

АТОМНО-ЭЛЕКТРОННЫЙ ПОДХОД К ПОВЫШЕНИЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТРИБОСИСТЕМ С ФЕРРОМАГНИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Зелинский В.В.¹, Борисова Е.А.¹

¹*Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Муром, Россия (602264, г. Муром, ул. Орловская, 23), e-mail: selvik46@yandex.ru*

Выдвинута гипотеза о противoadгезионной природе метода обработки магнитным полем режущих и деформирующих инструментов на основе анализа опыта эксплуатации и экспериментальных исследований широкой номенклатуры инструментов. Для изучения влияния магнитного поля на адгезионные процессы предложен и использован атомно-электронный подход, базирующийся на рассмотрении процессов, происходящих на уровне наноструктур кристаллической решетки намагниченного тела. Теоретическим моделированием показано, что влияние магнитного поля на процесс схватывания может быть обусловлено изменением энергетического состояния наноструктур в кристаллической решетке в соответствии с квантово-механической природой их реакции на магнитное воздействие. Уделено внимание методологическому аспекту экспериментального моделирования, в результате которого получены новые результаты по влиянию режимов намагничивания инструментальных материалов на величину их износа для условий преобладающего адгезионного изнашивания. Предложен новый механизм влияния обработки магнитным полем на износ, заключающийся в возникновении определенной электронной системы с измененным уровнем энергии, не склонной к образованию прочных химических связей.

Ключевые слова: износ, адгезия, трибосистема, импульс, магнитное поле, интенсивность изнашивания, энергия

ATOMIC ELECTRONIC APPROACH TO IMPROVE DURABILITY TRIBOSYSTEMS WITH FERROMAGNETIC MATERIALS

Zelinsky V.V., Borisova E.A.

Murom Institute (Branch) of Vladimir State University n.a. A.G. and N.G. Stoletovyh, Murom, Russia (602264, Murom, Orlovskaya street, 23), selvik46@yandex.ru

The hypothesis about the nature of control is a method of processing a magnetic field cutting and deforming tools based on the analysis of operating experience and experimental studies of a wide range of instruments. To study the influence of magnetic field on the adhesion process is proposed and used atomic-electronic approach based on consideration of the processes taking place at the level of the crystal lattice of nanostructures magnetized body. Theoretical modeling shows that the influence of the magnetic field on the process of setting may be due to a change in the energy state of nanostructures in the crystal lattice in accordance with the quantum-mechanical nature of their response to magnetic effects. Attention is paid to methodological aspects of experimental modeling, in which new results on the effect of mode of magnetization tool materials by an amount of wear to the prevailing conditions of adhesive wear. A new mechanism of the effect of treatment of the magnetic field on the wear, is the appearance of a certain electronic system with a modified energy level, not prone to the formation of strong chemical bonds.

Keywords: wear, adhesion, tribosystem, pulse, magnetic field, intensity of wear, energy.

Трибосистемы с ферромагнитными материалами образуют режущие и деформирующие инструменты в контакте с обрабатываемыми материалами, системы «колесо—рельс» подвижного состава железных дорог, системы «ролик—рельс» у железнодорожных путевых машин, рабочие органы горных и дорожных машин и др. Общим для всех перечисленных трибосистем является взаимодействие трущихся поверхностей в условиях пластического деформирования, сопровождающееся повышенным изнашиванием при схватывании (ГОСТ 27674-88). Такой вид изнашивания происходит в результате схватывания на микроучастках

сопряженных поверхностей с последующим вырывом или срезом материала, переносом его с одной поверхности на другую.

Перспективным физическим методом повышения износостойкости трибосистем с ферромагнитными материалами является обработка магнитным полем (ОМП) относительно невысокой напряженности (до 800 кА/м). Однако механизм и закономерности влияния ОМП на процесс изнашивания изучены недостаточно. Ранее выполненные исследования [2, 5], проведенные в основном в производственных условиях, без анализа природы и причин изнашивания, без учета исходных показателей качества материалов трибосистемы, при наличии большого количества конструктивных и режимных факторов, не позволили получить надежных рекомендаций по управлению эффектом ОМП. Таким образом, отсутствие научно обоснованных подходов в применении нового метода сдерживает его практическое применение для обрабатываемых инструментов и других тяжело нагруженных трибосистем с ферромагнитными материалами.

Целью работы является изучение механизма влияния импульсного магнитного воздействия на величину износа трибосистемы «инструментальная сталь – конструкционная сталь» в условиях преобладающего вида изнашивания при схватывании на основе теоретического и экспериментального моделирования.

Теоретическое моделирование. Микростроение материала на рабочей части инструмента представляет собой сложную многоуровневую структуру. Распределение структурных уровней и их элементов для инструментальных и конструкционных сталей с учетом размеров элементов можно представить следующим образом (табл. 1).

Воздействие трением проявляется на всех структурных уровнях. На микроструктурном и дислокационном уровнях происходят видоизменения структурных элементов и образуются новые (вторичные) микроструктуры и дислокационные структуры. На атомно-электронном уровне взаимодействуют составляющие сопряженных кристаллических решеток, формируются условия для образования тех или иных химических связей.

Влияние магнитного воздействия в соответствии с современными положениями физики реализуется на атомно-электронном уровне. Общим результатом трибовоздействия и магнитного воздействия на атомно-электронном уровне является образование различных электронных конфигураций с измененным энергетическим состоянием. На этом структурном уровне размеры элементов (атомов, орбиталей, оболочек) составляют от десятых долей до десяти нанометров. Поэтому можно принять, что они образуют наноструктуры.

Таблица 1

Структурные уровни и структурные элементы инструментальных и конструкционных сталей

Структурные уровни	Микроструктурный	Дислокационный	Атомно-электронный
Структурные элементы	Кристаллиты, зерна отдельных фаз, посторонние включения, микропоры, легирующие добавки	Блоки кристаллической решетки, краевые и винтовые дислокации, границы дислокаций, дефекты упаковки	Ячейки решетки, атомы и ионы, электронные оболочки, атомные и молекулярные орбитали
Размер элементов, (м)	$10^{-4} \dots 10^{-6}$	$10^{-6} \dots 10^{-8}$	менее 10^{-8}

О тесной связи параметров атомно-электронной структуры с рядом характеристик трибосистем свидетельствуют результаты многих исследований. Установлено, что металлы с гексагональной решеткой имеют пониженную адгезию и более высокую износостойкость [4]. При скольжении металлов с кубической решеткой сила трения больше для металла с меньшим параметром решетки, для металлов с кубической решеткой плотноупакованные атомами плоскости решетки создают меньшие коэффициенты трения и адгезии [7]. В работах [6, 7] показано, что увеличение прочности межатомных связей в кристаллической решетке определенного металла снижает скорость его изнашивания. В целом, можно считать установленным, что для инструментальных и конструкционных сталей, имеющих кубическую кристаллическую решетку, характеристики трения, изнашивания и адгезии зависят от сил связи между атомами.

Адгезионные процессы при трении обобщают понятием «схватывание», которое прежде всего связывают с видом химической связи. В результате изучения трения и изнашивания различных металлов [6, 7] установлено, что условием интенсивного схватывания и, следовательно, интенсивного износа при трении является обмен электронами атомов металлов трущейся пары с образованием энергетически стабильных электронных конфигураций. При этом, по мнению авторов, величина износа определяется не только интенсивностью электронного обмена, но и прочностью адгезионных связей, обусловленной энергетической устойчивостью образующихся в результате этого обмена электронных конфигураций. В работе [8] отмечается, что при трении энергетически устойчивые электронные конфигурации с возрастающей долей ковалентной связи образуют локализованные валентные электроны переходных металлов. Это приводит к увеличению прочности межатомных связей и износостойкости металлов. Согласно работе [7]

интенсивность износа минимальна, если атомы трущихся металлов характеризуются высокой долей свободных электронов. В этом случае прочность образовавшихся в процессе трения связей невелика, и они легко разрушаются при взаимном перемещении трущихся поверхностей.

Таким образом, экспериментальными исследованиями подтверждается значительное влияние взаимодействия электронных оболочек переходных металлов на формирование определенного вида связи между атомами в решетке. Очевидно, что такие процессы и закономерности свойственны и очагам схватывания решеток систем трения «железо—железо».

Все электронные конфигурации представляют собой наноструктуры. При современном уровне развития физики твердого тела считается установленным, что свойства элементов наноструктур во многом не подчиняются законам физики макромира. На них в большей мере влияют особенности и закономерности квантово-механического строения атомов. С этой точки зрения наноструктуры при трении могут приобретать новые (вторичные) свойства, обусловленные квантовой природой взаимодействия веществ.

Экспериментальные исследования. В соответствии с научными подходами в трибологии достижение поставленной выше цели должно начинаться с установления доминирующего вида изнашивания в трибосистеме «инструментальная сталь – конструкционная сталь». В связи с этим авторами проводилось детальное изучение опыта эксплуатации и экспериментальных исследований по изнашиванию большой номенклатуры инструментов в научно-технической литературе. В результате установлены [1] преобладающий вид и причины изнашивания режущих инструментов, выявлены причинно-следственные связи общего износа инструмента с причинами его возникновения. Выявлено, что наибольшей долей причин изнашивания является адгезионное схватывание, и этой причиной может быть обусловлена величина износа, составляющая до 85% от общего износа. Поэтому с учетом известного кратного снижения износа инструментов после ОМП авторами данной работы выдвигается гипотеза о противoadгезионной природе влияния данного метода.

В развитие выдвинутой гипотезы проводилось экспериментальное моделирование процесса изнашивания в трибосистеме «инструментальная сталь – конструкционная сталь» в условиях возрастающего магнитного воздействия в виде импульсов от 1 до 7. Намагничивание проводили с помощью установки, излучающей магнитное поле напряженностью 400 кА/м с регулируемой длительностью импульса. Материалами образцов являлись быстрорежущая сталь Р6М5 и легированная сталь ХВГ, закаленные по

соответствующим технологиям. По одному образцу каждой стали намагничиванию не подвергались, и они являлись контрольными (базовыми).

Для опытов на изнашивание использовалась машина трения, предусматривающая испытания по схеме трения «ролик—образец». Контртелом для каждого образца служил отдельный закаленный ролик из стали 40Х. Величина износа образцов оценивалась по убыли веса.

Измерениями микротвердости на микротвердомере ПМТ-3М для всех образцов не удалось выявить заметного влияния намагниченности на изменение их механических свойств. Наибольший прирост микротвердости составил всего 5,5%.

Обсуждение результатов. Результаты экспериментов представлены на рисунке 1. Для всех образцов скорости изнашивания постоянные. В соответствии с принятыми в трибологии признаками классификации видов изнашивания и их трактовкой постоянные скорости изнашивания свойственны адгезионному изнашиванию (изнашиванию при схватывании). Кроме того, с помощью микроскопического анализа частиц износа были установлены их округлая форма и черный цвет без металлического блеска. Частицы износа со следами среза практически отсутствовали. Такой характер отделенных частиц соответствует преобладающему изнашиванию при схватывании. Таким образом, по виду изнашивания условия экспериментов соответствуют изнашиванию инструментов.

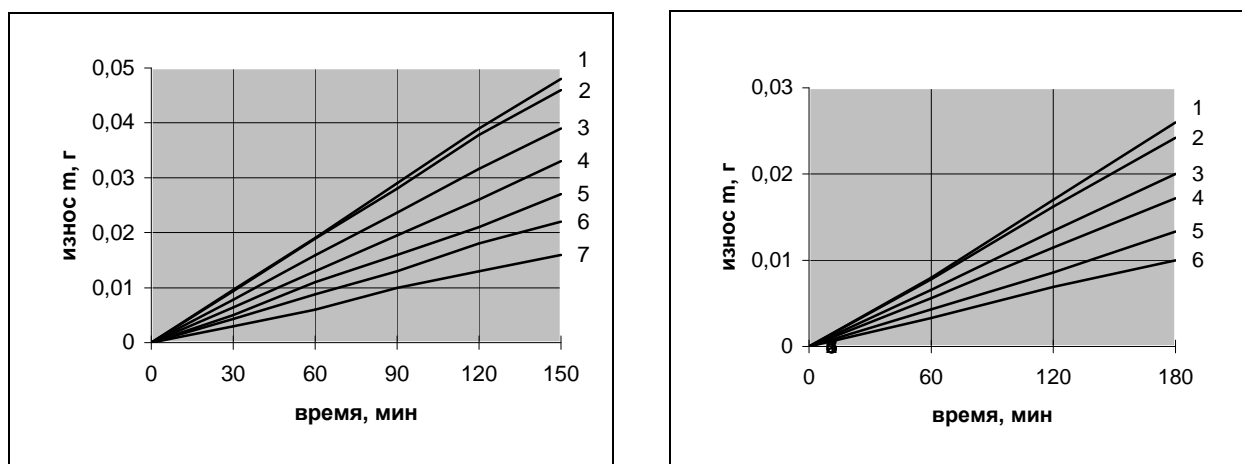


Рис. 1. Зависимость величины износа базовых и намагниченных образцов от длительности трения и количества импульсов магнитного воздействия n ; а – сталь ХВГ (1 – базовый $n = 0$; 2 – $n = 1$; 3 – $n = 2$; 4 – $n = 3$; 5 – $n = 4$; 6 – $n = 5$; 7 – $n = 7$), б – сталь Р6М5 (1 – базовый $n = 0$; 2 – $n = 1$; 3 – $n = 2$; 4 – $n = 3$; 5 – $n = 5$; 6 – $n = 7$).

Трение и изнашивание при резании происходят в условиях пластического взаимодействия поверхностей. Согласно классификации И.В. Крагельского [3] при пластическом взаимодействии величина интенсивности изнашивания составляет $I = 10^{-$

$8 \dots 10^{-5}$ и соответствует 5–7-м классам износостойкости. При $I > 10^{-5}$ пластическое взаимодействие переходит в микрорезание. В проведенных опытах во всем диапазоне условий для обеих сталей интенсивность изнашивания составляла $I = 0,7 \cdot 10^{-7} \dots 3,3 \cdot 10^{-7}$. Это также указывает на соответствие условий опытного моделирования по виду контактного взаимодействия поверхностей реальным условиям изнашивания при резании.

Одним из подходов к анализу результатов по изнашиванию может быть подход, основанный на уравнении Арчарда, полученном в результате математического моделирования процесса адгезионного изнашивания. Для принятых условий экспериментов уравнение изнашивания имеет вид:

$$m = K_a \gamma A V \frac{q}{H} t, \quad (1)$$

где K_a — безразмерный коэффициент адгезии, учитывающий отношение числа адгезионных связей, обусловивших отделение материала, к общему числу связей; γ — плотность материала частиц износа, A — площадь трущегося контакта, V — скорость скольжения, q — контактное давление, H — твердость материала образца, t — длительность трения.

Наблюдаемая в опытах прямо пропорциональная зависимость величины износа от длительности трения и обратно пропорциональная связь величины износа с твердостью образцов полностью согласуется с формулой (1). Это также подтверждает сделанный ранее вывод об адгезионной природе изнашивания в условиях опытного моделирования.

С позиций оценки влияния импульсного режима ОМП на износостойкость образцов наибольший интерес представляют зависимости величины их износа от количества импульсов воздействия магнитным полем. Результаты показывают, что увеличение числа импульсов магнитного воздействия обеспечивает устойчивое снижение величины износа для обеих сталей. При этом для стали ХВГ кратность снижения величины износа наиболее намагниченного образца ($n = 7$) по сравнению с контрольным образцом ($n = 0$) лежит в пределах от 2,9 до 3,6. Для стали Р6М5 кратность снижения износа при намагничивании 7 импульсами по отношению к контрольному образцу ($n = 0$) составляет от 2,42 до 2,66. Следует отметить, что с увеличением количества импульсов воздействия происходит постепенное ослабление его влияния, предположительно связанное с магнитным насыщением материала образцов.

Сопоставление результатов экспериментов с формулой (1) показывает, что при постоянных значениях γ , A , V , q , и H (реализованных в опытах с одинаковой длительностью трения) величина весового износа m определяется только значением коэффициента адгезии K_a . Такой вывод с учетом сильной зависимости величины износа от количества импульсов

воздействия магнитным полем приводит к предположению о том, что намагничивание придает образцам новые свойства, которые и оказывают влияние на схватывание образцов с контртелом. Следовательно, коэффициент адгезии K_a в уравнении изнашивания является наиболее сильным фактором процесса изнашивания. Таким образом, выдвинутая выше гипотеза о противоадгезионной природе влияния ОМП на изнашивание представляется верной.

Снижение величины износа у намагниченных образцов может объясняться формированием некоторой совокупности трибологически благоприятных параметров и свойств, обеспечивающих функционирование трибоконтакта как открытой термодинамической системы. Причем оптимальные для трибоконтакта параметры и свойства формируются исключительно благодаря совместному влиянию:

1) фрикционного воздействия на дислокационном структурном уровне за счет механизмов самоорганизации трения в условиях пластического взаимодействия поверхностей;

2) внешнего магнитного воздействия на атомно-электронном уровне на основе квантовых закономерностей для наноструктур.

Механизм влияния магнитного воздействия на атомно-электронном уровне состоит в следующем. Инструментальные и конструкционные стали являются ферромагнетиками – веществами, способными намагничиваться во внешнем магнитном поле и создавать собственное магнитное поле, которое может значительно превосходить внешнее. В соответствии с теорией квантово-механического строения атомов внешнее магнитное поле формирует на поверхности трения образца многоэлектронную наноструктуру с измененной энергией определенных электронных конфигураций. Это обуславливает снижение способности вещества к созданию сильной адгезионной связи. В условиях трения без внешнего магнитного поля созданная электронная наноструктура продолжает осуществлять противоадгезионные функции за счет подпитки энергией остаточного магнитного поля и энергией фрикционных явлений. При этом у системы трения «железо—железо» реализуются более слабые химические связи. Прочность очагов схватывания и масштабы последующих вырывов материала, образующих частицы износа, уменьшаются.

Заключение. В результате выполненной работы на основе атомно-электронного подхода и экспериментов получены новые результаты и сформулирован механизм влияния магнитного поля на износостойкость трибосистем с ферромагнитными материалами для условий изнашивания при схватывании. Результаты могут быть использованы при разработке обоснованной технологии ОМП.

Список литературы

1. Зелинский В.В. Борисова Е.А. Установление преобладающих видов и причин изнашивания режущих инструментов // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. — 2012. — № 2(12). — С. 55–60.
2. Кантович Л.И., Малыгин Б.В., Первов К.М. Повышение ресурса инструмента и деталей горных машин методом магнитной обработки // Горное оборудование и электромеханика. — 2007. — № 1. — С. 13–16.
3. Крагельский И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. — М.: Машиностроение, 1977. — 528 с.
4. Любарский И.М. Металлофизика трения / И.М. Любарский, И.С. Палатник. — М.: Металлургия, 1976. — 176 с.
5. Малыгин Б.В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. - М.: Машиностроение, 1989. — 112 с.
6. Машков Ю.К. Трибофизика металлов и полимеров: монография / Ю.К. Машков. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2013. — 240 с.
7. Рыбакова Л.М. Структура и износостойкость металла / Л.М. Рыбакова, Л.И. Куксенова. — М.: Машиностроение, 1982. — 212 с.
8. Самсонов Г.В., Данькин А.А. Аэроабразивная износостойкость и силы связи в металлах // Проблемы трения и изнашивания. Вып. 8. — Киев: Техника, 1975. — С. 56–61.

Рецензенты:

Соловьёв Д.Л., д.т.н., профессор кафедры автоматизированного проектирования машин и технологических процессов Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром;

Шпаков П.С., д.т.н., профессор, профессор кафедры автоматизированного проектирования машин и технологических процессов Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром.