

15

## Высокочувствительный сканирующий магнитометр на основе эффекта гигантского магнитного импеданса для измерений локальных магнитных полей коррозионных токов

© С.А. Гудошников<sup>1,2</sup>, И.В. Бардин<sup>1</sup>, В.А. Баутин<sup>1</sup>, А.Г. Ноздрин<sup>1</sup>,  
А.В. Попова<sup>1,2</sup>, Ю.В. Прохорова<sup>2</sup>, В.С. Скомаровский<sup>2</sup>,  
Б.Я. Любимов<sup>2</sup>, А.Г. Сеферян<sup>1</sup>, Н.А. Усов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва

<sup>2</sup> Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк  
E-mail: gudosh@izmiran.ru

Поступило в Редакцию 12 ноября 2015 г.

Рассмотрены конструкция, основные характеристики и особенности нового высокочувствительного магнитометра на основе эффекта гигантского магнитного импеданса в аморфных ферромагнитных микропроводах. Показано, что наряду с измерением однородных магнитных полей магнитометр позволяет регистрировать слабые локальные магнитные поля токов проводимости и ионных токов, возникающих при коррозионных процессах. Получено качественное согласие результатов магнитных измерений *in situ* коррозионных процессов модельной системы „цинк–медь“ в растворе серной кислоты и прямых коррозионных испытаний стандартным гравиметрическим методом.

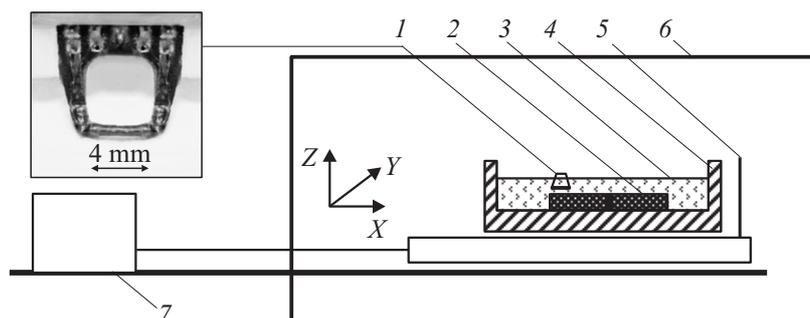
Аморфные ферромагнитные микропровода (АФМ) в стеклянной оболочке с малыми диаметрами (5–30  $\mu\text{m}$ ) являются уникальными магнитными объектами, в которых может наблюдаться эффект гигантского магнитного импеданса (ГМИ). Эффект ГМИ проявляется в гигантском (более чем 100%) изменении импеданса АФМ  $Z(H, f)$  на переменном токе высокой частоты  $f$  при изменении внешнего постоянного магнитного поля  $H$ . Этот эффект в настоящее время успешно используется при создании миниатюрных высокочувствительных ГМИ-магнитометров [1,2]. Одним из практических приложений

ГМИ-магнитометров может стать новое направление — мониторинг магнитных полей, возникающих над корродирующей поверхностью [3,4]. Так, в работе [4] была продемонстрирована принципиальная возможность измерения магнитных полей, порождаемых коррозионными (ионными) токами. При этом следует отметить, что, несмотря на рекордную магнитную чувствительность сверхпроводящих квантовых интерференционных датчиков (СКВИДов), с их помощью не удалось надежно зарегистрировать магнитные поля коррозионных токов [3]. В данной работе в рамках задачи магнитного коррозионного мониторинга рассмотрены технические особенности ГМИ-сенсора и его калибровки, конструкция сканирующего ГМИ-магнитометра в целом и результаты магнитных и гравиметрических сравнительных исследований модельной системы цинк–медь с одиночным коррозионным центром.

Сенсор ГМИ-магнитометра представлял собой отрезок АФМ состава  $\text{Co}_{67}\text{Fe}_{3.85}\text{Ni}_{1.45}\text{B}_{11.5}\text{Si}_{14.5}\text{Mo}_1$  в стеклянной оболочке длиной 5 mm и диаметром магнитного кода  $\sim 20 \mu\text{m}$ , на который была намотана миниатюрная приемная катушка диаметром 0.5 mm и длиной 4 mm (длина приемной катушки определяет эффективную длину ГМИ-сенсора) [5]. ГМИ-сенсор закреплялся на нижних концах П-образного держателя, как показано на рис. 1, к верхней его части крепились подводящие провода от электронной схемы ГМИ-магнитометра. После изготовления вся конструкция сенсора на П-образном держателе герметизировалась несколькими слоями полимерного клея, что обеспечивало возможность его работы в агрессивных растворах. Регистрация изменения недиагональной компоненты импеданса АФМ осуществлялась на частоте 4 MHz под действием возбуждающего синусоидального тока амплитудой 1 mA, приложенного к микропроводу. Индуцируемый в приемной катушке сигнал регистрировался с помощью электронной схемы, содержащей возбуждающий генератор, усилители и синхронный детектор [5].

Калибровка ГМИ-сенсора проводилась в однородном магнитном поле в кольцах Гельмгольца. Измеренный передаточный коэффициент ГМИ-сенсора составил 0.364 V/mG. Полный диапазон измерений ГМИ-магнитометра составлял  $\pm 13 \text{ mG}$ . Для устранения влияния магнитного поля Земли ( $\sim 500 \text{ mG}$ ) измерения проводились внутри магнитного экрана из пермаллоя, обеспечивающего экранировку постоянных и низкочастотных магнитных полей более чем в 500 раз.

Для измерения локальных магнитных полей токов использовался немагнитный X–Y-сканер, в котором ГМИ-сенсор располагался гори-

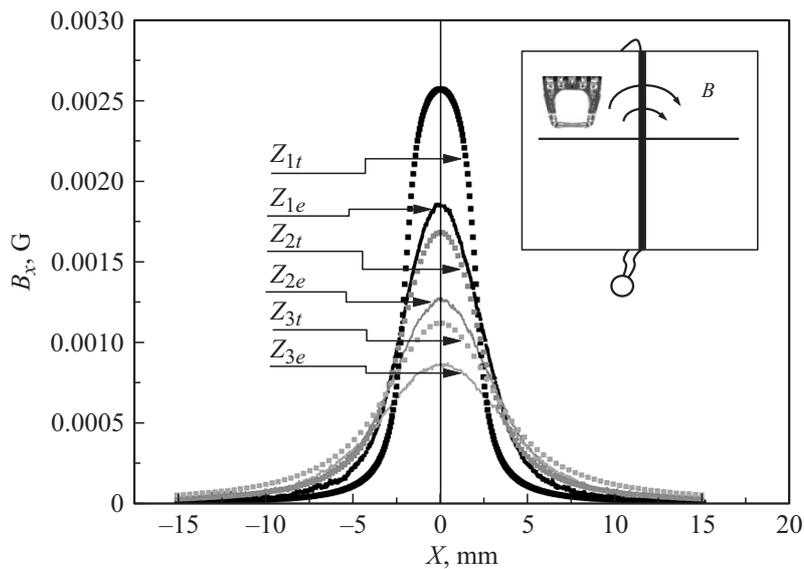


**Рис. 1.** Структурная схема сканирующего ГМИ-магнитометра для измерения локальных магнитных полей токов: 1 — ГМИ-сенсор с эффективной длиной 4 мм, 2 — исследуемый образец, 3 — раствор электролита, 4 — кювета, 5 — подвижный немагнитный столик, 6 — магнитный экран, 7 — шаговые двигатели.

зонтально, параллельно оси  $X$  на фиксированных расстояниях  $Z$  относительно поверхности исследуемого образца, в пределах 0.4–4 мм. При проведении измерений подвижная платформа с исследуемым токовым образцом перемещалась с помощью шагового двигателя относительно ГМИ-сенсора вдоль координаты  $X$  на заданное расстояние ( $\sim 2$  см), как показано схематически на рис. 1. В процессе сканирования производилась запись усредненного по длине сенсора значения  $X$ -компоненты магнитной индукции, создаваемой токами,  $\langle B_x(x) \rangle$  в зависимости от координаты  $X$  вдоль поверхности образца.

Для оценки возможности измерения локальных магнитных полей были проведены тестовые измерения циркулярного магнитного поля постоянного тока, протекающего по прямолинейному медному проводнику длиной 60 мм и диаметром 0.3 мм, закрепленному на плоском основании параллельно оси  $Y$ . ГМИ-сенсор измерял горизонтальную компоненту поля вдоль оси  $X$  на высоте  $Z$  от токовой линии, как показано на вставке рис. 2. Измерения проводились при постоянном токе 2 мА, на трех разных высотах  $Z_{1e} \approx 0.6$  мм,  $Z_{2e} \approx 1.8$  мм,  $Z_{3e} \approx 3.2$  мм.

На рис. 2 сплошными линиями ( $Z_{*e}$ ) представлены экспериментальные зависимости эквивалентного выходного сигнала ГМИ-магнитометра от координаты  $X$ , пересчитанного с учетом передаточного



**Рис. 2.** Экспериментальные (сплошные линии) и теоретические (прерывистые линии) зависимости компоненты магнитного поля  $B_x$  однопроводной токовой линии в зависимости от координаты  $X$  при проходах датчика на различных высотах  $Z_1 \approx 0.6$  mm,  $Z_2 \approx 1.80$  mm и  $Z_3 \approx 3.20$  mm над токовой линией. На вставке показано положение ГМИ-сенсора при сканировании.

коэффициента ГМИ-сенсора в однородном магнитном поле. Прерывистыми линиями ( $Z_{*t}$ ) показаны усредненные по длине сенсора значения  $B_x$ -компоненты индукции магнитного поля, вычисленные в каждой точке траектории ГМИ-сенсора. Вычисления усредненных значений поля по длине ГМИ-сенсора проводились с помощью компьютерной программы, которая рассчитывала на каждом элементарном участке ГМИ-сенсора соответствующее значение  $X$  компоненты магнитного поля и интегрировала эти значения по длине датчика. Данные, представленные на рис. 2, показывают качественное согласие усредненной  $B_x$ -компоненты по длине датчика и экспериментальных значений. Однако из рис. 2 следует, что на всех трех высотах теоретическая оценка индукции магнитного поля больше полученного экспериментального значения приблизительно в  $k \sim 1.4$  раза. По-видимому, наличие данного

коэффициента связано с влиянием трудно учитываемых геометрических факторов ГМИ-сенсора. Дополнительный коэффициент  $k$  учитывался в дальнейшем при оценке локальных магнитных полей коррозионных токов модельного образца.

В качестве модельного образца для проведения *in situ* коррозионных исследований при помощи ГМИ-магнитометра была выбрана система цинк–медь в растворе серной кислоты. Исследуемый образец представлял собой квадратную медную пластину (содержание меди — не менее 99.95%) со стороной 3.0 см, с запрессованной в ее центре цилиндрической вставкой из цинка (содержание цинка — не менее 99.98%) диаметром 0.15 см. Указанный образец можно рассматривать в качестве модели отдельно функционирующего питтинга [6,7], поскольку при питтинговой коррозии площадь питтинга, который является анодом, намного меньше площади остальной катодной поверхности материала.

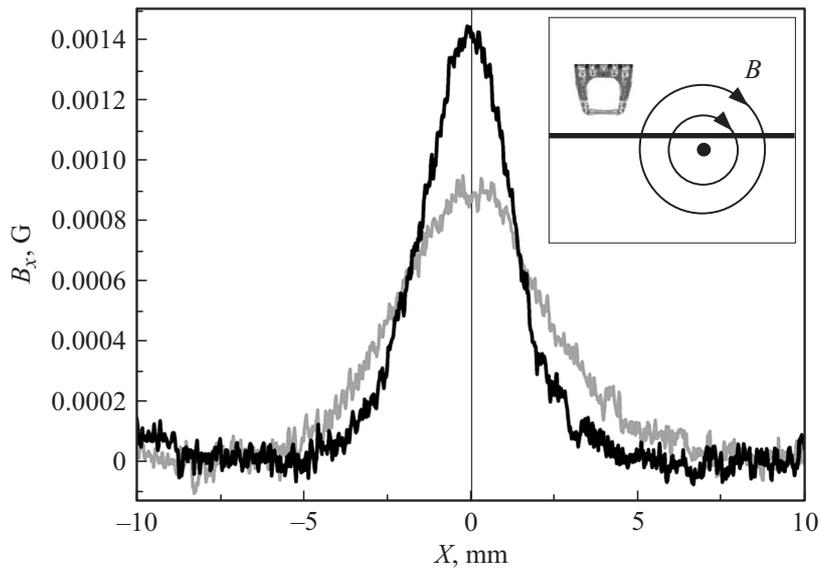
Перед измерениями медный образец помещался в пластиковую кювету, которая закреплялась на подвижной платформе и заполнялась раствором 1%  $H_2SO_4$  так, что высота уровня раствора над образцом составляла не менее 0.5 см. Раствор 1%  $H_2SO_4$  получали путем растворения в дистиллированной воде серной кислоты (плотность  $1.83 \text{ g/cm}^3$ , массовая доля серной кислоты 94.6%).

При погружении образца цинк–медь в раствор 1%  $H_2SO_4$  реализуется следующий коррозионный процесс:

- торец цинковой проволоки — анод:  $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$ ,
- поверхность меди — катод:  $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2(r)\uparrow$ .

В данном процессе положительно заряженные ионы движутся от анода к катоду и компенсируются электронным током в металле. Такие токи должны порождать циркулярное магнитное поле, максимальное вблизи анода (торец цинковой проволоки) и затухающее при удалении от него. Из предварительных прямых коррозионных испытаний гравиметрическим методом (ASTM G 31-72 (2004)) были определены скорость потери массы образца в 1%-м растворе  $H_2SO_4$  и величина анодного тока коррозии, составившие,  $K_m = 1121 \pm 15 \text{ g/(m}^2 \cdot \text{h)}$  и  $J = 1.62 \pm 0.06 \text{ mA}$  соответственно.

При регистрации магнитных полей, порождаемых коррозионными токами, ГМИ-сенсор, как и в случае измерения поля прямого тока, располагался горизонтально, вдоль оси  $X$ . При этом П-образный держатель обеспечивал беспрепятственное движение раствора вокруг сенсора. На рис. 3 показаны результаты измерений эквивалентного выходного сигнала ГМИ-магнитометра, соответствующие значениям  $X$ -компоненты



**Рис. 3.** Экспериментальные зависимости компоненты магнитного поля  $B_x$  модельного коррозионного центра в зависимости от координаты  $X$  при проходах датчика на расстояниях  $Y_1 = 0.7$  mm (черная кривая) и  $Y_2 = 1.5$  mm (серая кривая) от края коррозионного центра на высоте  $Z \approx 0.4$  mm. На вставке показано положение ГМИ-сенсора при сканировании.

магнитного поля коррозионных токов  $\langle B_x(x) \rangle$  в зависимости от координаты  $X$ . Черная и серая кривые соответствуют проходам датчика на расстояниях  $Y_1 = 0.7$  mm и  $Y_2 = 1.5$  mm от края коррозионного центра на высоте  $Z \approx 0.4$  mm. Измеренные зависимости имели максимум в точке, соответствующей минимальному расстоянию от ГМИ-сенсора до цинкового центра, и по виду совпадали с измеренными кривыми циркулярного магнитного поля токов проводимости (рис. 2). По известной величине максимума поля, расстояния до коррозионного центра и с учетом коэффициента  $k$ , определенного из токовых измерений, была получена оценка величины анодного тока коррозии, составившая  $\sim 1.5$  mA. Данное значение качественно согласуется с величиной тока коррозии, полученной при гравиметрических испытаниях.

Таким образом, в работе с помощью высокочувствительного ГМИ-магнитометра реализован дистанционный магнитный метод проведения коррозионных *in situ* исследований конструкционных металлических материалов в проводящих средах. Показано, что измерения величины и пространственного распределения весьма слабых  $B_x \sim 10^{-3}$  G локальных магнитных полей, возникающих вследствие протекания коррозионных процессов, позволяют оценить величину коррозионного тока и скорость коррозии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, уникальный идентификатор проекта RFMEF157514X0011.

## Список литературы

- [1] *Dufay B., Saez D., Dolabdjian C., Yelon A., Ménard D.* // IEEE Trans. Magnetics. 2013. V. 49. N 1. P. 85.
- [2] *Uchiyama T., Nakayama S., Mohri K., Bushida K.* // Phys. Stat. Solidi. A. 2009. V. 206. N 4. P. 639.
- [3] *Yu Pei Ma, Wikswo J.P., Juzeliunas E.* // Corrosion Science. 2005. V. 47. P. 621.
- [4] *Bardin I.V., Bautin V.A., Gudoshnikov S.A., Ljubimov B.Ya., Usov N.A.* // AIP Advances. 2015. N 5. P. 017 143.
- [5] *Gudoshnikov S., Usov N., Nozdrin A., Ipatov M., Zhukov A., Zhukova V.* // Phys. Stat. Solidi. A. 2014. V. 211. N 5. P. 980.
- [6] *Томашов Н.Д., Чернова Г.П.* Теория коррозии и коррозионностойкие конструкционные сплавы. М.: Металлургия, 1986. 359 с.
- [7] *Stansbury E.E., Buchanan R.A.* // ASM International. 2000. 487 p.