

Рисунок 5 – Зеренная структура фольги сплава Sn – 12 ат. % Zn – 1 ат.% Ga

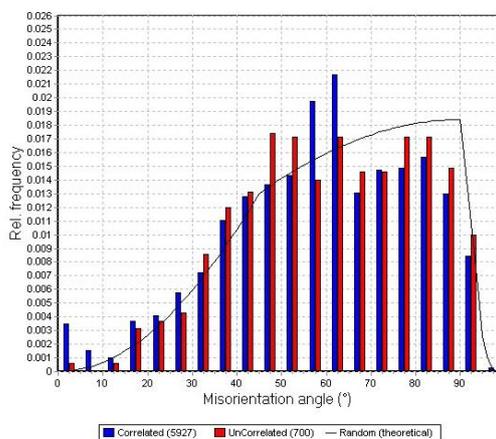


Рисунок 6 – Диаграмма распределения зерен в фольге сплава Sn – 12 ат. % Zn – 1 ат.% Ga

Легирование сплава Sn – Zn галлием приводит к уменьшению размеров зерен. Средний размер зерна составляет 18 мкм. Форма зерен близка к равноосной – среднее отношение длины зерна к его ширине равно 1,2. На рис. 6 приведена диаграмма распределения зерен в фольге сплава Sn – 12 ат. % Zn – 1 ат.% Ga, которая показывает отсутствие корреляции как в соседних, так и в случайно выбранных зернах.

Таким образом, легирование сплава Sn-Zn галлием приводит к измельчению зерна, образованию равноосных зерен и подавляет двойникование при росте зерна.

### Литература

- 1.Cheng, Shunfeng A review of lead-free solders for electronics applications / Shunfeng Cheng, Chien-Ming Huang, Michael Pecht // Microelectronics Reliability. – 2017. – Vol. 75. – P. 77–95.
- 2.Ma, Z.L. Nucleation and twinning in tin droplet solidification on single crystal intermetallic compounds / Z.L. Ma, J.W. Xian, S.A. Belyakov, C.M. Gourlay // Acta Materialia. 2018. – Vol. 150. – P. 281–294.
- 3.Sun, Menglong Growth behavior of tin whisker on SnAg microbump under compressive stress / Menglong Sun, Mengya Dong, Dongfan Wang, Huiqin Ling, An-min Hu, MingLi // Scripta Materialia. – 2018. – Vol. 147. – P 114–118.
- 4.Lehman, L.P. Cyclic twin nucleation in tin-based solder alloys / L.P. Lehman, Y. Xing, T.R. Bieler, E.J. Cotts // Acta Materialia 58 (2010) 3546–3556.
5. Gusakova, O., Shepelevich, V. The influence of melt flow on grain structure of tin and its alloys produced by ultrafast quenching from the melt / O. Gusakova, V. Shepelevich // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 192 (2017) 012015-1-6.

УДК 620.179.14

## О ПРОБЛЕМЕ ИЗМЕРЕНИЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ТЕЛ Гусев А.П.<sup>1</sup>, Зацепин Е.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики НАН Беларуси»  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь

Основной характеристикой средств измерений, как известно, является точность измерений, которая закладывается на стадии их проектирования в зависимости от используемого принципа измерений и уровня развития техники в области средств измерений. Однако достижение наивысшей точности измерений не является гарантией достоверности результатов, в особенности – их интерпретации, получаемых, например, при наличии методической ошибки измерений, либо при наличии не учтенных факторов исследуемого физического явления. Последнее является основанием представления данной работы, содержание которой связано с проблемой измерений намагниченности ферромагнитных тел.

Известно, что измерения магнитных характеристик ферромагнитных материалов, например – магнитного гистерезиса, производят в замкнутой магнитной цепи, эквивалентом которой является также ограниченное в диаметре бесконечно длинное тело. Магнитный поток намагниченности материала в этом случае практически весь сосредоточен в магнитопроводе, то есть не рассеивается в окружающее пространство и точность измерения интенсивности магнитного потока ограничивается лишь погрешностью используемого метода и аппаратуры.

В практике магнитных измерений подобные случаи единичны, подавляющее же число измерений проводятся с намагничиванием тел огра-

ниченных размеров, либо – при локальном намагничивании неоднородным полем. Во всех этих случаях магнитный поток пересекает поверхность тела. Получаемые при этом традиционным методом измерений или решением уравнений Максвелла результаты относятся к суммарным в каждой точке пространства или усредненным по объему магнитным потокам. Примером этого является использование размагничивающих коэффициентов формы тела. Применение в методиках измерений (и расчетов) таких “суммарно-усредненных” представлений при решении ряда задач оправдано и дает положительные результаты.

