

восприятием нагрузок // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 3 (23). С. 21–32.

STIFFNESS LINEARIZATION AND ERROR ESTIMATION OF A NUMERICAL MODEL OF A CABLE SHOCK DAMPER WITH SPATIAL LOAD PERCEPTION

S.V. DORONIN, Cand. Sc., E.M. REIZMUNT, Cand. Sc.
Krasnoyarsk branch of Federal Research Center for Information
and Computational Technologies,
660000, Krasnoyarsk, PO Box 25515, e-mail: mr.svdoronin@yandex.ru

The difficulties arising at analytical calculation of shock absorbers with nonlinear characteristics and spatial perception of loads are noted. The difficulties of numerical simulation of the cable for the analysis of mechanical behavior of shock absorbers related to the structural complexity and dimensionality of the problem are considered. A technically sound approach to the construction of a linearized numerical model of a tether shock absorber based on experimental stiffness estimates is developed. This approach allows to reduce the dimensionality and requirements to computational resources due to simplification of the tether structure. It is emphasized that the adequacy and the possibility of using the obtained numerical model of the cable shock absorber for preliminary simplified calculations of shock absorber systems with subsequent experimental testing and refinement of the results are based on the analysis of the numerical model error.

Keywords: cable shock damper, static calculation, finite element model, nameplate load diagrams, experimental stiffness estimates, cable, linearization.

Поступила в редакцию/received: 25.03.2024; после рецензирования/revised: 28.03.2024;
принята/accepted: 04.04.2024

УДК 620.178

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ АДГЕЗИОННОГО КОНТАКТА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук, Г.Б. БУРДО, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: gbtms@yandex.ru

© Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., 2024

В работе приведена новая модель адгезионного изнашивания поверхностей при наложении магнитного поля. Предложено учитывать магнитостатические силы, действующие в процессе отделения частиц износа. Подчеркнуто, что на качественном уровне модель хорошо согласуется с экспериментальными результатами. Отмечено, что полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования свойств трибоузлов, работающих в магнитных полях.

Ключевые слова: магнитное поле, адгезионный износ, магнитостатические силы.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-3-32-39

*Вестник Тверского государственного технического университета.
Серия «Технические науки». № 3 (23), 2024*

ВВЕДЕНИЕ

Исследователи в области трибологии уделяют большое внимание поиску перспективных методов физико-химического воздействия на процессы, протекающие при трении, для целенаправленного изменения их в требуемом направлении. В частности, процессы, происходящие в зоне фрикционного контакта, пытаются стимулировать электромагнитным полем, электрическим током, вибрацией, созданием механического напряженного состояния и т.д.

В последние десятилетия не пропадает интерес к изучению влияния магнитного поля на трение и изнашивание разнообразных по свойствам и структуре материалов при различных условиях контакта поверхностей [1–5]. Столь продолжительные исследования не привели к получению значимых научных результатов, раскрывающих механизм трения в присутствии магнитного поля. Не удалось установить надежных и хорошо воспроизводимых эффектов, которые проявляются при наложении на зону трения магнитного поля. Как следствие, отсутствует понимание особенностей физико-химических процессов, протекающих при трении в магнитном поле. Важность изучения трибомагнитных проблем обусловлена и тем обстоятельством, что конструкция многих современных трибоузлов предполагает наличие магнитных полей [6, 7].

Из всего многообразия различных публикаций, посвященных изучению процессов изнашивания в магнитном поле, выделяются статьи (например, [8–13]), в которых изучался износ лезвийного инструмента при наложении на зону трения стационарного или импульсного магнитного поля. Все исследователи отмечали повышение износостойкости инструмента в 1,5...3 раза в зависимости от условий трения и состава материалов. Установлено, что основная причина изнашивания инструмента заключалась в адгезионном разрушении поверхности, на характер протекания которого, очевидно, и влияло магнитное поле.

Адгезионное изнашивание – это один из фундаментальных видов износа, поскольку он в той или иной степени проявляется во всех случаях контакта трущихся поверхностей двух твердых тел и имеется даже тогда, когда другие виды износа незначительны. Наиболее ярко он проявляется при контакте материалов с близкой твердостью.

Адгезионный износ происходит в результате периодического отрыва микроскопических частиц с поверхности из-за сильного адгезионного взаимодействия в зоне контакта. Этот вид износа часто наблюдается на рабочих поверхностях инструментов, работающих при низких скоростях резания (быстрорежущих сверл, зенкеров, разверток, фрез, протяжек), когда температура в контактных слоях сравнительно мала.

На первом этапе адгезионного изнашивания должны образоваться прочные адгезионные связи (схватывание, мостик сварки) между микровыступами контактирующих поверхностей. Поэтому контактирующие поверхности должны быть ювенильными для проявления действия сильных межатомных сил. В области контакта шероховатости должны пластически деформироваться, т.е. напряжения на пятне контакта – превышать твердость (предел текучести). В противном случае после снятия нагрузки энергии упругой деформации может оказаться достаточно для разрушения адгезионной связи. Кроме того, при интенсивных пластических деформациях разрушаются пленки окислов и вскрываются химически чистые металлические поверхности, а площадь фактического контакта возрастает. На следующем этапе при относительном смещении поверхностей происходит отделение частиц от менее прочной поверхности, если адгезионные силы превышают когезионные.

Судя по литературным источникам, причины, приводящие к изменению характера адгезионного изнашивания в магнитном поле, до конца не установлены. Высказываются предположения о том, что магнитное поле влияет на процессы пластического деформирования при адгезионном разрушении, на структуру и свойства материалов трения, характер распределения тепловых потоков и гальванических токов. Однако эти причины не позволяют убедительно объяснить увеличение износостойкости материалов в несколько раз при наложении магнитного поля.

На наш взгляд, на процесс отделения микрочастиц адгезионного износа существенное воздействие должны оказывать магнитостатические силы. Роль магнитостатических взаимодействий в процессе разрушения поверхностей при адгезионном изнашивании ранее в литературе не рассматривалась, хотя удельная величина этих сил имеет значение порядка 10^7 Па и сравнима с механическими характеристиками некоторых конструкционных ферромагнитных материалов.

Детальный атомарно-силовой механизм адгезионного разрушения до конца не ясен, но некоторые его характерные особенности можно установить, используя энергетический (термодинамический) подход к разрушению поверхностей трения, который широко применяется в трибологии [14]. Такой подход позволяет определить наиболее общие характеристики физико-химического процесса разрушения без учета сложных, малоизученных и трудно описываемых взаимодействий в рассматриваемой системе. Цель работы заключалась в построении магнитосилового физической модели адгезионного изнашивания в присутствии магнитного поля на основе энергетического подхода.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ОПИСЫВАЮЩАЯ ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА АДГЕЗИОННОЕ ИЗНАШИВАНИЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Предположим, что при сдвиге поверхностей трения в области схватывания отделяются частицы (частицы износа) в виде шара диаметром d , близким по величине к диаметру пятна микроконтакта. В работах [15, 16] были экспериментально обнаружены частицы такой формы при доминировании адгезионного износа. Упругая энергия, запасенная в объеме частицы, ω_6 перед ее отделением от менее прочной поверхности выражается следующим образом:

$$\omega_6 \approx \frac{\sigma_c^2 d^3}{2G},$$

где σ_c – критические напряжения, предшествующие разрушению поверхности; G – модуль сдвига материала разрушаемой поверхности.

Разрушение поверхности путем вырывания из нее отдельных частиц произойдет, только если накопленная упругая энергия будет превышать энергию адгезии, равную энергии двух свободных поверхностей, образованных в месте микроразрушения поверхности трения:

$$\omega_y \approx 2\gamma d^2,$$

где γ – удельная поверхностная энергия.

В присутствии магнитного поля баланс энергий изменится. Допустим, контактирующие детали изготовлены из ферромагнитных материалов с высокой магнитной проницаемостью (железа, кобальта, никеля или сплавов на их основе) и образуют замкнутую магнитную цепь. Намагничивание материалов трения осуществляется с помощью постоянного магнита или соленоида магнитным полем

напряженностью H_n , существенно превышающим коэрцитивную силу материалов; магнитное поле направлено по нормали к поверхности трения (в противном случае нужно принимать во внимание лишь нормальную составляющую напряженности поля). Под действием магнитного поля H_n происходит процесс перемагничивания трущихся материалов, и они переходят в магнитное состояние, близкое к техническому насыщению с индукцией B_s . Для простоты рассуждений предположим, что между поверхностями имеется плоский зазор, толщина которого много меньше других размеров зазора. Ввиду малости толщины зазора индукция магнитного поля B в нем будет иметь значение, близкое к B_s , а напряженность магнитного поля равна B_s / μ_0 , где μ_0 – магнитная постоянная. Векторы индукции и напряженности магнитного поля в зазоре коллинеарны. Определим изменение магнитной энергии после отделения частицы износа.

Объемная плотность энергии Ω_B магнитного поля в общем случае равна скалярному произведению индукции магнитного поля B на напряженность магнитного поля H : $\Omega_B = (B \cdot H) / 2$. Магнитная энергия в области поверхности, которую занимала частица до отделения, $\omega_B \approx \frac{\pi d^3 B_s H_n}{12 \mu_0} \sim 0$, поскольку $B_s \gg H_n$. Тогда результирующее возрастание энергии магнитного поля будет равно магнитной энергии частицы в сумме с энергией магнитного поля $\omega_f = \frac{\pi d^3 B_s^2}{6 \mu_0}$ в полости, оставшейся от частицы.

Под действием магнитного поля в зазоре с напряженностью B_s / μ_0 частица однородно намагнитится до состояния магнитного насыщения, и индукция магнитного поля внутри нее будет $\sim B_s$. Напряженность магнитного поля внутри частицы $H = \frac{B_s}{\mu_0} - \frac{B_s}{3\mu_0} = \frac{2B_s}{3\mu_0}$, где $\frac{B_s}{3\mu_0}$ – величина напряженности размагничивающего поля (1/3 – коэффициент размагничивания для шаровидного тела). Энергия магнитного поля, заключенная в частице, $\omega_p \approx \frac{\pi d^3 B_s^2}{18 \mu_0}$. Отсюда результирующее изменение магнитной энергии системы ω_B можно выразить так:

$$\omega_B \approx \frac{d^3 B_s^2}{2 \mu_0}.$$

Зная увеличение магнитной энергии при отделении частицы износа, можно определить критические напряжения σ_c , достаточные для отделения частиц от поверхности размагниченных материалов и намагниченных внешним магнитным полем ($\sigma_{св}$):

$$\sigma_c \geq \sqrt{\frac{2\gamma G}{d}}; \quad (1)$$

$$\sigma_{св} \geq \sqrt{\frac{2\gamma G}{d} + \frac{B_s^2 G}{2\mu_0}}. \quad (2)$$

В работе [17] справедливо утверждается, что при схватывании материалов напряжение на контакте микровыступов поверхностей в процессе сближения их вершин по порядку величины равно твердости разрушаемой поверхности H_μ . Именно при этом условии происходит сильное адгезионное взаимодействие микровыступов, которое может превышать когезионное взаимодействие в разрушаемой поверхности. Когда выступы расходятся при сдвиге поверхностей, то перед разрушением предельное напряжение опять достигает значения, примерно равного H_μ , но с противоположным знаком. Отсюда можно получить выражение для оценочного расчета характерного

размера частиц адгезионного износа при трении без магнитного поля d и в магнитном поле d_6 :

$$d \approx \frac{2\gamma G}{H_\mu^2}; \quad (3)$$

$$d_6 \approx \frac{2\gamma}{\frac{H_\mu^2}{G} - \frac{B_s^2}{2\mu_0}}. \quad (4)$$

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА АДГЕЗИОННОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

Из приведенных выражений (1), (2) видно, что в магнитном поле указанной топографии критическое напряжение должно быть выше. Значит, при трении в магнитном поле увеличится количество участков фактического контакта поверхностей, которые будут расходиться вдоль межфазной поверхности без разрушения когезионных связей внутри материала. Адгезионный износ поверхностей должен уменьшаться, что соответствует экспериментальным данным, полученным в различных исследованиях.

Индукция магнитного поля в намагничивающих полях, превышающих $\sim 10^4$ А/м, для многих сталей близка к индукции насыщения $B_s \approx 2$ Тл. Принимая для стали $\gamma \approx 2,4$ Н/м, $G \approx 80$ ГПа, характерный размер частиц износа $d = 10^{-6} \dots 10^{-4}$ м из формул (4), (5), получим, что $\sigma_{св} / \sigma_c \approx 1,1 \dots 3$, т.е. магнитное поле может привести к достаточно существенному повышению механических напряжений в контакте микронеровностей, которые вызовут когезионное разрушение материалов поверхностей.

Если из ферромагнитного материала изготовлен, например, только один элемент пары трения, то изменение магнитной энергии будет зависеть от ширины немагнитных зазоров в магнитной цепи, образованной источником поля и деталями узла трения. Чем больше немагнитные зазоры, а значит, размагничивающее поле, создаваемое «магнитными зарядами» на границах раздела намагниченных тел, тем меньше будет изменяться магнитная энергия при разрушении из-за увеличения энергии поля в веществе. Если намагничивающее магнитное поле направлено вдоль поверхности трения, то изменение энергии магнитного поля при отделении частиц износа будет относительно незначительным и влиянием магнитного поля можно пренебречь. Отсюда становится понятно, что величина эффекта от воздействия магнитного поля на изнашивание обуславливается структурой магнитного поля в контакте трущихся тел. Магнитное поле наиболее сильно влияет на процесс адгезионного изнашивания, только если силовые линии проходят поперек зоны трения и размагничивающие поля внутри элементов трения небольшие.

Из формул (3), (4) вытекает, что по отношению к материалам с постоянным химическим составом ($\gamma = const$) накладываются ограничения на минимальный размер частиц адгезионного износа, который определяется механическими свойствами поверхностей трения. В работе [17] приведены экспериментальные результаты изучения зависимости d от γ / H_μ (положено, что $G / H_\mu \approx 3$). Линейная зависимость между указанными величинами подтверждает, что формула (3), а значит и (4), по крайней мере, на качественном уровне правильно описывает особенности адгезионного изнашивания. Кроме того, из выражений (3), (4) следует, что при одинаковых условиях трения диаметр частиц износа сравнительно мягкой стали в магнитном поле может возрасти на величину до 25 % (по мере увеличения твердости микровыступов различие уменьшается). Значит, при адгезионном изнашивании в магнитном поле

высотные параметры шероховатости поверхностей должны несколько увеличиваться. Абразивное действие части адгезионного износа зависит от их размера, и это также должно отразиться на топографии поверхностей трения в зависимости от наличия магнитного поля.

Предложенный физический механизм (физическая модель) влияния магнитного поля на интенсивность адгезионного изнашивания пока является гипотетическим и требует экспериментального подтверждения. В первую очередь под воздействием магнитного поля должна измениться интенсивность изнашивания поверхностей. Количественно изменение интенсивности изнашивания можно оценить с помощью уравнения Хольма – Арчарда [18], которое хорошо согласуется с экспериментальными данными для адгезионного изнашивания. Согласно этому уравнению, при постоянной нормальной нагрузке на контакт интенсивность износа I связана со значением напряжения σ_c на контакте обратно пропорциональной зависимостью $I \sim \sigma_c^{-1}$. Значит, под влиянием магнитного поля интенсивность изнашивания должна снижаться в 1,5...4 раза в зависимости от твердости микрошероховатостей.

Приведем известные из литературы надежные экспериментальные данные о влиянии поля на адгезионный износ, которые полезны для верификации предложенной модели. В работе [11] проведены экспериментальные исследования воздействия магнитного поля на износ рельсовой стали. При этом использовалась модернизированная машина трения, предусматривающая испытания по схеме «ролик – плоский образец». Образцы рельсовой стали имели форму призмы, торец которой являлся поверхностью трения. Износ образцов определялся взвешиванием на лабораторных весах. Подвижные образцы – ролики изготавливались из стали 40Х и обладали твердостью HRC 48–49. Контртелом для каждого образца стали являлся отдельный ролик. Воздействие магнитным полем осуществляли специальным намагничивающим устройством на основе соленоида. Испытания показали, что скорость изнашивания образцов в исходном и намагниченном состояниях описывается линейной зависимостью, характерной для процесса изнашивания, имеющего адгезионную природу. Обработка результатов серии испытаний продемонстрировала, что величина интенсивности износа образца, подвергнутого магнитному воздействию, оказалась в 3,4 раза меньше износа образца в исходном (размагниченном) состоянии.

В другой работе [13] испытания на износ в магнитном поле проводились также по схеме трения «ролик – образец». Образцами являлись прямоугольные призмы из быстрорежущей стали Р6М5 и легированной стали ХВГ, подвергнутые закалке по соответствующим технологиям. Контртелом для каждого образца служил отдельный ролик из стали 40Х, закаленный до твердости 48–49 HRC. Уровень опытной нагрузки для всех образцов составлял 300 Н. На трущиеся образцы воздействовали импульсным внешним магнитным полем с напряженностью 400 кА/м. Разрушение поверхностей при трении происходило в основном в результате адгезионного изнашивания. Для стали ХВГ снижение величины износа намагниченного образца (по сравнению с контрольным) составило 2,9...3,6 раза; для стали Р6М5 кратность уменьшения величины износа лежит в пределах 2,42...2,66.

Приведенные экспериментальные данные хорошо согласуются с предложенной магнитосиловой моделью адгезионного изнашивания в магнитном поле. По существу, увеличение износостойкости материалов при адгезионном изнашивании, установленное экспериментально в работах [9–13], является необходимым условием справедливости предложенного механизма изнашивания. Если будет подтверждена зависимость размеров частиц износа от величины магнитного поля в зоне трения, вытекающая из предложенного механизма износа, то выполнится и достаточное

условие справедливости изложенной модели адгезионного изнашивания в магнитном поле. Точного количественного совпадения расчетных характеристик изнашивания в магнитном поле с экспериментальными значениями добиться достаточно трудно по причине отсутствия достоверных данных о динамике изменения свойств поверхностей, находящихся в контакте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе энергетического подхода была построена модель, описывающая влияние магнитного поля на процесс образования частиц адгезионного износа. Показано, что магнитостатические силы могут значительно затруднить отделение частиц износа и привести к уменьшению интенсивности адгезионного износа (что и наблюдалось в ряде прямых экспериментов). Это объясняется тем, что механические напряжения, достаточные для вырывания частицы в месте схватывания микронеровностей, возрастают в магнитном поле. Расчеты выявили некоторое увеличение размеров частиц, образующихся в процессе износа в магнитном поле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малыгин Б.В., Бень А.П. Магнитное упрочнение изделий (теория и практика). Херсон: ХГМА. 2009. 352 с.
2. Болотов А.Н., Елисеева Г.С., Михалев Ю.О. Роль магнитного поля при трении поверхностей, смазанных магнитным маслом // *Трение и износ*. 1988. Т. 9. № 5. С. 870–878.
3. Постников С.Н. Электрические явления при трении и резании. Горький: Волго-Вятское книжное изд-во. 1975. 236 с.
4. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. Л.: Машиностроение. 1986. 176 с.
5. Делюсто Л.Г. Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях. М.: Машиностроение. 2005. 272 с.
6. Болотов А.Н., Хренов В.Л. Триботехника магнитопассивных опор скольжения: монография. Тверь: ТГТУ, 2008. 124 с.
7. Bolotov A.N., Novikov V.V., Pavlov V.G. Magneto-liquid sliding bearings // *Трение и износ*. 2004. Т. 25. № 3. С. 286–291.
8. Patwari A.U., Mahmood M.N., Arif M.D. Improvement of machinability of mild steel during turning operation by magnetic cutting // *International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology*. 2012. V. 2. № 3. P. 9–12.
9. Галей М.Т. Повышение стойкости режущих инструментов путем магнитной обработки // *Станки и инструмент*. 1973. № 5. С. 31.
10. Галей М.Т., Ашихнин В.С. Изучение влияния магнитного поля на стойкость быстрорежущего инструмента // *Станки и инструмент*. 1981. № 6. С. 31–34.
11. Борисова Е.А., Диков А.Г., Зелинский В.В. Оценка влияния магнитного воздействия на триботехнические свойства стали // *Успехи современного естествознания*. 2012. № 6. С. 73.
12. Tribological behavior and surface analysis of magnetized sliding contact XC 48 steel/XC 48 steel / K.J. Chin [et al.] // *Wear*. 2001. V. 250. Iss. 1–12. P. 470–476.
13. Зелинский В.В., Борисова Е.А. О механизме снижения износа ферромагнитных материалов // *Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение*. 2014. Т. 16. № 2. С. 51–58.
14. Машков Ю.К., Малий О.В. Трибофизика конструкционных материалов: учебное пособие. М.: Ай Пи Ар Медиа. 2023. 177 с.

15. Армарего И.Дж.А., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием. М.: Машиностроение. 1977. 325 с.
16. Польцер Г. Основы трения и изнашивания. М.: Машиностроение. 1984. 264 с.
17. Popov V. Generalized archard law of wear based on Rabinowicz criterion of wear particle formation // *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*. 2019. V. 17. № 1. P. 39–45.
18. Archard J.F. Contact and rubbing of flat surfaces // *Journal of Applied Physics*. 1953. V. 24. № 8. P. 981–988.

Для цитирования: Болотов А.Н., Бурдо Г.Б. Моделирование разрушения адгезионного контакта в магнитном поле // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 3 (23). С. 32–39.

MODELING THE DESTRUCTION OF AN ADHESIVE CONTACT IN A MAGNETIC FIELD

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc., G.B. BURDO, Dr. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., 170026, Tver, e-mail: gbtms@yandex.ru

The paper presents a new model of adhesive wear of surfaces when a magnetic field is applied. It is proposed to take into account magnetostatic forces acting in the process of separation of wear particles. It is emphasized that at the qualitative level the model agrees well with the experimental results. It is noted that the obtained results can be used to predict the properties of tribojoints operating in magnetic fields.

Keywords: magnetic field, adhesive wear.

Поступила в редакцию/received: 18.04.2024; после рецензирования/revised: 25.04.2024;
принята/accepted: 30.04.2024

УДК 621.941.229.3

УСТАНОВКА ВАЛА СО ШПОНОЧНЫМ ПАЗОМ НА ЦЕНТРАХ СТАНКА

А.П. АРХАРОВ, канд. техн. наук

Тверской государственной технической университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: arharovanatoliy@yandex.ru

© Архаров А.П., 2024

Представлен анализ известных способов и технологических средств для установки валов на центрах металлорежущих станков. Изложена сущность разработанного способа установки, в котором передача крутящего момента от шпинделя на вал обеспечивается без закрепления вала. Раскрыты устройство и принцип действия сконструированного кулачкового патрона. Проведены сравнительные анализы спроектированных способа и патрона с аналогичными известными