

*И. А. Кравец, д-р техн. наук, проф.,
М. Н. Свирид, канд. техн. наук, доц.,
О. Н. Белас, д-р техн. наук, старш. науч. сотруд.,
Г. А. Волосович, канд. техн. наук, проф.,
В. Н. Бородий, старш. препод.*

К ГИПОТЕЗЕ О СОСТОЯНИИ УЗЛА ТРЕНИЯ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Национальный авиационный университет, e-mail: svirid_mn@ukr.net

Рассматривается гипотеза о состоянии трибосистемы в условиях воздействия энергии магнитного поля на зону контакта. Определено влияние направления магнитного поля на изнашивание стали 45 в модельной паре. Установлен механизм работы элементов в паре трения диамагнетик – ферромагнетик. Установлены условия образования безкислородных поверхностных плёнок на элементах узла трения.

Введение. Технический прогресс постоянно расширяет номенклатуру деталей гидравлических и масляных систем, которые требуют существенного повышения ресурса и надёжной работы. Состояние силовых перекачивающих агрегатов связано с надёжной работой трибологической пары, которая определяет способность удерживать рабочие параметры, заданные требованиями технической документации (давление, расход и др).

Традиционные пути восстановления деталей трибопары связаны с демонтажем, нанесением покрытия, обработкой и монтажом всего агрегата, что финансово затратно и достаточно длительно. Поэтому разработка новых подходов и технологий восстановления является актуальной задачей.

Началом разработки технологических приёмов восстановления сопряжений трибосистемы является гипотеза, основанная на теоретических представлениях о зависимостях законов трения в смазывающих жидкостях под действием энергетической составляющей.

Гипотеза, как правило, строится на основе ряда подтверждающих её наблюдений. Выдвижение гипотезы о влиянии внешнего энергетического источника, магнитного поля, на зону трения исходили из научных постулатов о магнетизме, как одного из наименее изученных направлений в теории трибологии.

Влияние магнитного поля (МП) как внешнего воздействия воспринимают практически все существующие материалы, особенно это относится к таким, которые имеют в своем составе заряженные частицы.

Согласно гипотезе, предлагается игнорировать параметр электросопротивления среды, при этом используя магнитное поле как транспорт для перемещения материальных частиц. Осаждение материала всегда проходит на энергетически разбалансированные поверхности, имеющие нестабильную структуру. Совместное действие трибологических процессов и внешних энергетических воздействий сопровождается активным перемещением материала на поверхности трения. Способность атома отдавать или присоединять электроны характеризуется величинами энергий ионизации, сродства к электрону, а в составе молекулы – относительной электроотрицательностью (ЭО) атома. Чем больше электроотрицательность, тем сильнее выражены у элемента неметаллические свойства и окислительная способность. При снижении электроотрицательности элемент обладает выраженными металлическими свойствами и высокой восстановительной способностью.

В невозбужденном состоянии электроны в атоме распределяются таким образом, чтобы суммарная энергия их была минимальна. По правилу Гунда, в целом, последовательность заполнения электронами атомных орбиталей подчиняется стремлению системы к минимуму энергии. В случае металлической связи невозможно говорить о направленности этой связи, так как общие электроны делокализованы равномерно по всему кристаллу, что обеспечивает электропроводность, теплопроводность и ковкость.

В системах с химическими реакциями мерой пересыщения служит отклонение произведения давлений или концентраций компонент от точки насыщения, что характеризуют константы равновесия. Таким образом, изменение внешних факторов провоцирует энергетические изменения в строении материала.

По утверждению некоторых исследователей, электрон является источником магнетизма [1]. То есть, электрон – магнитозависимая микрочастица элемента, и, чтобы получить представление о магнитных свойствах тела, необходимо изучить его поведение под действием магнитных сил. Элементарной частицей магнитных зарядов считается магнитный диполь.

Орбитальное движение электрона определяется тремя квантовыми числами:

1. Главное квантовое число (n) определяет общую энергию электрона на данной орбитали. Совокупность орбиталей, имеющих одинаковое значение главного квантового числа, называют энергетическим уровнем. Совокупность электронов, находящихся на одном энергетическом уровне, образуют энергетический слой;

2. Существенное различие в энергетическом состоянии электронов, отражается побочным (орбитальным) квантовым числом (l);

3. Движение электрона по замкнутой орбите вызывает появление магнитного поля. Состояние электрона, обусловленное орбитальным магнитным моментом, характеризуется третьим квантовым числом (m_l). Это квантовое число определяет ориентацию орбитали в пространстве, выражая проекцию орбитального момента импульса на направление магнитного поля. Магнитное квантовое число m_l может принимать значения любых целых чисел, как положительных, так и отрицательных. Таким образом, квантовое число m_l характеризует число ориентаций электронного облака в пространстве.

В твердом теле области энергии, которыми обладает электрон (разрешенные зоны), чередуются с интервалами энергии, которые электрон не может преодолеть (запрещенные зоны). Электроны заполняют энергетические уровни от нулевого до некоторого максимального. Переход электронов в металле возможен на незаполненные энергетические уровни.

Таким образом, для перехода составляющих материалов на высшие подуровни и уровни требуется вмешательство внешней энергии.

Теоретической целью работы является поиск обоснования гипотезы, которая объясняет изменения внутреннего строения материалов в период нестабильного состояния поверхностей трения под воздействием внешнего источника энергии – магнитного поля.

Узел трения состоит из двух перемещающихся друг относительно друга элементов, имеющих границу раздела с различными по магнитным свойствам материалами. Таким образом, определено наличие переходного слоя или границы определяющей изменения свойств между материалами. При переходе через границу раздела двух магнетиков с различными магнитными проницаемостями μ_1 и μ_2 силовые линии магнитного поля испытывают преломление

(рис.1). Для того, чтобы выяснить, как происходит преломление линий поля необходимо установить для его нормальных и тангенциальных составляющих граничные условия. Вывод граничных условий для магнитного поля аналогичен выводу граничных условий для электрического поля и основывается на применении основных теорем магнитостатики – теоремы Гаусса и теоремы о циркуляции магнитного поля.

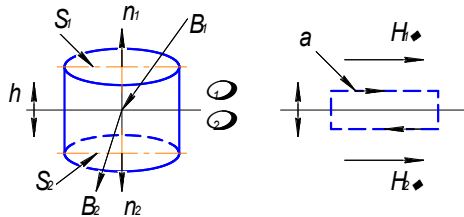


Рис. 1. К выводу граничных условий для магнитного поля

Для нормальных составляющих индукции B теорема Гаусса дает (рис. 1):

$$B_{n2}S_2 - B_{n1}S_1 = 0, \quad (1)$$

где $S_1 = S_2$.

Поток индукции поля через боковую поверхность цилиндра при $h \rightarrow 0$ (переход к пограничному слою) чрезвычайно мал и им можно пренебречь. Следовательно, при переходе через границу раздела двух магнетиков (если они однородны) нормальные составляющие индукции магнитного поля непрерывны:

$$B_{n1} = B_{n2}. \quad (2)$$

Считается, что на границе раздела магнетиков не протекают поверхностные токи ($I=0$). Поэтому, согласно теореме о циркуляции поля (рис.1), будем иметь тангенциальные составляющие напряженности магнитного поля:

$$H_{t1}a_1 - H_{t2}a_2 = 0, \quad (3)$$

где $a_1 = a_2 = a$.

Составляющие циркуляции поля по коротким сторонам контура обхода границы при $h \rightarrow 0$ (стягивание к границе) исчезают. Таким образом, приходим к выводу, что при переходе через границу раздела двух однородных магнетиков тангенциальные составляющие напряженности магнитного поля непрерывны:

$$H_{t1} = H_{t2} \quad (4)$$

Для построения картины преломления силовых линий поля на границе раздела двух магнетиков к полученным граничным условиям необходимо присоединить условия, вытекающие из материального уравнения, связывающего векторы B и H :

$$\mu_2 B_{t1} = \mu_1 B_{t2} \quad (5)$$

$$\mu_1 H_{n1} = \mu_2 H_{n2} \quad (6)$$

Тем самым, задача о преломлении линий поля полностью решается.

Геометрия магнитных линий характеризует параметры перемещения продуктов износа в пространстве действия МП, диамагнетики выталкиваются в сторону уменьшения градиента МП, а ферромагнетики и парамагнетики втягиваются.

Таким образом, на механизм трения и перераспределения продуктов износа будет активно влиять расположение плоскости трения в пространстве магнитных линий.

Под действием внешнего магнитного поля проходит прецессия электронных орбит с одинаковой для всех электронов угловой скоростью ωL . Обусловленное этой прецессией, дополнительное движение электронов приводит к возникновению индуцированного магнитного момента атома, направленного против поля, то есть – к диамагнетизму. Заметим, что диамагнетизм присущ всем без исключения веществам, но обнаруживается он лишь у тех веществ, атомы которых не обладают собственным магнитным моментом. В противном случае, результирующий магнитный момент атома оказывается положительным, и вещество ведет себя уже как парамагнетик. При нагревании ферромагнетика из-за хаотического теплового движения атомов спонтанная намагниченность уменьшается и при достижении определённой температуры (точки Кюри) обращается в ноль. Выше этой температуры ферромагнетик превращается в парамагнетик.

Время запаздывания образования магнитной индукции в магнитопроводе $\tau = \frac{R}{L}$ называется в этом случае временем релаксации (восстановления).

Учитывая, что объём магнитного поля характеризуется объёмом материала образца (сталь 45), энергия магнитного поля принимает вид:

$$W_B = \frac{1}{2} \mu \mu_0 H^2 V = \frac{1}{2} (BH) V . \quad (7)$$

Плотность энергии магнитного поля получим, разделив это выражение на объём V , занятый полем:

$$w_B = \frac{1}{2} \mu_0 \mu H^2 = \frac{1}{2} (BH) . \quad (8)$$

Если магнитное поле неоднородно, то, чтобы найти энергию поля в некотором объеме V , нужно взять интеграл:

$$W_B = \int_V w_B dV . \quad (9)$$

При протекании процессов трения, по местам ФПК, в неоднородном поле необходимо учитывать плотность магнитной энергии действующей на площадь контакта, прохождения её через границу раздела образец – контртело, отличающиеся магнитной проницаемостью образца $\mu_{обр}$ и контртела $\mu_{кт}$. Силовые линии магнитного поля испытывают преломление (рис. 1), в итоге, изменяется их конфигурация, которое отразится на смещении продуктов износа: диамагнитные в сторону отрицательного, а парамагнитные к положительному градиенту МП.

Теоретические исследования позволили разработать технологию восстановления прецизионных пар трения маслонасосов, используя жидкости с высоким электросопротивлением.

Технологическая схема трения палец – плоскость, построена таким образом, чтобы магнитные линии пересекали зону трения перпендикулярно [2], проходя через полюса МП и тело образца. В процессе исследований ферромагнитный образец располагали в трёх зонах действия МП. Поэтому в каждой из зон действовало различное направление МП, что, естественно, сказывалось на механизме образования поверхностных плёнок при трении.

Для проведения исследований использовали постоянный магнит с магнитной индукцией 0,15 Тл. Образцы изготавливали из стали 45 (М), контртело – сплав на основе меди ЛС59-1. Рабочая жидкость – мо-

торное масло М10Г2к, применяемое в ДВС. Смазывающее поверхностно-активное вещество – ПЭГ-400. Схема трения палец-плоскость.

Были поставлены следующие задачи:

– разработать методику восстановления пары трения, воздействуя магнитным полем на зону раздела материалов и используя полярную направленность магнитных линий;

– установить влияние МП на состояние узла трения в смазывающей среде. Определить параметры существования репарации на поверхности трения в токонепроводящих масляных средах.

В маслосистемах подвижного транспорта используется отечественное стандартное моторное масло М10Г₂, применяемое в высокофорсированных карбюраторных двигателях и высокофорсированных дизелях без наддува. Учитывая, что медь и цинк – металлы диамагнитного происхождения, их поведение в магнитном поле подчиняется физическим законам, на основании которых диамагнитные материалы, расположенные между полюсами, выталкиваются из зоны действия однородной постоянной магнитной силы.

Результаты трибологических исследований по схеме палец-плоскость в направленном силовом поле постоянного магнита показали, что против полюса *N* магнита (рис. 2), наблюдается условие трибовосстановления стали 45 в моторном масле М10Г₂. Это выражается в увеличении линейного размера образца и появлении на его поверхности элементов, входящих в состав латуни. Процесс накопления продуктов износа проходит до определённой толщины плёнки (порядка 1...2 мкм), после чего плёнки уносятся из зоны контакта. Затем проходит образование новых плёнок, периодичностью 15–20 минут. Далее, длительность процесса образования и уноса плёнок увеличивается в два раза. Изменение направления магнитного поля влияет на характер топографии поверхности трения.

При расположении стального образца против полюса *N* поверхность трения характеризуется гладкой топографией (рис. 3, *a*), по сравнению с расположением против полюса *S* и между полюсами *N-S*.

Таким образом, формирование поверхностного слоя связано с удержанием продуктов износа, как силами магнитного поля, так и значительной вязкостью смазочной среды. Показания профиллографа указывает на высокую чистоту поверхности (*Ra* 0,8).

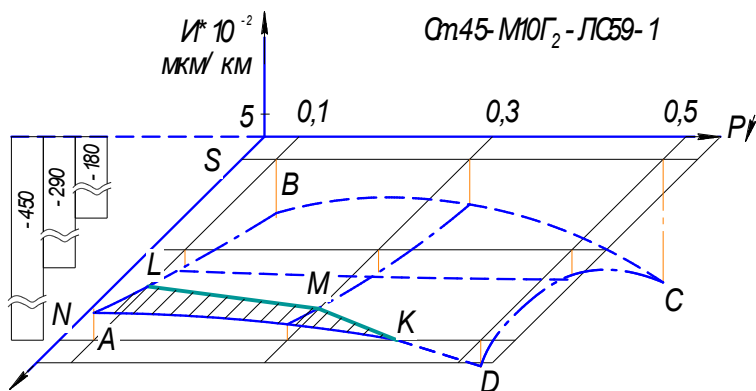


Рис. 2. Износ и режим восстановления поверхности трения стали 45 по контртелу ЛС59-1 в среде масла М10Г₂ в магнитном поле в зависимости от нормальной нагрузки P (кг), и направленного действия магнитного поля

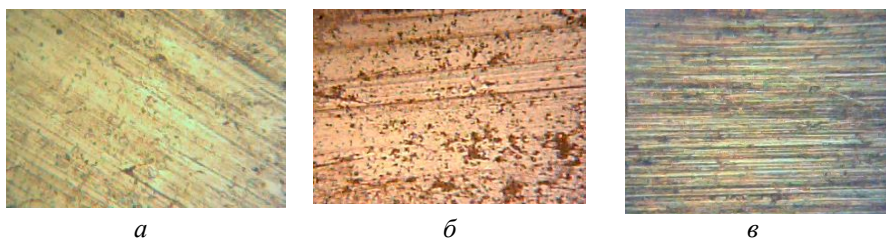


Рис. 3. Топография поверхности Стали 45 при трении по ЛС59-1 под воздействием магнитного поля с различным направлением магнитных линий в среде масла М10Г₂ при $P=1$ МПа, $V=0,1$ м/с, при расположении образца, $\times 90$: a – против полюса N , $\times 90$; b – между полюсами N - S , $\times 90$; v – против полюса S .

При нормальной нагрузке $P = 1$ МПа на поверхности образца видны следы замазанных участков с нанесённым материалом в виде тонкого слоя масла и тонкодисперстного порошка, образованного при трении поверхностей (результаты получены в динамике).

Поскольку магнитные линии располагались перпендикулярно к плоскости трения в направлении от полюса N через плоскость медного образца, огибая его и создавая краевой эффект, то характер взаимодействия соответствует механизму гидродинамической смазки (рис. 3, a), где продукты износа плотно прилипают к краям поверхности ферромагнитного образца. Под действием внешнего

магнитного поля в зоне трения продукты износа попадают между плоскостями образцов, втираясь в поверхность, залечивая трещины и грубые неровности на поверхности.

При расположении образца между полюсами, чистота поверхности зависит от наличия продуктов износа диамагнитного материала – латуни (меди и цинка), частицы которого втягиваются в поток магнитных линий, где последние, в свою очередь, размазываются по поверхности трения, в виде конгломератов (рис. 3, б). В процессе трения происходит залечивание дефектов на поверхности материалов образованием поверхностных защитных плёнок.

Помещение образца против полюса *S* характеризуется иными параметрами: повышение износа, увеличение коэффициента трения до 0,15 (против полюса *N* – 0,07...0,09). Топография поверхности трения показана на рис. 3, в. Поверхность характеризуется образованием тонких плёнок с характерной мелкой волнистостью. На поверхности наблюдаются срывы плёнки и образование чешуек из продуктов износа, присутствие которых увеличивает износ материала.

Основная причина увеличения износа латунного контртела – это перемещение продуктов износа стали, фракцией более 4 мкм, которые попадают с фронтальной стороны к направлению перемещения, по поверхности ЛС59-1.

Условия трибовостановления сопряженных пар трения в поверхностно-активной жидкости ПЭГ-400 под действием магнитного поля характеризуются изменением топографии поверхности с учётом влияния электрохимической составляющей в растворе с водой. Для моделирования агрегата маслосистемы использовали пару трения: сталь 45 со структурой мартенсита (образец) – латунь ЛС59-1 (контртело). Технология восстановления поверхностей прецизионных пар с помощью вспомогательной среды заключается в замене рабочей жидкости (масла или гидрожидкости) на полиэтиленгликоль ПЭГ-400.

Применение ПЭГ для восстановления узлов трения обуславливается его электрохимическими и антифрикционными свойствами. На основании трибологических параметров (рис. 4.) показано, что в позиции образца, расположенного против магнитного полюса *N*, поверхности пар трения находятся в состоянии репарации, т.е. увеличивается масса.

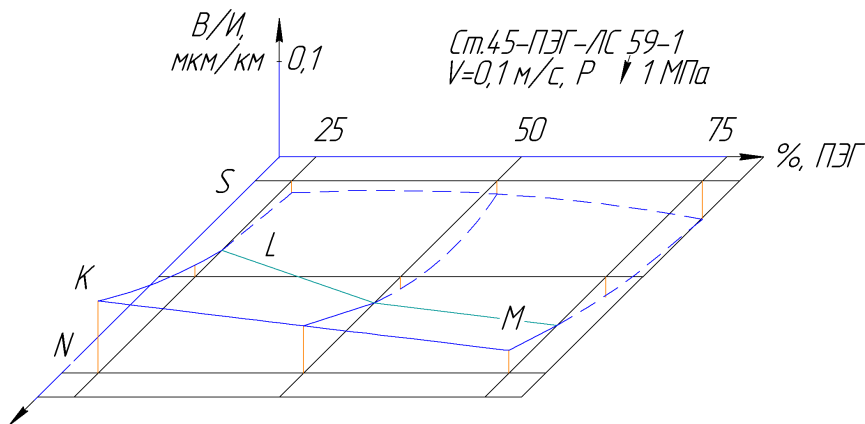


Рис. 4. Износ и режим восстановления стали 45 в среде ПЭГ под действием магнитного поля в паре с латунью ЛС59-1

Таким образом, образец (рис. 4, плоскость KLM) увеличивается в размере: за каждый километр пути трения на $0,1 \dots 0,15$ мкм, что наблюдается по топографии поверхности трения сталь 45 – латунь ЛС59-1 (рис. 5). Образование тончайших плёнок на поверхности стали 45 указывает на перенос материала контрообразца (латуни), что выражается в потемнениях на поверхности образца. В свою очередь, поверхность латуни образует характерные (зеленоватого цвета) трибологические плёнки (рис. 5). Наиболее грубые поверхностные плёнки образуются на поверхностях трения против полюса S, что увеличивает износ и величину шероховатости. Исходя из результатов исследований на трение, характеристика топографии поверхности против полюса S ухудшается до шероховатости $R_a = 10 \dots 15$ мкм по сравнению с $R_a = 2 \dots 4$ мкм на полюсе N в среде поверхностно-активной жидкости ПЭГ400-75%. Наименьшей материальной части цей, движущейся в жидкости ПЭГ-400, является ион металла, он имеет заряд, поэтому будет подчинен направленному действию МП. Исходя из физико-химических свойств металлов, в зону трения необходимо подавать настолько мелкие частицы, чтобы они противостояли движению жидкости и удерживались МП в зоне трения. Направление МП необходимо определить так, чтобы составные части материала, находящиеся в объёме магнитных линий, независимо от их физических свойств были направлены в зону трения.

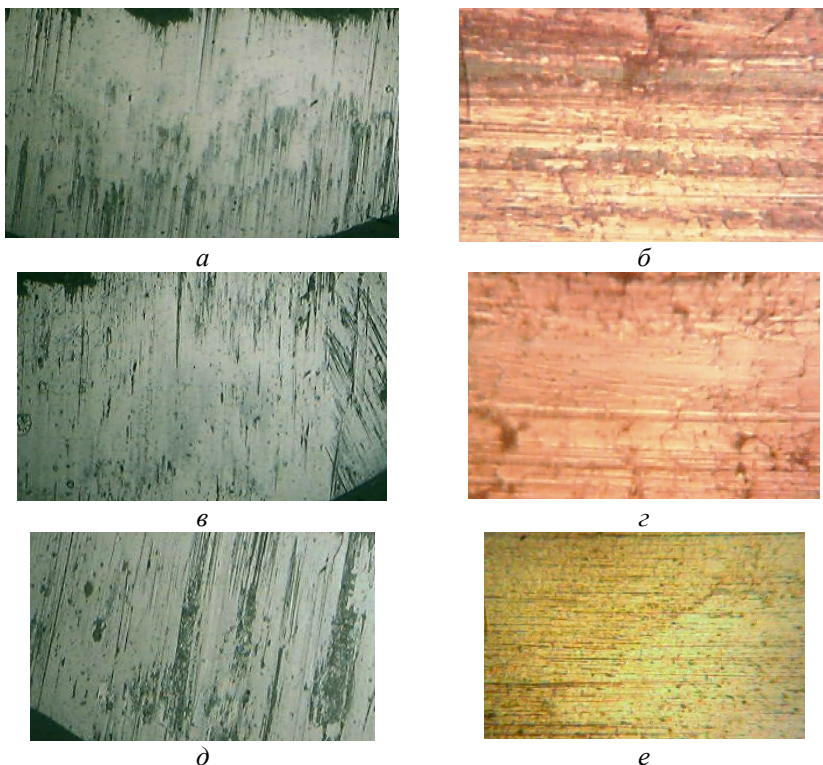


Рис.5. Характерная топография поверхностей трения стали 45 по латуни ЛС59-1 с учётом направленного действия магнитного поля:
а – Ст 45 – против *N*, 25 % ПЭГ; *б* – ЛС59-1, против *N*, 25 % ПЭГ; *в* – Ст 45, между *N-S*, 50 % ПЭГ; *г* – ЛС59-1, 50 % ПЭГ; *д* – Ст 45 против *S*, 75 % ПЭГ; *е* – ЛС59-1, 75 % ПЭГ

Выводы. Таким образом, для реализации технологии восстановления прецизионных пар трения необходимо: первое – доставка ионов в рабочую жидкость ПЭГ-400; второе – удержание магнитным полем конгломератов из продуктов износа в зоне трения; третье – обеспечение процессов переноса материала в средах с высоким удельным электросопротивлением с помощью направленного действия магнитных линий, которые совместно с трибоэлектрохимическими процессами анодного растворения изменяют состояние системы восстановления трибоузла, обеспечивая параметры поверхностного механизма репарации.

Внедрение технологии трибомагнитного управления перемещением образовавшихся продуктов износа и наличием противоизносных модификаторов, как составных частей находящихся в масле, является конструктивной энергетической технологией позволяющей осуществить внедрение материалов на рабочие поверхности трения. Результаты исследования указывают на возможности использования действия направленного магнитного поля для восстановления поверхностей трения трибомагнитным способом. Движение жидкости провоцирует отток продуктов износа, и чем они больше, тем легче их забрать из зоны трения. Исходя из механизма трения в зоне контакта возникают температуры намного выше температуры Кюри. Таким образом, процессы трения проходят в условия существования материалов в состоянии парамагнетизма и диамагнетизма.

Список литературы

1. *Вонсовский С.В.* Магнетизм. – М.: Наука, 1971. – 1032 с.
2. *Свирид М.М., Кравець І.А., Занько С.М., Паращанов В.Г., Задніпровська С.М.* Спосіб відновлення поверхні тертя. Пат. 36601, України, МПК G01N 3/56. – №u200809664; Заявл. 23.07.2008; Опубл. 27.10.2008, Бюл. № 20. – 2 с.

Кравець І.А., Свирид М.М., Белас О.М., Волосович Г.А., Бородій В.М. **До гіпотези про стан вузла тертя в магнітному полі** // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2011. – Вип. 56. – С.33–44.

Розглядається гіпотеза про стан трибосистеми в умовах впливу енергії магнітного поля на зону контакту. Визначено вплив напряму магнітного поля на зношування сталі 45 в модельній парі. Встановлено механізм роботи елементів в парі тертя діамагнетик – феромагнетик. Встановлені умови утворення безкисневих поверхневих плівок, на елементах вузла тертя.

Рис. 5, список літ.: 2 найм.

Kravets I.A., Svyryd M.M., Belas O.M., Volosovych G.A., Borodiy V.M.

To hypothesis about friction unit condition in the magnetic field

The hypothesis about tribosystem state in the conditions of magnetic field energy influence on a contact zone is considered in the article. The influence of magnetic field direction on a wearing of steel 45 in model pair is defined. The mechanism of elements work in friction conditions of diamagnetic to ferromagnetic is established. The conditions of unoxide surface film formation, which were formatted on the elements of friction knot, are established.

Стаття надійшла до редакції 26.10.2011