Однако, существуют задачи, решение которых не может быть основано на использовании “суммарно-усредненных” представлений. Например, в магнитной дефектоскопии для оценки параметров обнаруживаемых по полю рассеяния дефектов необходимо определение намагниченности материала в месте расположения каждого конкретного дефекта. То есть условием достоверности дефектоскопии ферромагнитных тел является определение распределения намагниченности материала по объему исследуемых тел. Без решения этой задачи интерпретация результатов измерений может быть не только ошибочной, но и противоречить существующим (используемым по умолчанию) “суммарно-усредненным” представлениям о намагничивании ферромагнитных тел.

В качестве иллюстрации к изложенному можно рассмотреть изложенные в ряде работ по магнитному методу неразрушающего контроля [1-5] результаты исследований, связанные с магнитными измерениями.

В работе [1] экспериментально получено, что поверхностный слой ферромагнитного образца с плоской поверхностью, намагничиваемого приставным электромагнитом, намагничивается слабее, чем слой металла, расположенные под поверхностным слоем. Этот результат противоречит тому, что напряженность намагничивающего поля при намагничивании приставным П-образным электромагнитом имеет максимальное значение в поверхностном слое образца. Объяснить это противоречие с позиций “суммарно-усредненных” представлений невозможно.

В работе [2] с аналогичными [1] условиями намагничивания исследовано магнитное поле рассеяния поверхностных дефектов образцов различных сталей и с различной термообработкой. В результате получено, что напряженность магнитного поля рассеяния дефектов магнитомягких образцов больше, чем напряженность поля дефектов магнитожестких. Данный результат противоречит тому, что магнитомягкие материалы в одинаковых условиях намагничиваются сильнее, чем магнитомягкие, и соответственно напряженность поля дефектов образцов магнитомягких материалов должна быть больше, чем магнито-

жестких. С позиций “суммарно-усредненных” представлений данное противоречие не объяснимо.

В работе [3] исследовано изменение магнитного поля дефектов образцов стали 35 при их перемагничивании магнитостатическим полем соленооида. Особенностью полученных результатов является то, что нисходящая ветвь гистерезиса поля дефекта расположена ниже восходящей ветви, полученной при увеличении намагничивания образцов от 0 до максимума. Данное расположение нисходящей ветви гистерезиса поля дефекта противоречит расположению нисходящей ветви стандартного гистерезиса, получаемого при перемагничивании ферромагнетиков, в котором нисходящая ветвь расположена выше первоначальной кривой намагничивания.

Аналогичный результат получен в работе [4] для гистерезиса магнитомягких сталей. Однако, полученный здесь же гистерезис полей дефектов магнитомягких сталей имеет вид стандартного гистерезиса ферромагнитных материалов.

Приведенные выше результаты экспериментальных исследований в [1-4], необъяснимые с позиций “суммарно-усредненных” представлений намагничивания ферромагнитных тел, требуют нестандартного, точнее – более детального подхода к анализу реальных процессов намагничивания ферромагнитных тел.

С этой целью в [3] дипольно-зарядовая модель описания процессов намагничивания, возникшая на базе “суммарно-усредненных” представлений, заменена моделью магнитных потоков, особенностью которой является разделение магнитного потока намагниченности материала тела на два потока: первый – поток  $\Phi_p$ , силовые линии которого выходят за границы тела, второй – поток  $\Phi_{вн}$ , силовые линии которого не выходят за границы тела, а замыкаются внутри его (рис. 1).

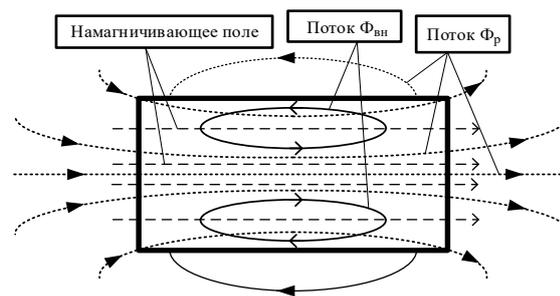


Рисунок 1 – Схема распределения магнитных потоков

В магнитомягких материалах внутренний магнитный поток из-за большой магнитной проницаемости сильнее, чем в магнитомягких, поэтому поверхностный слой металла, где  $\Phi_{вн}$  направлен навстречу намагничивающему полю, размагничивается сильнее в магнитомягких сталях, чем в магнитомягких, чем объясняются приведенные выше необъясненные результаты работ [1-3].

Кроме того, двухпоточная модель позволяет проследить динамику взаимодействия двух потоков в процессе перемагничивания ферромагнитного тела. В работе [4] проведен анализ изменения намагниченности материала в поверхностном слое ферромагнитного тела с учетом различных магнитных гистерезисов: гистерезис материала – для внутреннего потока, гистерезис тела – для потока  $\Phi_p$  (рис. 2). На рисунке изображены начальные кривые намагничивания  $M(I_{0m})$  и нисходящие ветви  $M(I_{m0})$  гистерезиса намагни-

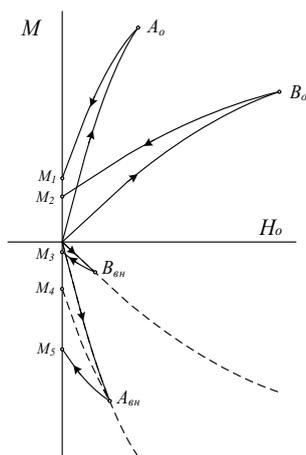


Рисунок 2 – Схема перемагничивания поверхностного слоя магнитомягкой (1 и 4) и магнитожесткой (2 и 3) сталей

ченности материала магнитомягких и магнитожестких сталей. Все нисходящие ветви по абсолютному значению  $|M(I_{m0})|$  расположены выше

начальных кривых  $|M(I_{0m})|$ , что соответствует обычному перемагничиванию ферромагнетика. Сложение значений намагниченности по соответствующим ветвям гистерезисов при одинаковых токах дают две указанные выше формы гистерезиса перемагничивания поверхностного слоя магнитомягких и магнитожестких сталей.

Таким образом, можно считать, что двухпоточная модель по рис.1, объясняющая необъясненные ранее экспериментальные результаты, соответствует реальным процессам намагничивания и перемагничивания ферромагнитных тел. В связи с этим проблема точности определения намагниченности материала в объеме ферромагнитных тел требует учета внутреннего магнитного потока  $\Phi_p$ , который не регистрируется внешними измерителями.

#### Литература

- 1.Томилов, Г.С. Исследование распределения индукции в массивных стальных изделиях при локальном намагничивании их при помощи приставных электромагнитов. – Дефектоскопия, 1966, № 3. – С. 77–85.
- 2.Гусев, А.П. Модели магнитных зарядов и потоков в задаче дефектоскопии с локальным намагничиванием. / А.П. Гусев // Дефектоскопия. – 2014. – № 6. – С. 46–53
- 3.Чернышев, А.В., Зацепин, Н.Н., Гусак, Н.О., Шевкунов, В.И. Магнитное поле в полости поверхностной щели при намагничивании образца в разомкнутой магнитной цепи. Дефектоскопия, 1986. – №1. – С. 13–17.
- 4.Гусев, А.П. Гистерезис магнитного поля поверхностных дефектов различных сталей при намагничивании приставным электромагнитом / А.П. Гусев // Дефектоскопия. – 2015. – № 10. – С. 24–32.

УДК 615.837.3

### ОДНОКРИСТАЛЛЬНАЯ МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ АППАРАТА МАГНИТОУЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕРАПИИ

Гомбалевский П.Д., Дедович Н.Н., Романов А.Ф.

Научно-исследовательское учреждение «Институт прикладных физических проблем имени А.Н.Севченко» Белорусского государственного университета  
Минск, Республика Беларусь

Построение современной аппаратуры в большинстве случаев предполагает применение микропроцессорных систем. Главная особенность микропроцессора – возможность программирования логики работы аппаратуры. Микропроцессоры используются для управления процессом измерения и обработки результатов измерения с последующим формированием управляющих сигналов для модулей обеспечивающих функциональные требования аппаратуры. При разработке аппарата для магнитоультразвуковой терапии [1] потребовалось решить вопрос выбора микропроцессорной системы для реализации устройства управления (рисунок 1).

Часть узлов аппарата реализована на базе программируемой логической схемы (ПЛИС).

Процессор Nios II, представленный компанией Altera– это программная 32-разрядная микропроцессорная система, которая полностью реализована с использованием только логического синтеза и оптимизирована для реализации в ПЛИС. Применение Nios II в качестве устройства управления позволяет снизить количество элементов, требуемых для построения аппарата. Достоинствами такого решения перед обычными микропроцессорами состоят в том, что в любой момент можно реконфигурировать ядро, добавляя или удаляя нужные элементы без изменения аппаратной части, а количество ядер на кристалле ограничено только ресурсами выбранной ПЛИС.

Основные характеристики процессорного ядра Nios II/f: