



Девяткин Д. С.

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ СПОНТАННОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ В КРИСТАЛЛАХ ЧИСТОГО ЖЕЛЕЗА

*Представлен анализ процессов в микроструктурах чистого железа при кристаллизации. Показано, что формирование спонтанного намагничивания кристаллов чистого железа происходит из-за ориентации в строго разрешенных направлениях магнитных моментов атомов. Рассмотрено влияние эффекта магнитострикции на формирование магнитных доменов и появление дефектов кристаллической решетки. Поставлены задачи дальнейшего исследования.*

**Ключевые слова:** спонтанная намагниченность, кристаллы чистого железа, магнитные моменты атомов, дефекты кристаллической решетки.

### 1. Введение

Метод магнитной памяти металл (МПМ) является неразрушающим методом испытания с большим потенциалом, и это идеально подходит для многих приложений [1]. Практическое применение метода МПМ распространено на территории России, его экспериментальное подтверждение проводится в Польше, Китае и других странах [2 – 4]. Метод магнитной памяти металла является сравнительно новым, поэтому важно провести его полное исследование на истолкование физических основ эффектов, положенных в его суть. Опытное подтверждение таких эффектов является также важным этапом исследований при становлении метода как образцового. Обзор материалов по данной тематике показал, что представленные промышленные применения метода МПМ не исчерпывают тему его использования. Его авторы в основном сосредоточены на приложениях, которые задокументированы публикациями. Выше сказанное указывает на актуальность темы и подталкивает к рассмотрению физических основ, положенных в разработку метода МПМ. Целью данной статьи является рассмотрение межатомных связей и причин появления собственного магнитного поля рассеяния, образования доменной магнитной структуры на примере кристаллов чистого железа.

### 2. Анализ проблемы и постановка задачи исследования

Экспериментально установлено, что метод МПМ использует зависимость параметров внутреннего магнитного поля, фиксируемых на поверхности диагностируемого изделия, от макрохарактеристик напряженно-деформированного состояния конструкционных ферромагнитных материалов. Можно сказать, что метод МПМ основан на малоизученных макроэффектах, что являются следствием взаимосвязи и взаимодействия силовых полей с электромагнитными полями микрочастиц, последовательно составляющих атом, элементарную ячейку кристаллической решетки, саму решетку, домен, и в конце концов, группу доменов. Объяснение этих макроэффектов, отражающих изменение доменной структуры,

и создание полноценной теоретической модели метода МПМ является актуальной задачей.

Однако, следует заметить, данная задача не возникала ни в теории магнетизма, ни в материаловедении, ни в теориях прочности (включая, упругость, пластичность и механику разрушения). Но в этих областях науки накоплено огромное количество экспериментальных данных и выводов.

Для достижения поставленной цели публикации, необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести аналитический обзор теоретических выводов в данном направлении.
2. Проанализировать экспериментальные подтверждения и опровержения метода, как такового.
3. Сформировать и синтезировать из полученного материала теоретические основания, положенные в метод МПМ.

### 3. Исследование и его результаты

Объектом исследования является элементарная ячейка кристаллической решетки чистого железа. По классификации Браве чистое железо имеет объемно-центрированную кубическую (ОЦК) кристаллическую решетку с металлическим типом связей, характеризующуюся высокой электронной проводимостью.

Незавершенность 3d-термы и большой эксцентриситет эллиптических орбит способствует «заарканиванию» сразу двух атомов, образуя симметричную межатомную связь, называемую  $\sigma$ -связью. Однако в силу симметрии решетки происходит взаимное «заарканивание», приводящее к тому, что на одной орбите должно было бы находиться два одинаковых электрона. В силу запрета Паули один такой электрон уходит в свободное «плавание». Так появляются свободные электроны или электроны проводимости. Если учесть, что у атома железа в терме 3d было 6 электронов, то получаем 3-х валентное состояние атома [5 – 7]. Эллиптические орбиты создают некомпенсированные магнитные моменты, которые, подчиняясь законам квантовой механики, ориентируются в пространстве строго определенным образом. Другими словами, у материалов с незаполненными эллиптическими оболочками произошло магнитное упорядочение, называемое спонтанным

магнетизмом. Направление результирующего магнитного момента оказывается совпадающим с пространственной диагональю куба, а точкой его приложения - центр ядра атома (рис. 1).

В результате рассмотрения процесса спонтанного самомагничивания, можно прийти к уже известному положению о возникновении некоторых объемов железа, т. е. к образованию ферромагнитных доменов.

Процесс формирования магнитного домена начинается по мере завершения кристаллизации материала. Дальнейшее остывание материала приводит к фиксации орбит 3d-электронов, причем, направление процесса фиксации орбит - направление самомагничивания совпадает с температурным градиентом. В ОЦК ячейке процессы кристаллизации и самомагничивания начнутся с углов куба, которые и станут центрами кристаллизации и формирования домена (для чистого железа с идеальной кристаллической структурой) [8].

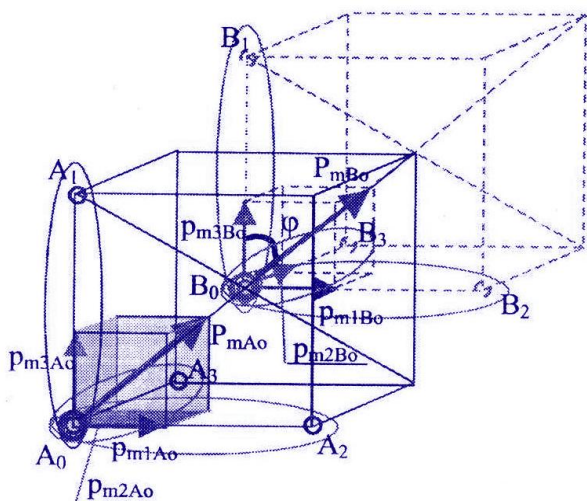


Рис. 1. Расположение элементарных и результирующих магнитных моментов атомов чистого железа в кристаллической решетке

Материал переходит в ферромагнитное состояние, магнитные моменты атомов заняли энергетически наиболее выгодные положения и начинают взаимодействовать: вдоль направления намагниченности на каждый атом действует сила, стягивающая атомы - носители магнитного момента, а в перпендикулярном направлении - сила, расталкивающая атомы. Поэтому каждый последующий захватываемый атом будет находиться уже на расстоянии отличном от предыдущего, а это значит, что будут изменяться силы взаимодействия [9]. Это не что иное, как эффект магнитоупругости, возникающий в процессе самомагничивания. Такая магнитоупругость называется в литературе магнитоупругостью парапроцесса.

Появившиеся магнитоупругость, понемногу стягивающая атомы, все больше увеличивает расстояние от «захваченного» самомагничиванием атома до следующего, подлежащего «захвату». Наступает момент, когда атом оказывается последним, которому еще удастся орбитами 3d-электронов удерживать «законных» соседей. Следующий в направлении намагниченности атом оказывается в такой ситуации, когда эллиптические орбиты 3d-электронов уже не могут охватывать «предназначенные» им атомы и перебрасываются на «новых

соседей», расстояние до которых тоже изменилось, обеспечивая сохранность  $\sigma$ -связей. При этом элементарные магнитные моменты этого атома занимают новое разрешенное положение в пространстве, что и обуславливает скачкообразный поворот результирующего магнитного момента. Таким образом, атом становится «зародышем» нового домена, направление намагниченности которого оказывается «согласным» с направлением индукции уже сформировавшегося и остановившего свой рост домена. Как показывают авторы исследований, энергия взаимодействия двух доменов оказывается минимальной [10].

#### 4. Выводы

В исследовании проведен анализ различных отраслей науки, как теоретических выкладок, так и экспериментальных выводов, что в итоге позволяет собрать воедино вывод о физической основе метода МПМ. В ходе исследования установлено:

1. Причина формирования спонтанной намагниченности ферромагнитных материалов на уровне их микроструктуры.
2. Природа образования магнитных доменов и причины поворота суммарного магнитного момента домена.
3. Показано, что магнитные моменты доменов могут занимать лишь разрешенные и энергетически выгодные направления.

Однако также поставлены задачи дальнейшего более глубокого анализа микроструктуры чистого железа и применение полученных знаний на кристаллах реальных ферромагнитных образцов. Важно понять процессы образования дефектов, дислокаций, атомных включений и двойников, что играют немало важную роль в образовании собственного магнитного поля рассеяния.

#### Литература

1. Малахов, О. В. Перспективы применения метода магнитной памяти металлов к диагностике преддефектного состояния напряженных металлоконструкций [Текст] / О. В. Малахов, Д. С. Девяткин, А. В. Кочергин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 4/ 5(64). – С. 20-24.
2. Li-hong Dong. The Application of metal magnetic memory testing to the field of the life estimation of remanufacturing blanks [Text] / Li-hong Dong, Bin-shi Xu, Shi-yun Dong, Dan Wang.; National Plant Engineering R&D Center. – Beijing, 2006. – P. 21-26.
3. Roskosz, M. The metal magnetic memory method in the diagnostics of power machinery component [Text] / M. Roskosz, A. Rusin, J. Kotowicz // Journal of achievements in materials and manufacturing engineering. – 2010. – Issue 1, Vol. 43. – P. 362-370.
4. Roskosz, M. Metal magnetic memory testing of welded joints of ferritic and austenitic steels [Text] / M. Roskosz // NDE for safety: Defectoskopie. – 2010. – P. 305-310.
5. Лившиц, Б. Г. Физические свойства металлов и сплавов [Текст] / Б. Г. Лившиц, В. С. Крапошин. – М.: Металлургия, 1980. – С. 320.
6. Киттель, Ч. Элементарная физика твердого тела [Текст] / Ч. Киттель. – М.: Наука, 1969. – С. 208.
7. Хоникомб, Р. Пластическая деформация металлов [Текст] / Р. Хоникомб; под ред. Б. Я. Любова. – М.: Мир, 1972. – С. 408.
8. Тикадзуми, С. Физика ферромагнетизма [Текст] / С. Тикадзуми; под ред. Г. А. Смоленского, Р. В. Писарева // Магнитные свойства вещества. – Том 1. – М.: Мир, 1983. – С. 304.
9. Тикадзуми, С. Физика ферромагнетизма [Текст] / С. Тикадзуми; под ред. Р. В. Писарева // Магнитные характе-

ристики и практические применения. – Том 2. – М.: Мир, 1987. – С. 416.

10. Власов, В. Т. Физические основы метода магнитной памяти металла [Текст] / В. Т. Власов, А. А. Дубов. – М.: ЗАО «Тиссо», 2004. – С. 42-113.

**АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ СПОНТАННОГО НАМАГНІЧЕННЯ В КРИСТАЛАХ ЧИСТОГО ЗАЛІЗА**

Представлено аналіз процесів в мікроструктурах чистого заліза при кристалізації. Показано, що формування спонтанного намагнічення кристалів чистого заліза відбувається із-за орієнтації в строго дозволених напрямках магнітних моментів атомів. Розглянуто вплив ефекту магнітострикції на формування магнітних доменів і появу дефектів кристалічної решітки. Поставлені завдання подальшого дослідження.

**Ключові слова:** спонтанна намагніченість, кристали чистого заліза, магнітні моменти атомів, дефекти кристалічної решітки.

*Девяткин Дмитрий Сергеевич, аспирант, кафедра автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий, Восточноукраинский национальный университет им. В. И. Даля, Украина, e-mail: 9dyustudio@gmail.com*

*Девяткин Дмитро Сергійович, аспірант, кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Східноукраїнський національний університет ім. В. І. Дала, Україна, e-mail: 9dyustudio@gmail.com*

*Devyatkin Dmitriy, Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Ukraine, e-mail: 9dyustudio@gmail.com*

УДК 535.14; 535.33

Качур Н. В.

**РОЗВИТОК ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ СПОСОБІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ОПТИЧНО ПРОЗОРИХ МАТЕРІАЛІВ**

*Розглянуто методи оптичного неруйнівного контролю. Досліджено можливість використання оптичного поляризаційного способу контролю для виявлення механічних напружень у склі. Досліджено можливості підвищення точності оптичного контролю. Результати дослідження можуть бути застосовані в оптичному виробництві для контролю якості матеріалів і готових оптичних деталей.*

**Ключові слова:** технічна діагностика, оптичний метод контролю, поляризація.

**1. Вступ**

Відомо, що неруйнівні методи контролю відіграють важливу роль в технічній діагностиці як вихідних матеріалів, так і окремих деталей та збірних конструкцій з них [1]. Особливу актуальність мають оптичні методи для прозорих матеріалів, що забезпечують високу точність та надійність оптико-електронних приладів. В національному стандарті Російської Федерації ГОСТ Р 53696-2009 «Контроль неразрушающий. Методы оптические. Термины и определения» [2] визначено 32 методи оптичного контролю, що засновані на взаємодії оптичного випромінювання з матеріалом та геометричними параметрами оптичної деталі.

**Метою роботи** було дослідження можливості розвитку поляризаційних методів контролю за двома напрямками: можливість спрощення процедури контролю в виробничих умовах та покращення чутливості та точності контролю.

**2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми**

Явище обертання площини поляризації відкрив Араго в кварці в 1811 р., а Біо, виявивши його і в деяких рідинах в 1815 р., довів, що поворот площини поляризації збільшується пропорційно товщині активного шару [2]. Явище обертання площини поляризації має місце у різноманітних тілах, що одержали назву природно активних.

Додаткова зміна швидкості розповсюдження поляризованого світла може змінювати внутрішні пружні механічні напруження. Тому цей метод широко використовується для дослідження наявності таких напружень у оптичних матеріалах та деталях [3].

**3. Результати досліджень**

Учені й інженери протягом тривалого часу використовують метод поляризаційного контролю при визначенні якості оптично прозорих матеріалів та конструкцій з них. Однак, одним із проблемних питань у цьому методі залишається пошук і вибір джерела поляризованого світла. Таке джерело повинне мати досить велику площу випромінювання (порівняно з площею контрольованої деталі); забезпечувати по всій площі однорідне по оптичних характеристиках випромінювання; бути простим в експлуатації; енергоекономним.

На жаль, традиційні прилади поляризаційного контролю (прилад ПКС-250, ЛОМО, Росія) мають випромінювач, діаметром не більш 250 мм, що ускладнює здійснення контролю великогабаритних деталей.

Нами було запропоновано використати в якості джерела поляризованого світла дисплейний екран персонального комп'ютера або смартфонів, планшетів [4]. Дійсно, під впливом електричного поля відбувається зміна структури рідких кристалів, що викликає зміну умов проходження поляризованого випромінювання від кожного пікселя. Заключну роль у формуванні зображення на дисплеї відіграє поляризатор, розміщений