
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621.03

КВАЗИХРУПКОЕ РАЗРУШЕНИЕ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

© 2024 г. А. Н. Болотов¹, Л. Е. Афанасьева^{1, *}, В. И. Гульятев¹, А. А. Алексеев¹

¹Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия

*e-mail: ludmila.a@mail.ru

Поступила в редакцию 01.08.2023 г.

После доработки 20.11.2023 г.

Принята к публикации 15.12.2023 г.

Изучено формирование и развитие трещин в образцах из ферромагнитного материала — чугуна марки СЧ 35, находящихся в однородно намагниченном состоянии под влиянием внутреннего магнитного поля с напряженностью более 20 кА/м. Показан анизотропный характер квазихрупкого разрушения и величина механических напряжений, при которых разрушение происходит. Доминируют трещины, распространяющиеся вдоль силовых линий магнитного поля. Возможная причина этого заключается в магнитном взаимодействии между поверхностями микротрещины.

Ключевые слова: ферромагнитные материалы, магнитное поле, микротрещины, квазихрупкое разрушение

DOI: 10.31857/S0235711924020025, EDN: QWMHVD

Проблема влияния стационарных магнитных полей различной напряженности на свойства сплавов давно привлекает интерес ученых, но до сих пор далека от решения. Установлено заметное влияние магнитного поля на механические свойства немагнитных материалов, но необходимы дальнейшие исследования для понимания физической сущности процессов [1, 2]. Было показано, что для образцов из полиэтилентерефталата наблюдается хрупкое разрушение в магнитном поле, тогда как без поля образцы пластичны и способны растягиваться до 300–350%; для полимеров зафиксировано снижение модуля упругости в магнитном поле примерно в 2.5 раза; происходит замедление релаксационных процессов в магнитном поле. Наблюдаемые эффекты на текущий момент получили лишь качественное объяснение.

Известно, что влияние статического магнитного поля может изменить деформационные характеристики ионных, ионно-ковалентных, ковалентных, молекулярных и металлических неферромагнитных тел [1, 3–5]. Наблюдаемый магнитопластический эффект объясняют движением дислокаций в кристаллах под действием внешнего магнитного поля с индукцией 0.1 Тл и выше. Магнитопластический эффект проявляется в виде изменения механических характеристик твердых тел: пластичности, прочности и т. д. В присутствии магнитного поля магнитопластический эффект может быть долговременным или даже необратимым. Например, при испытании на усталость образцов латуни количество циклов до разрушения снижается прибли-

зительно в 2 раза, а на разрушение образцов из алюминия магнитное поле практически не влияет [1]. В то же время полученные результаты [5] при относительно слабых магнитных полях не вызвали доверия у многих специалистов, которые склонны расценивать их как артефакты.

Из общих соображений, неоднократно затем подтвержденных в ряде независимых работ, вытекает, что ввиду малости магнитной энергии электрона при комнатной температуре можно наблюдать большие эффекты только в системах, далеких от термодинамического равновесия. В этом случае магнитное поле играет роль спускового крючка, радикально увеличивающего скорость релаксационных процессов. Показано, что увеличение степени неравновесности путем соответствующей термообработки, освещения видимым светом, рентгеновским облучением и другими воздействиями приводит к увеличению чувствительности материала к магнитному полю, в то время как отжиг, старение — к ее снижению в том же материале вплоть до нуля [5, 6].

В последние годы появляется все больше работ по изучению влияния стационарного магнитного поля на механические свойства ферромагнитных металлов. В основе повышенного интереса к этой теме является возможность влиять на процессы, протекающие на межфазных поверхностях при фрикционном взаимодействии и оптимизации энергозатрат при обработке материалов в магнитном поле. Присутствие постоянного магнитного поля при трении или деформации металлов не требует источников энергии, однако способно повлиять на физико-механические процессы. В работах [7–14] отмечается, что воздействие стационарного магнитного поля изменяет характеристики прочности, пластичности и других механических и эксплуатационных свойств сплавов.

Влияние магнитного поля на ферромагнитные стали при комнатной температуре приводит к изменению модуля Юнга из-за магнитоупругости [12] и характера пластической деформации из-за магнитопластичности [13].

Есть несколько противоречивых данных о влиянии сильных магнитных полей на механические свойства различных магнитных материалов. Подтверждено, что усталостная прочность чистого железа снижается в насыщающем магнитном поле при комнатной температуре [7], что обусловлено усилением подвижности дислокаций и деформационным старением. Однако никаких дальнейших микроскопических исследований, подтверждающих это предположение, не проводилось. Также известно, что модуль упругости и пластичность углеродистой стали немного снижаются в магнитном поле за счет изменения процентного содержания ферритной фазы [10]. Напротив, предел пропорциональности стали Еврофер-97, основного конструкционного материала, предназначенного для элементов корпуса термоядерного токамака EU DEMO, увеличивается на ~2.6% в поперечном магнитном поле величиной 1.5 Тл, при этом предел прочности на растяжение и относительное удлинение возрастают незначительно, менее 1% [14]. 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 проблема изучения влияния стационарных магнитных полей на разрушение ферромагнитных 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 [15].

Исследования, направленные на изучение влияния стационарных магнитных полей 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 авторы пытаются установить влияние магнитного поля, например, на износ образцов при трении, механическое диспергирование или на процессы резания в металлообработке [16–19]. Интерпретация и анализ известных из литературы результатов испытаний в магнитном поле, как правило, затруднена из-за пренебрежительного отношения к вопросам строгого контроля магнитного состояния образцов и топографии магнитного поля. Поэтому методические недостатки в процедуре выполнения опытов приводят к плохой воспроизводимости установленных данных, и значит, общность полученных результатов низкая.

Цель статьи – 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 и исследуемые образцы. Изучалось хрупкое разрушение образцов при внедрении в них шарового индентора. При такой схеме нагружения в неограниченном полупространстве создается осесимметричное поле напряжений, и поэтому все направления распространения радиальных хрупких трещин равновероятны. Для того чтобы такая симметричная картина поля напряжений не искажалась при исследовании реальных образцов, их изготавливали в форме дисков диаметром 28 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.

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 намагничивающая система, схема которой показана на рис. 1. Основное требование к магнитной системе – обеспечение в образце однородной намагниченности и радиальной текстуры. Источниками магнитного поля служили постоянные магниты в виде сегментов из сплава SmCo_5 марки КС-37 (ГОСТ 21559–76) с радиальной намагниченностью. На схеме магниты отмечены цифрами 1 и 2. Магнитный поток замыкался через кольцевой магнитопровод, изготовленный из магнитомягкой стали 10 (ГОСТ 1050–2013). Исследуемый образец в виде шайбы помещался в зазор между постоянными магнитами.

Для анализа топографии магнитного поля в образцах использовали компьютерную программу Elcut для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов. Для тестирования программы сравнивали определенные с помощью прибора тесламетра Ф4354 экспериментальные

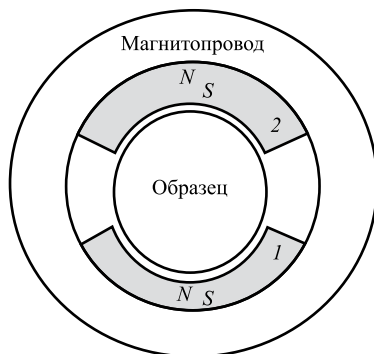


Рис. 1. Схема магнитной системы.

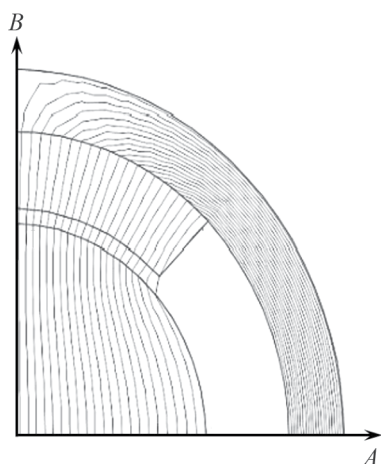


Рис. 2. Топография магнитного поля.

значения напряженности намагничивающего поля в зазоре между магнитами и рассчитанные значения. Расчетные значения поля отличались от экспериментально установленных не более чем на 7%, что свидетельствует о достаточно высоком качестве численного моделирования магнитостатического 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, картина магнитного поля (рис. 2) подтверждает, что векторы индукции магнитного поля в разных точках образца имеют радиальное направление и являются коллинеарными между собой.

Приведенные на рис. 3 графики изменения индукции магнитного поля вдоль направлений A и B (рис. 2) свидетельствуют о том, что наряду с однородностью магнитного поля в образце достигается и однородность его намагниченности (отклонение от однородности в пределах нескольких процентов) в области интенсивных

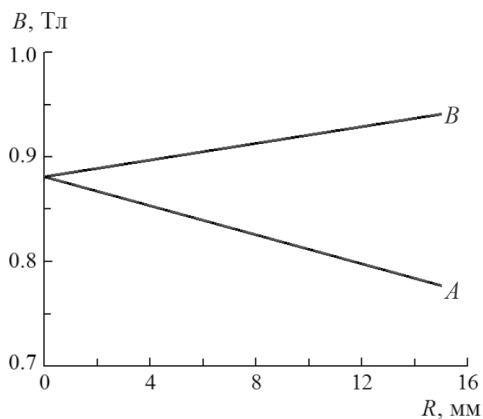


Рис. 3. Изменение индукции магнитного поля в образцах вдоль радиусов.

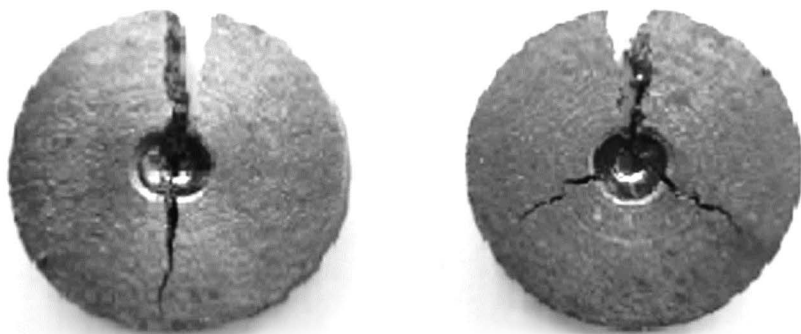


Рис. 4. Внешний вид образцов после разрушения.

пластических деформаций, возникающих при внедрении индентора. Магнитное состояние образца, если судить по величине индукции магнитного поля, находится близко от состояния, соответствующего технической намагниченности насыщения для выбранного материала. Поэтому магнитные междоменные границы в образце присутствуют в незначительном количестве, и дальнейшее намагничивание материала может происходить 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, чтобы образец находился в состоянии магнитного насыщения, напряженность внутреннего размагничивающего поля должна быть примерно $2 \cdot 10^4$ А/м.

Результаты опытов и их обсуждение. При постепенном внедрении индентора в образец происходило образование радиальных трещин (рис. 4), которые быстро

увеличивались по длине до краев образца, и это приводило к разделению образцов на части. Наблюдалось только две, три и реже четыре магистральных трещины, разрушающие образец; угловое расстояние между трещинами было приблизительно одинаковым, т. е. около 90, 120 или 180°.

Две трещины имели более 30% образцов, три — около 40% и четыре — менее 30%. Количество трещин не зависело от магнитного состояния образцов. Возможно, что количество радиальных трещин зависит от неоднородности структуры и состава материала образцов.

После разрушения образца на поверхности оставалась лунка от индентора. Значит, зарождение радиальных трещин происходило после выхода пластических деформаций материала на поверхность, и это подтверждается классическими работами по механике контактного взаимодействия [20]. Боковые трещины, которые могут образовываться при разгрузке пластически деформированного образца, в наших опытах не наблюдались.

Контактное взаимодействие между жестким шаром и плоскостью изучалось во многих работах, среди которых следует особо отметить монографию К. Джонсона [20]. 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, 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, многочисленные кольцевые трещины, образующиеся около зоны внедрения и под индентором, развиваются в систему конусных трещин и приводят к образованию многочисленных мелких осколков. Такого явления в чистом виде в наших опытах не наблюдалось. Поэтому разрушение чугуна происходило скорее по квазихрупкому механизму, чем хрупкому, как указывается во многих литературных источниках.

В пользу квазихрупкого разрушения образцов свидетельствует и наличие в материале под индентором одной конусообразной трещины (конус Герца) [21], которая выходит на тыльную поверхность и в отдельных случаях приводит к отделению частиц материала и образованию сквозного отверстия. Диаметр этой трещины под индентором в 2–3 раза меньше его отпечатка. Вероятно, эта трещина развивается 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 образцов (около 85%) наблюдается распространение одной или двух радиальных трещин в направлении, близком к направлению магнитного поля. Отклонение направления распространения трещины от направления магнитного поля не превышало 10–15°. Остальные радиальные трещины были расположены преимущественно по нормали к силовым линиям магнитного поля.

Другая особенность вытекает из статистического анализа полученных значений критической силы, вдавливающей индентор и инициирующей разрушение. Критическая сила для размагниченных образцов составляла 15.4 ± 0.9 кН, для намагниченных 13.4 ± 0.8 кН. Значит для зарождения и развития трещин в намагниченных образцах требуется приложить силу примерно на 10–15% ниже.

Принято считать, что макротрещины, приводящие к разрушению, начинают развиваться из микротрещин, имеющихся 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 отсутствии 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 [22] 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 поверхностями трещины.

В дополнение к результатам работы [22] приведем выражение для магнитного давления P_m , действующего на поверхности микротрещины, растущей вдоль вектора индукции магнитного поля:

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

где B_r — индукция магнитного поля в веществе; μ_0 — магнитная постоянная; h , r — длина трещины и среднее расстояние между поверхностями трещины. Магнитное давление на поверхности 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 – 10^7 Па. Значит 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, у которых намагниченность 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 приводит к усилению эффекта его влияния на процесс разрушения.

Заключение. Из полученных результатов вытекает, что в намагниченном ферромагнитном материале наблюдается анизотропный характер квазихрупкого разрушения, а величина механических напряжений, при которых разрушение происходит, несколько снижается. Доминируют трещины, которые распространяются вдоль силовых линий магнитного поля. Отсюда, в частности, становится понятно, что противоречивые результаты исследований разрушения материалов в магнитном поле, приведенные в некоторых литературных источниках, объясняются во многом пренебрежением строгим контролем топографии магнитного поля в образце.

Физическая причина, приводящая к механической анизотропии свойств материалов в магнитном поле, по-видимому, заключается в действии магнитных сил между поверхностями трещины. Этим же объясняется рост критического напряжения разрушения в магнитном поле. Магнитные силы пропорциональны намагниченности

образцов во второй степени. Максимальный эффект от действия магнитного поля наблюдается в образцах, намагниченных до насыщения. И это условие определяет величину напряженности намагничивающего поля.

Полученные результаты могут найти применение для искусственного стимулирования хрупкого разрушения ферромагнитных деталей или, наоборот, для затруднения разрушения. Появляется возможность управления свойствами материала с помощью внешнего магнитного поля или предотвращения каких-либо эффектов или повреждений, связанных с приложением поля в процессе эксплуатации машин и механизмов.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Тверского государственного технического университета. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров П. А., Бударагин 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.
2. Якушев П. Н. Деформация твердых полимеров в постоянном магнитном поле // Физика твердого тела. 2003. Т. 45. № 6. С. 1130.
3. Alshits V. I., Darinskaya E. V., Kazakova O. L., Petrzlik E. A. Magnetoplastic effect: basic properties and physical mechanisms // Crystallography Reports. 2003. V. 48 (5). P. 768.
4. Шляров В. В., Загуляев Д. В. Влияние магнитных полей на процесс пластической деформации цветных металлов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2019. Т. 16. № 3. С. 394.
5. Головин Ю. И. Магнитопластичность твердых тел // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. № 5. С. 769.
6. Коновалов С. В., Громов В. Е., Иванов Ю. Ф. Влияние электромагнитных полей и токов на пластическую деформацию металлов и сплавов. Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2013. 292 с.
7. Gu Q., Huang X., Xi J., Gao Z. The influence of magnetic field on fatigue and mechanical properties of a 35CrMo steel // Metals. 2021. V. 11. № 4. P. 542.
8. Bose M. S. C. Effect of saturated magnetic field on fatigue life of carbon steel // Physica status solidi (a). 1984. V. 86. № 2. P. 649.
9. Klypin A. A. Effect of magnetic and electric fields on creep // Metal Science and Heat Treatment. 1973. V. 15. № 8. P. 639.
10. Sidhom A. A. E., Sayed S. A. A., Naga S. A. R. The influence of magnetic field on the mechanical properties & microstructure of plain carbon steel // Materials Science and Engineering: A. 2017. V. 682. P. 636.
11. Stepanov G. V., Kharchenko V. V., Kotlyarenko A. A., Babutskii A. I. Effect of pulsed magnetic field treatment on the fracture resistance of a cracked specimen // Strength of Materials. 2013. V. 45. P. 154.
12. Белов К. П. Магнитострикционные явления и их технические приложения. М.: Наука, 1987. 160 с.
13. Molotskii M. I. Theoretical basis for electro-and magnetoplasticity // Materials Science and Engineering: A. 2000. V. 287. № 2. P. 248.
14. 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.
15. Болотов А. Н., Хренов В. Л. Триботехника магнитопассивных опор скольжения: монография. Тверь: Тверской гос. технический ун-т, 2008. 124 с.
16. Постников С. Н. Электрические явления при трении и резании. Горький: Волго-Вят. кн. изд-во, 1975. 236 с.

-
17. *Барон Ю. М.* Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. Л.: Машиностроение, 1986. 176 с.
 18. *Делюсто Л. Г.* Основы прокатки металлов в постоянных магнитных полях. М.: Машиностроение, 2005. 272 с.
 19. *Малыгин Б. В., Бень А. П.* Магнитное упрочнение изделий (Теория и практика). Херсон: Херсонский гос. морской институт, 2009. 352 с.
 20. *Джонсон К.* Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
 21. *Морозов Е. М., Зернин М. В.* Контактные задачи механики разрушения. М.: Либроком, 2010. 544 с.
 22. *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.