического тока (см. рис. 3, а); б – при выпрямленном сигнале электрического тока (см. рис. 3, б)

На графике (см. рис. 7, б) кривые 3 – РО и 4 – КТ указывают на значительное увеличение износа, к механизму которого добавляется деформационная составляющая, которая провоцирует окисление поверхности с образованием крупных трибологических плёнок (рис. 8, в, и г) как РО, так и КТ.

Характер топографии поверхности трения показан на рис. 8, в и г. Если принять, что выпрямленное ИМП активно влияет на деформационную составляющую, отчего разрыхляется поверхность, то это приведет к увеличению износа (кривая 3 и 4 рис. 7, б).

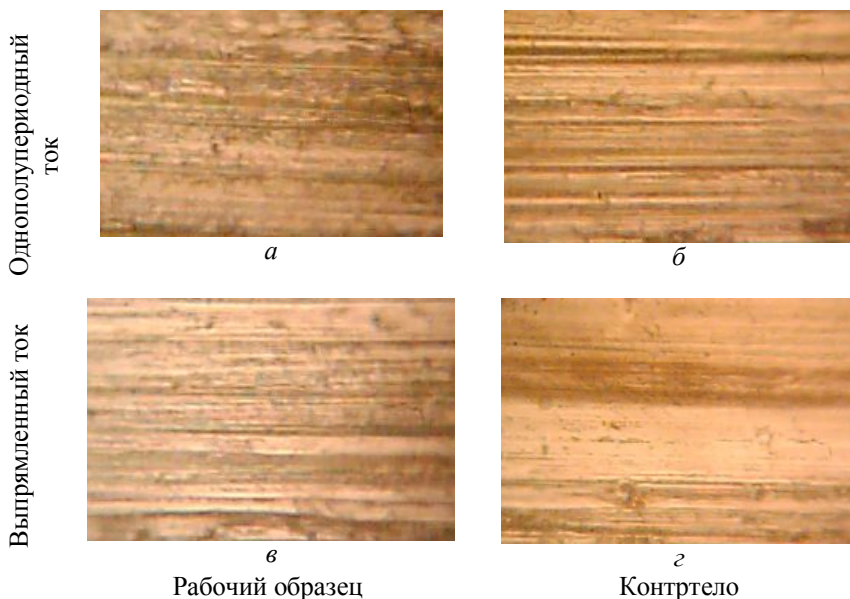


Рис. 8. Топографии поверхностей в среде масла М10Г2к при направлении ИМП N/S

Добавка парамагнитного порошка увеличивает механическую составляющую, которая заключается в смещении парамагнетика в сторону положительного градиента МП с дальнейшим размазыванием его по поверхностям трения. Добавка олова в зону трения при воздействии однонаправленной несущей с прерыванием сигнала с частотой 6,25 Гц МП значительно увеличивает противостояние износу. Такие процессы происходят за счёт парамагнитных свойств, к которым добавляется

деформация поверхности трения, что увеличивает диффузию внешних составляющих в поверхность трения. На рис. 9, *а* и *б* видны пленки прилипшего олова, что свидетельствует о наличии на поверхности трения размазанного порошка олова, что указывает на процесс восстановления поверхностей (см. рис. 7, *а*, кривые 1 и 2).

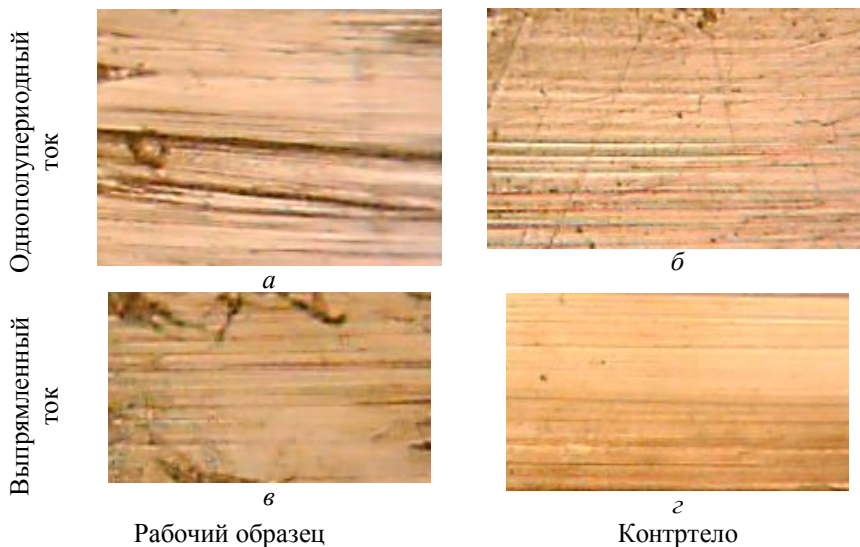


Рис. 9. Топографии поверхностей с модифицирующим порошком олова при направлении ИМП N/S

Условия трения стали по латуни под действием однонаправленного ИМП с добавкой олова характеризуются процессом восстановления ферромагнетика 65Г и износом диамагнитного материала ЛС59-1. Механизм двойственности объясняется выбиванием диамагнитной составляющей (меди и цинка) из состава латуни, а парамагнитное олово намазывается на сталь.

Выводы

1. Исследовано влияние ИМП на трибологические свойства пары трения и установлено, что поверхности наиболее работоспособны в условиях выпрямленного сигнала электрического тока на ИМП. При данных параметрах внешнего источника образуются обеднённые кислородом трибологические плёнки.

2. Определено, что при выпрямленном сигнале МП и импульсном прерывании с частотой 6,25 Гц трибосистема восстанавливается, при этом используя элементы порошка восстановителя и рабочей среды.

3. Установлено, что расположение поверхности трения у полюса S/N при реверсивном движении образцов является предпочтительным направлением МП для восстановления.

Список литературы

1. *Yu.I. Golovin and R.V. Chem. Rev.*, 24, 1 (1998).
2. *M.I. Molotskii, R.E. Kris and V.N. Fleurov, Phys. Rev. B*51, 12531 (1995).
3. *В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, О.Л. Казакова, ЖЭТФ* 111, 615 (1997).
4. *Альшиц В.И., Даринская Е.В., Перекалина Т.М. Урусовская А.А. ФТТ*, 1987, т. 29, № 2, с. 467–470.
5. *Р.Б. Моргунов. Спин-зависимые реакции между дефектами структуры и их влияние на пластичность кристаллов в магнитном поле. (Аналитический обзор) // Вестник РФФИ. – №2, 2003.*
6. *Galligan J.M., Lin T.H., Pang C.S. Phys. Rev.Lett.*, 1977, v. 38, № 8, p. 405–407.
7. *Galligan J.M., Pang C.S. Appl. Phys.* 1979, v.50, № 10, p. 6253–6256.
8. *Ю.А. Осипьян, Ю.И. Головин, Д.В. Лопатин, Р.Б. Моргунов, Р.К. Николаев, С.З. Шмурак. Влияние импульсного магнитного поля на микротвердость монокристаллов C₆₀. // Письма в ЖЭТФ, том 69, вып.2, 1999г. –С.110–113.*
9. *Бойко Ю.И., Клиничук Ю.И., Куц В.М. и др. // Порошковая металлургия. 1989. № 12. –С. 14–18.*
10. *М.А. Вержасковская, С.С. Петров, А.В. Покоев. Влияние импульсного магнитного поля низкой частоты на диффузию Al и плотность дислокаций в Fe // Вісник Черкаського національного університету. 2007. Випуск 117. Серія «Фізико-математичні науки». –С. 81–86.*
11. *Патент на корисну модель № 45574, МПК G01N 3/56. Пристрій для дослідження матеріалів на тертя та зношування при зворотно-поступальному русі / Свирід М.М., Кудрін А.П., Задніпровська С.М., Ловейко М.Г., Морозова І.В. Заявлено 29.07.2009; Опубл. 10.11.2009, Бюл. № 21.*
12. *Особливості фізико-хімічних процесів між металевими поверхнями тертя В.В. Широков, О. Білоус. // Фізика і хімія твердого тіла. Т. 11, № 1 (2010) –С. 214–220.*

Свирид М.М., Кравець І.А., Задніпровська С.М., Сидоренко О.Ю., Волосович Г.А. Дослідження матеріалів при реверсивному терті в імпульсному магнітному полі // Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2010. – Вип. 53. – С.147–158.

Наведено результати досліджень матеріалів при реверсивному терті в імпульсному магнітному полі. Досліджено вплив імпульсного магнітного поля на трибологічні властивості пари тертя, встановлено оптимальні параметри відновлення прецизійних пар тертя.

Рис. 9, список літ.: 12 найм.

The research of materials at a reversible friction in the impuls magnetic field

The results of researches of materials at a reversible friction in the impuls magnetic field are resulted in the article. The influence of impuls magnetic field on tribological properties of friction pair is researched; the optimum parameters of renewal of precision pair of friction are set.

Стаття надійшла до редакції 26.05.10