

the dominant factor, the targeted change of which can be used to reduce the contact resistance, remains the number of contact areas of the roughness peaks. An example of such a targeted change in this contact parameter is given.

Keywords: contact of rough surfaces, contact area, number and size of contact areas, contact resistance, constriction resistance, roughness.

Поступила в редакцию/received: 09.01.2024; после рецензирования/ revised: 24.01.2024;
принята/accepted: 30.01.2024

УДК 621.03

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА

А.Н. БОЛОТОВ, д-р техн. наук

Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: ac.tstu.tver@mail.ru

© Болотов А.Н., 2024

Работа посвящена изучению влияния стационарного магнитного поля на квазихрупкое разрушение образцов из ферромагнитного материала – чугуна марки СЧ35. Показано, что в намагниченных образцах наблюдается анизотропный характер квазихрупкого разрушения, а величина механических напряжений, при которых происходит разрушение, несколько снижается. Доминируют трещины, которые начинают распространяться вдоль силовых линий магнитного поля. Сделано обоснованное предположение, что магнитные силы, действующие на стенки микротрещины, стимулируют ее рост при более низких механических напряжениях. Магнитные силы пропорциональны намагниченности образцов во второй степени. Максимальный эффект от действия магнитного поля проявляется в образцах, намагниченных до насыщения, и это условие определяет величину напряженности намагничивающего поля.

Ключевые слова: серый чугун, магнитное поле, микротрещины, квазихрупкое разрушение.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-2-15-22

ВВЕДЕНИЕ

Проблема влияния внешних полей на свойства материалов давно привлекает интерес ученых, но до сих пор далека от решения [1–4]. Установлено сильное влияние магнитного поля на механические свойства немагнитных материалов, но, как отмечается, необходимы дальнейшие исследования для понимания физической сущности процессов. Было показано, что для образцов из полиэтилентерефталата наблюдается хрупкое разрушение в магнитном поле, тогда как без поля образцы растягиваются до 300...350 %; для полимеров зафиксировано снижение модуля упругости в магнитном поле примерно в 2,5 раза; показано замедление релаксационных процессов в магнитном поле. На текущий момент удалось лишь качественно объяснить наблюдаемые эффекты [1, 2].

В последние годы появляется все больше работ, посвященных влиянию стационарного магнитного поля на механические свойства ферромагнитных металлов. Повышенный интерес к этой теме объясняется возможностью управлять процессами,

протекающими на межфазных поверхностях при фрикционном взаимодействии, и оптимизировать энергозатраты при обработке материалов в магнитном поле. Присутствие постоянного магнитного поля при трении или деформации металлов не требует дополнительных источников энергии, однако способно оказывать влияние на физико-механические процессы. В научных работах [5–7] отмечается, что воздействие стационарного магнитного поля изменяет показатели прочности, пластичности и других механических и эксплуатационных свойств металла.

Влияние магнитного поля на ферромагнитные стали при комнатной температуре приводит к изменению модуля Юнга из-за магнитоупругости [6] и характера пластической деформации из-за магнитопластичности [7].

Имеется несколько противоречивых данных о влиянии сильных магнитных полей на механические свойства различных магнитных материалов. Установлено, что усталостная долговечность чистого железа снижается в насыщающем магнитном поле при комнатной температуре [8] в связи с усилением подвижности дислокаций и деформационным старением. Однако никаких дальнейших микроскопических исследований, подтверждающих это предположение, не проводилось. Предел пропорциональности стали Еврофер-97 увеличен на ~2,6 % в поперечном магнитном поле 1,5 Тл, при этом предел прочности при растяжении и относительное удлинение увеличиваются менее чем на 1 % [7]. На основании выполненных исследований в основном выделяют два механизма, относящиеся к влиянию магнитного поля на механические свойства магнитных материалов: фазовое превращение и взаимодействие между дислокациями и стенками магнитных доменов.

Отдельно стоит изучение влияния стационарных магнитных полей на разрушение магнитных материалов. Решение этой проблемы позволит повысить надежность многих технических устройств за счет рационального использования магнитных полей. Например, 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. Кроме того, конструкция многих современных трибоузлов предполагает наличие магнитных полей [9].

Исследования влияния стационарного магнитного поля на разрушение ферромагнитных тел, проводятся давно и достаточно активно. В основном изучаются не элементарные акты разрушения или механизмы разрушения в магнитном поле, а многопараметрические процессы, в которых трудно выделить и оценить именно роль магнитного поля. Это относится к работам, в которых делаются попытки установить влияние магнитного поля, например, на износ образцов при трении, механическое диспергирование или на процессы резания в металлообработке [9–11]. Интерпретация и анализ известных из литературы результатов испытаний в магнитном поле, как правило, затруднены из-за пренебрежительного отношения к вопросам строгого контроля магнитного состояния образцов и топографии магнитного поля. Поэтому методические недостатки при выполнении опытов приводят к плохой воспроизводимости установленных данных и низкой общности полученных результатов.

Цель работы заключается в том, чтобы экспериментально установить связь между направлением вектора индукции магнитного поля в ферромагнитном материале и направлением преимущественного роста трещин при разрушении, а также оценить изменение напряжения хрупкого разрушения образцов при однородном намагничивании до состояния, близкого к магнитному насыщению.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Изучалось хрупкое разрушение образцов при внедрении в них шарового индентора. Поскольку при такой схеме нагружения в неограниченном пространстве создается осесимметричное поле напряжений, все направления распространения радиальных хрупких трещин равновероятны. Для того чтобы такая симметричная картина поля напряжений не исказилась при исследовании реальных образцов, их изготавливали в форме дисков диаметром 24 мм и высотой 4 мм. Материал образцов – чугун марки СЧ 35 (ГОСТ 1412-85). Образцы вырезались из массивной заготовки для исключения технологически наведенной анизотропии механических свойств. По магнитным свойствам исследуемый чугун можно отнести к магнитомягким изотропным материалам с ферромагнитной природой спонтанной намагниченности. Проведенные металлографические исследования подтвердили следующее:

- форма включений графита (ГОСТ 3443-87) пластинчатая прямолинейная;
- распределение включений неравномерное;
- площадь, занимаемая графитом, составляет 5...8 % от общей площади исследуемой поверхности шлифа;
- длина включений графита 120...250 мкм;
- металлическая основа в чугуне перлитная;
- содержание феррита 2...6 %.

Шаровой индентор диаметром 5 мм был выполнен из закаленной стали ШХ15 (ГОСТ 801-2022), имеющей существенно более высокую твердость, чем материал образцов. Индентор внедрялся в центр торцевой поверхности образцов нормальной к поверхности силой с помощью винтового пресса. Для определения величины силы, действующей на шар, использовался тарированный динамометр. Поскольку время нагружения на несколько порядков превосходит характерное время распространения упругой волны в образце, процесс нагружения можно считать близким к статическому.

Для создания в образцах однородного магнитного поля использовалась магнитная намагничивающая система (рис. 1), от которой требовалось, чтобы образец имел однородную намагниченность и радиальную текстуру. Источниками магнитного поля служили постоянные магниты 1, 2 в виде сегментов, выполненные из сплава SmCo_5 марки КС-37 и имеющие радиальную намагниченность. Магнитный поток замыкается через кольцевой магнитопровод 3, изготовленный из магнитомягкой стали 10. Исследуемый образец 4 в виде шайбы помещался в зазор между постоянными магнитами.

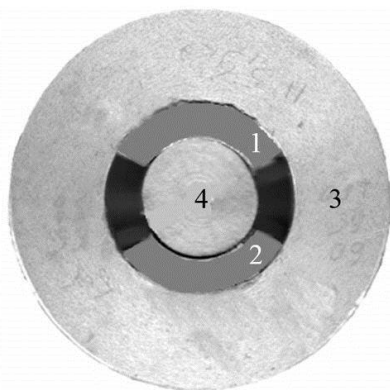


Рис. 1. Изображение магнитной системы в сборе

Для анализа топографии магнитного поля в образце использовали компьютерную программу Elcut для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов. Для тестирования программы сравнивали определенные с помощью тесламетра Ф4354 экспериментальные значения напряженности намагничивающего поля в зазоре между магнитами и рассчитанные значения. Последние отличались от экспериментальных не более чем на 7%, что свидетельствует о достаточно высоком качестве численного моделирования магнито-статического поля.

На рис. 2 показана картина силовых линий магнитного поля в образце и окружающем пространстве. Из соображений симметрии магнитного поля на рисунке приведена лишь четвертая часть магнитной системы. Как и предполагалось, векторы индукции магнитного поля в разных точках образца имеют радиальное направление и являются коллинеарными между собой.

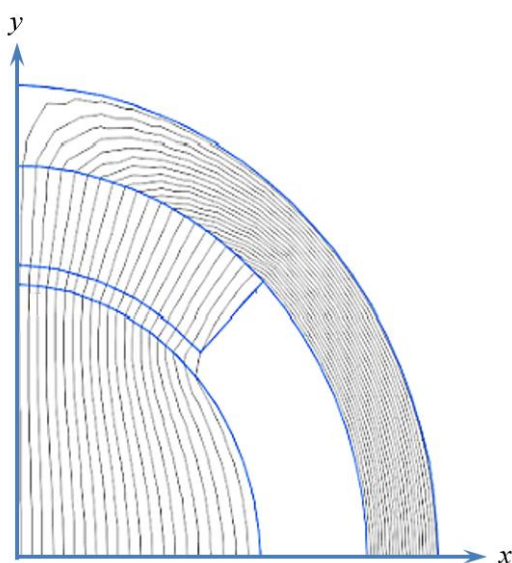


Рис. 2. Топография магнитного поля

Магнитное состояние образца (если судить по величине индукции магнитного поля) приближено к состоянию, соответствующему технической намагниченности насыщения для выбранного материала. Поэтому магнитные междоменные границы в образце присутствуют в незначительном количестве и дальнейшее намагничивание образца возможно лишь посредством вращения вектора намагниченности. Важно отметить, что намагничивание образца происходит в незамкнутой магнитной цепи, и поэтому в нем существует размагничивающее поле, пропорциональное намагниченности материала образца. Для чугуна напряженность внутреннего намагничивающего поля должна быть примерно $2 \cdot 10^4$ А/м или чуть выше, чтобы материал находился в состоянии магнитного насыщения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При постепенном внедрении индентора в образец происходило образование радиальных трещин (рис. 3), которые быстро увеличивались по длине до краев образца, что приводило к разделению образцов на части. Наблюдались только две, три и (реже) четыре магистральных трещины, разрушающие образец.

Две трещины имели более 30 % образцов, три – 40 % и четыре менее 30 %. Количество трещин не зависело от магнитного состояния образцов. После разрушения образца на его поверхности оставалась лунка от индентора. Значит, радиальные трещины зарождались после выхода пластических деформаций материала на поверхность. Это подтверждается классическими работами по механике контактного взаимодействия [12]. Боковые трещины, которые могут образовываться при разгрузке пластически деформированного образца, в наших опытах не наблюдались.



Рис. 3. Внешний вид образцов после разрушения

На рис. 4 представлено изображение поверхности излома одного из образцов чугуна. Разрушение протекало без заметной предшествующей пластической деформации. Поверхность излома блестящая, кристаллическая. Разрушение происходило по границам зерен.



Рис. 4. Изображение поверхности излома

Контактное взаимодействие между жестким шаром и плоскостью изучалось в ряде работ, среди которых следует особо отметить монографию К. Джонсона [12]. Установлено, что пока деформируемый шаром материал находится в упругом состоянии, тангенциальные напряжения на поверхности являются растягивающими, а радиальные – сжимающими. После того как материал поверхности переходит в упругопластическое состояние, напряжения меняют знак: радиальные напряжения становятся растягивающими, а тангенциальные – сжимающими. Переход от радиального растяжения в чисто упругом состоянии к растяжению в тангенциальном направлении в упругопластическом состоянии существенно предопределяет механизм разрушения при внедрении индентора: от образования кольцевых трещин в хрупких материалах к развитию радиальных трещин в квазихрупких (полухрупких) материалах.

Характерные для хрупкого разрушения множественные кольцевые трещины, образующиеся вблизи зоны внедрения и под индентором, развиваются в систему конусных трещин, что приводит к образованию многочисленных мелких осколков. Такого явления в чистом виде в наших опытах не наблюдалось. Поэтому разрушение чугуна происходило скорее по квазихрупкому механизму, чем по хрупкому, как указывается в ряде литературных источников.

В пользу квазихрупкого разрушения образцов свидетельствует и наличие в материале под индентором одной конусообразной трещины (конус Герца) [13], которая выходит на тыльную поверхность и в отдельных случаях приводит к отделению частиц материала и образованию сквозного отверстия. Диаметр этой трещины в 2...3 раза меньше отпечатка индентора. Вероятно, эта трещина развилась из кольцевой, образовавшейся на начальной стадии нагружения. Специфических особенностей образования конических трещин в магнитном поле отмечено не было.

Исследования показали, что разрушение в магнитном поле имеет две важные взаимообусловленные особенности. В большинстве (более 85 %) образцов наблюдается распространение одной или двух радиальных трещин в направлении, близком к направлению магнитного поля. В остальных образцах радиальные трещины были расположены по нормали к силовым линиям магнитного поля. Отклонение направления распространения трещины от направления магнитного поля не превышало 10...15°.

Другая особенность разрушения образцов в магнитном поле вытекает из статистического анализа полученных значений критической силы вдавливающей индентор и инициирующей его разрушение. Критическая сила составляла $15,4 \pm 0,9$ кН для размагниченных образцов и $13,4 \pm 0,8$ кН для намагниченных. Значит, для зарождения и развития трещин в намагниченных образцах требуется приложить силу примерно на 10...15 % ниже.

Принято считать, что макротрещины, приводящие к разрушению, как правило, начинают развиваться из микротрещин, расположенных в образце. В основном микротрещины появляются после сдвиговых деформаций и образуются по дислокационному механизму или за счет движения границ зерен. Учитывая предысторию образцов для исследований и осесимметричный характер контактных деформаций, можно полагать, что микротрещины расположены в определенном порядке, но этот порядок не может задавать доминирующее направление распространения макротрещин. Поэтому, как и следует из опытов, в отсутствие магнитного поля все направления распространения макротрещин равновероятны. В магнитном поле картина меняется: проявляется анизотропный характер направления движения трещин. Причина, очевидно, заключается в том, что магнитное поле стимулирует развитие трещин вдоль силовых линий магнитного поля.

В работе [14] такой эффект предсказывался на основе рассмотрения теории разрушений А. Гриффитса применительно к намагниченным телам. С энергетической позиции эффект объясняется зависимостью энергии магнитного поля в объеме трещины от ее расположения, с силовой – магнитным взаимодействием между стенками трещины. В дополнение к результатам работы [14] приведем выражения для магнитного давления P_m , действующего на стенки микротрещины, растущей вдоль вектора индукции магнитного поля:

$$P_m \cong \frac{B_r^2}{2\pi\mu_0} \frac{h}{r},$$

где B_r – индукция магнитного поля в веществе; μ_0 – магнитная постоянная; h, r – длина трещины и среднее расстояние между ее стенками. Магнитное давление на стенки трещины P_m , так же как растягивающие напряжения, способствует ее росту. Оценочные расчеты для образцов из чугуна показывают, что давление P_m в зависимости от размеров микротрещины может изменяться в диапазоне $10^6 \dots 10^7$ Па. Следовательно, магнитное давление может составлять более 10 % от напряжений, приводящих к разрушению чугуна, и поэтому оно стимулирует преимущественный рост трещин вдоль магнитного поля.

Из приведенной формулы вытекает, что максимальное давление, способствующее раскрытию трещины, возникает в материалах, намагниченность которых близка к намагниченности технического насыщения. Поэтому напряженность внешнего намагничивающего поля с учетом формы и размеров образцов должна быть достаточной для намагничивания образцов до насыщения; дальнейшее увеличение внешнего поля не приведет к усилению его влияния на процесс разрушения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. В намагниченных ферромагнитных материалах наблюдается анизотропный характер квазихрупкого разрушения, а величина механических напряжений, при которых оно происходит, несколько снижается. Доминируют трещины, распространяющиеся вдоль силовых линий магнитного поля. Физическая причина, приводящая к механической анизотропии материалов в магнитном поле, по-видимому, заключается в действии отталкивающих магнитных сил между стенками трещины. Этим же объясняется снижение критического напряжения разрушения в магнитном поле.

2. Полученные результаты могут найти применение для искусственного стимулирования хрупкого разрушения ферромагнитных деталей или наоборот для затруднения разрушения.

3. Установление детального механизма разрушения в магнитном поле требует дополнительных исследований с использованием более широкого круга ферромагнитных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров П.А., Бударягин В.В., Шахов М.Н., Никанорова Н.И., Трофимчук Е.С. Механические свойства некоторых материалов в магнитном поле // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*. 2006. № 1. С. 24–30.

2. Якушев П.Н. Деформация твердых полимеров в постоянном магнитном поле // *Физика твердого тела*. 2003. Т. 45. № 6. С. 1130–1134.

3. Афанасьева Л.Е., Кобозев И.Ю. Влияние внешнего электрического поля на глубину проплавления при лазерной сварке сталей // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2021. № 4 (12). С. 32–37.

4. Afanas'eva L.E., Barabonova I.A., Zorenko P.O., Yakovlev I.A., Grechishkin R.M., Grezev A.N., Grezev N.V. Laser Welding in External Electrical and Magnetic Fields // *Welding International*. 2013. V. 27. № 7. P. 545–547.

5. Qi K., Yang Y., Sun R., Hu G., Lu X., Li J., Xiong L. Effect of Magnetic Field on Crack Control of Co-based Alloy Laser Cladding // *Optics & Laser Technology*. 2021. V. 141. P. 107129.

6. Molotskii M.I. Theoretical Basis for Electro- and Magnetoplasticity // *Materials Science and Engineering: A*. 2000. V. 287. № 2. P. 248–258.
7. Wang Y.Q., Gorley M., Kabra S., Surrey E. Influence of a 1.5 T Magnetic Field on the Tensile Properties of Eurofer-97 Steel // *Fusion Engineering and Design*. 2019. V. 141. P. 68–72.
8. Болотов А.Н., Хренов В.Л. Триботехника магнитопассивных опор скольжения: монография. Тверь: ТГТУ, 2008. 124с.
9. Делюсто Л.Г. Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях. М.: Машиностроение. 2005. 272 с.
10. Малыгин Б.В., Бень А.П. Магнитное упрочнение изделий (Теория и практика). Херсон: Херсонский государственный морской институт, 2009. 352 с.
11. Болотов А.Н. Механизм фрикционного разрушения поверхностей в магнитном поле // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2020. № 2 (6). С. 14–20.
12. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
13. Морозов Е.М., Зернин М.В. Контактные задачи механики разрушения. М.: Либроком, 2010. 544 с.
14. Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. Влияние магнитного поля на образование и развитие микротрещин при трении // *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*. 2015. Т. 4. № 1 (23). С. 5–9.

Для цитирования: Болотов А.Н. Влияние магнитного поля на хрупкое разрушение ферромагнитного материала // *Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки»*. 2024. № 2 (22). С. 15–22.

INFLUENCE OF MAGNETIC FIELD ON BRITTLE DESTRUCTION OF FERROMAGNETIC MATERIAL

A.N. BOLOTOV, Dr. Sc.

Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: ac.tstu.tver@mail.ru

The work is devoted to the study of the influence of a stationary magnetic field on the quasi-brittle fracture of specimens made of a ferromagnetic material – cast iron grade SCh35. It is shown that the anisotropic nature of quasi-brittle fracture is observed in magnetized samples, and the value of mechanical stresses at which fracture occurs somewhat decreases. Cracks dominate, which begin to propagate along the magnetic field lines. A reasonable assumption is made that the magnetic forces acting on the walls of a microcrack stimulate its growth at lower mechanical stresses. The magnetic forces are proportional to the magnetization of the samples to the second power. The maximum effect of the magnetic field is manifested in samples magnetized to saturation, and this condition determines the magnitude of the magnetizing field.

Keywords: gray cast iron, magnetic field, microcracks, quasi-brittle fracture.

Поступила в редакцию/received: 16.01.2024; после рецензирования/ revised: 24.01.2024;
принята/accepted: 30.01.2024