

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

УДК 621.891

Влияние магнитного поля на образование и развитие микротрещин при трении

д.т.н. проф. Болотов А.Н., к.т.н. доц. Новикова О.О., к.т.н. доц. Новиков В.В.

ТвГТУ

8(4822) 52-49-71, alnikbltov@rambler.ru

Аннотация. Рассмотрено формирование и развитие трещин в образце ферромагнитного материала, находящегося в намагниченном состоянии. Показано, что магнитное состояние материала поверхности трения наиболее существенно влияет на процесс его хрупкого или квазихрупкого разрушения, если трещины раскрываются перпендикулярно вектору намагниченности. Установлен критерий самопроизвольного роста трещины в магнитном поле.

Ключевые слова: ферромагнитные материалы, магнитное поле, микротрещины, трение, износ.

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 различных по свойствам и структуре материалов при различных условиях контакта поверхностей [1 – 4]. Столь продолжительные исследования не привели к получению существенных научных результатов. Не удалось установить надежных и хорошо воспроизводимых эффектов, которые проявляются при наложении на зону трения магнитного поля и как следствие отсутствует понимание особенностей физического механизма процессов, протекающих при трении в магнитном поле. Важность изучения трибомагнитных проблем обусловлена и тем обстоятельством, что конструкция многих современных трибонезлов предполагает наличие магнитных полей [5, 6].

Наиболее часто разрушение поверхностей трения деталей машин носит хрупкий или квазихрупкий характер и происходит в результате усталостного изнашивания. Такой вид изнашивания характерен для подшипников качения и скольжения, кулачковых механизмов, зубчатых передач и т.д. На первом этапе усталостного изнашивания в поверхностном слое материалов происходит накопление и смещение дислокаций, сопровождающееся образованием трещин. На втором этапе трещина увеличивается в размерах, и это приводит к отделению частиц материала поверхности. Рассмотрим картину образования и развития трещин на основании энергетической теории Гриффитса с учетом намагниченности материалов. Будем изучать образование трещин в конструкционных материалах с высокой намагниченностью насыщения (1 – 2 Тл), т.е. в материалах, изготовленных на основе ферромагнетиков – железа, никеля или кобальта.

Рассмотрим бесконечное тело, которое находится в однородном поле растягивающих напряжений, приложенных на бесконечности. Пусть в теле имеется прямолинейная трещина шириной l и неограниченной длины. Магнитное поле отсутствует. Определим критические значения ширины трещины l и напряжения σ , при которых трещина начинает самопроизвольно и неограниченно расширяться.

В отсутствие трещины однородно растянутое тело накопило упругую энергию с объем-

ной плотностью, равной $f_\sigma = \frac{\sigma^2}{2E}$, где E – модуль Юнга. После возникновения трещины в окружающей ее области произойдет спадание упругой энергии. Можно приближенно считать, что подобная релаксация напряжений происходит в области порядка l . Запасенная в теле упругая энергия в расчете на единицу длины уменьшится на величину пропорциональную квадрату ее ширины:

$$F_\sigma = \frac{\sigma^2}{2E} l^2. \quad (1)$$

Раскрытие трещины сопровождается увеличением поверхностной энергии из-за образования новой поверхности раздела фаз с удельной площадью, пропорциональной удвоенной ширине трещины:

$$F_\gamma = 2\gamma l. \quad (2)$$

Если отвлечься от изменений температуры, то свободная энергия системы будет складываться из объемной упругой энергии и поверхностной энергии трещины. Величина свободной энергии как функция ширины трещины проходит через максимум. Максимуму свободной энергии отвечает критический размер трещины, равный:

$$l_c = \frac{2\gamma E}{\sigma^2}. \quad (3)$$

Трещина с размером больше критического l_c , неустойчивая и самопроизвольно увеличивает свои размеры, что, в конечном счете, приводит к разрушению хрупкого тела. Трещина с размером, меньше критического, стремится уменьшить свои размеры, однако в реальных условиях это не всегда возможно. Легко показать, что реальная прочность хрупкого тела по Гриффитсу равна:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2\gamma E}{l}}. \quad (4)$$

Путем более точных расчетов Гриффитс нашел точное значение критического напряжения:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi(1-\mu^2)l}}, \quad (5)$$

где: μ – коэффициент Пуассона.

Возможности применения теории хрупкого разрушения далеко выходят за пределы того сравнительно узкого класса материалов, которые являются действительно хрупкими (силикатное стекло, плавленый кварц и некоторые другие). Экспериментальные исследования показали, что при образовании трещин отдельные материалы, которые при обычных испытаниях на растяжение ведут себя как вполне пластические, разрушаются так, что пластические деформации сосредотачиваются в тонком слое около поверхности трещины. Результаты опытов с такими материалами подтверждают формулу Гриффитса для критического напряжения. Однако величина эффективной поверхностной энергии, определенная из этих измерений, оказывается гораздо больше поверхностной.

Аналогичным образом рассмотрим ситуацию, когда трещина формируется и развивается в теле из ферромагнитного материала, находящегося в намагниченном состоянии. Будем рассматривать два крайних случая расположения трещины по отношению к намагничивающему полю – параллельно полю и перпендикулярно (рисунок 1). Индукция намагничивающего поля в ферромагнетике $B_0 = \mu_0 H_0$ (μ_0 – магнитная постоянная, H_0 – напряженность намагничивающего поля) обычно на два-три порядка меньше индукции магнитного поля в веществе B_m .

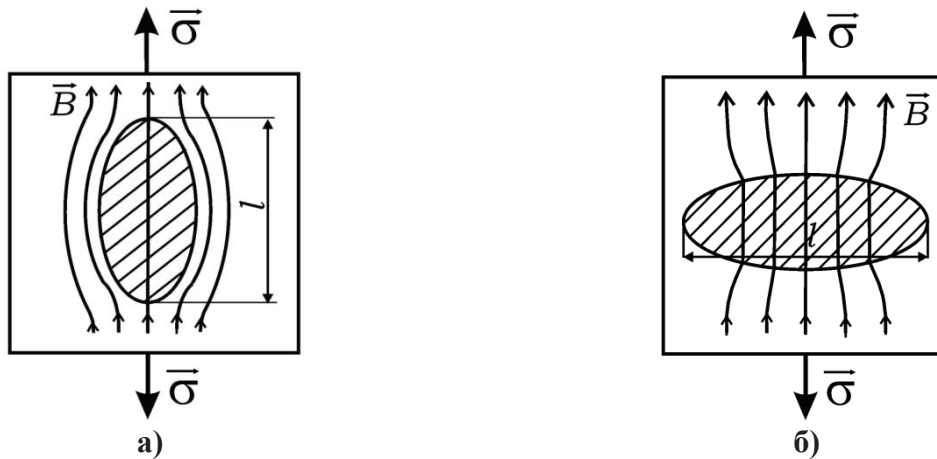


Рисунок 1. Топография магнитного поля в области продольной (а) и поперечной (б) трещины

После раскрытия трещины в ней появится магнитное поле, объемная плотность энергии которого выражается так:

$$f_B = \frac{BH}{2} = \frac{B^2}{2\mu_0}, \quad (6)$$

где: H , B – напряженность и индукция магнитного поля в полости трещины.

Здесь учтено, что внутри трещины $H = \frac{B}{\mu_0}$. Объемная энергия в однородно намагниченном веществе:

$$f_{B_m} = \frac{B_m H_0}{2}. \quad (7)$$

Для расчета полной энергии магнитного поля в полости трещины необходимо знать характерный поперечный размер трещины. Если в соответствии со сделанными предположениями напряжения релаксировали в области l , то в соответствии с законом Гука характерный поперечный размер трещины h можно выразить так: $h = \frac{\sigma l}{E}$. Тогда энергия магнитного поля в расчете на единицу длины трещины равна:

$$F_B \cong \frac{B^2}{2\mu_0} \cdot \frac{\sigma l^2}{E}. \quad (8)$$

Выразим эту энергию через индукцию магнитного поля в веществе B_m и напряженность намагничивающего поля H_0 , т.е. через величины, которые легко определяются. Поскольку трещина очень узкая, то при исходном расположении ее по направлению вектора намагниченности силовые линии индукции магнитного поля будут ее огибать. Индукция магнитного поля в трещине $B = \mu_0 H_0$, и, значит, энергия поля равна:

$$F_{B1} \cong \frac{\mu_0 H_0^2}{2} \cdot \frac{\sigma l^2}{E}. \quad (9)$$

В другом случае, когда трещина расположена перпендикулярно вектору намагниченности, силовые линии проходят через трещину, и поэтому поле в ней будет существенно выше: $B = B_m$. Энергия магнитного поля при таком расположении трещины равна:

$$F_{B2} \cong \frac{B_m^2}{2\mu_0} \cdot \frac{\sigma l^2}{E}. \quad (10)$$

Из приведенных формул следует, что свободная магнитная энергия тела при образовании продольной трещины несколько уменьшается, а при образовании продольной трещины существенно возрастает.

Легко показать, что изменение энергии магнитного поля при образовании поперечной трещины сравнимо с поверхностной энергией, а в случае продольной много меньше последней. Поэтому, вряд ли следует ожидать влияние магнитного состояния материала на динамику трещины, расположенной вдоль поля.

Проведя энергетические расчеты характеристик трещины с учетом магнитного состояния тела, получим выражение для критической ширины трещины:

$$l_c \cong \frac{2\gamma}{\frac{\sigma^2}{E} - \frac{B_m^2}{\mu_0} \cdot \frac{\sigma}{E}}. \quad (11)$$

Видно, что критическая ширина тем больше, чем больше магнитная энергия по сравнению с упругой энергией. Проводя оценочные расчеты длины трещины для различных ферромагнитных материалов, можно сделать вывод, что магнитное поле влияет на ее критическое значение на уровне не выше 1 – 10% в диапазоне растягивающих напряжений 10^7 – 10^8 Па.

Критическое напряжение в присутствии магнитного поля в веществе приблизительно равно:

$$\sigma_c \cong \sqrt{\frac{2\gamma E}{l} - \frac{B_m^4}{4\mu_0}}. \quad (12)$$

Из приведенной формулы оценить влияние магнитного поля на величину критического поля затруднительно, поскольку отсутствуют надежные данные по критическим длинам трещин в различных материалах.

Если рассматривать процесс образования трещины с силовых позиций, то влияние магнитного поля сводится к тому, что магнитное притяжение между стенками трещины уменьшает действие растягивающих механических напряжений. Удельная магнитная сила притяжения стенок (магнитное напряжение) можно приближенно определить по формуле:

$$\sigma_B \cong \frac{B_m^2}{2\mu_0}. \quad (13)$$

Порядок ее величины в ферромагнитных материалах может достигать 10^6 Па. Следовательно, магнитные силы могут повлиять только на разрушение не самых прочных материалов. Следует добавить, что в случае продольной трещины магнитные силы также способствуют закрытию трещины, но величина их на 2 – 3 порядка меньше, и с этих позиций их роль тоже несущественна.

При контакте твердого тела с поверхностно-активной средой поверхностная энергия тела понижается, и поэтому снижается прочность тела (эффект Ребиндера). Прочность твердого тела может понизиться вплоть до 10^6 Па, и тогда роль магнитного поля в предотвращении разрушения тела может быть очень существенной. В трибологии такой случай вполне может наблюдаться, когда на поверхность трения нанесено смазочное масло или когда металлическая поверхность покрыта тонкой легкоплавкой пленкой.

Известно, что в условиях гидростатического давления прочность тел возрастает, в частности из-за того, что после снятия внешних растягивающих напряжений происходит «схлопывание» трещины и материал как бы залечивается. Магнитная сила, действующая на стенки трещины, может аналогичным образом способствовать восстановлению прочности материалов поверхности трения. Такой механизм действия магнитного поля может в полной мере проявиться, если на внутренней поверхности трещины не успел сформироваться адсорбционный слой из молекул внешней среды.

Из выше сказанного следует, что магнитное состояние материала поверхности трения наиболее существенно влияет на процесс его хрупкого или квазихрупкого разрушения, если трещины раскрываются перпендикулярно вектору намагниченности. В магнитном поле критическое напряжение самопроизвольного роста трещины увеличивается, причем эффект тем выше, чем ближе прочность материала к значению порядка 10^6 Па.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 14-08-97500).

Литература

1. Болотов А.Н. Роль магнитного поля при трении поверхностей, смазанных магнитным маслом / А.Н. Болотов, Г.С. Елисеева, Ю.О. Михалев // Трение и износ. 1988. Т. 9. № 5. С. 870 – 878.
2. Постников С.Н. Электрические явления при трении и резании / С.Н. Постников. – Горький: Волго-Вят. кн. изд-во. 1975. 236 с.
3. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. 176 с.
4. Делюсто Л.Г. Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях / Л.Г. Делюсто. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.
5. Болотов А.Н. Триботехника магнитопассивных опор скольжения: монография / А.Н. Болотов, В.Л. Хренов. Федеральное агентство по образованию. – Тверской гос. технический ун-т.: Тверь, 2008. 124 с.
6. Bolotov A.N. Magneto-liquid sliding bearings / Bolotov A.N., Novikov V.V., Pavlov V.G. // Трение и износ. 2004. Т. 25. № 3. С. 286-291.