

УДК 620.179

## ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПЛОСКОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ МАГНИТОШУМОВЫМ МЕТОДОМ

*В. Л. ВЕНГРИНОВИЧ, Д. А. ВИНТОВ, \*П. А. ПОДУГОЛЬНИКОВ,  
\*А. Н. ПРУДНИКОВ, \*\*В. Н. РЯБЦЕВ*

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

\*ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

\*\* Белорусский национальный технический университет  
Минск, Могилев, Беларусь

### Аннотация

Представлены результаты работы по исследованию метода эффекта Баркгаузена при двухосном напряженно-деформированном состоянии материала. Математическое моделирование, независимые измерения интенсивности магнитного шума на крестообразном образце оптимизированной формы с использованием двухосного нагружающего оборудования оригинального типа подтверждают инвариантность метода эффекта Баркгаузена относительно любых изменений шаровой компоненты тензора деформаций (напряжений).

### Ключевые слова:

двухосная нагрузка, внутреннее напряжение, деформация, шум Баркгаузена, математическая модель, 3D-диаграмма.

### Abstract

The results of investigation on the magnetic Barkhausen effect method in the biaxial stress state of the material are represented. Mathematical modeling, independent measurement of Barkhausen noise intensity on the cross-shaped specimen of the optimized form and using the original type biaxial loading equipment confirm the regularity of the invariance of the magnetic Barkhausen effect method relatively to any changes of spherical (isotropic) strain/stress tensor.

### Key words:

biaxial loading, internal stress, strain, Barkhausen noise, mathematical model, 3D diagram.

Разработка высокоэффективных и более надежных методов определения механических напряжений в ферромагнитных объектах является одной из актуальных задач как неразрушающего контроля, так и технической диагностики. Магнитные методы оценки напряженно-деформированного состояния объектов, в частности, метод эффекта Баркгаузена, имеют перспективу измерения двухосных напряжений, присущих для большинства металлических конструкций.

В рамках двухосного напряженно-деформированного состояния (НДС) даже одноосная нагрузка материала приводит к плосконапряженному состоянию в любой части образца. Важно опреде-

лить ту часть деформации, которая вызывает изменения физических параметров в исследуемом материале.

Из закона Акулова для магнитной анизотропии, где кубические кристаллы описываются изменением свободной энергии под внешним воздействием упругих напряжений, следует, что причиной перестройки доменной структуры является возникновение анизотропии в материале, что влияет на уровень интенсивности магнитного шума (МШ) как на показатель состояния доменной структуры.

Этот вывод был проверен моделированием методом конечных элементов (МКЭ).

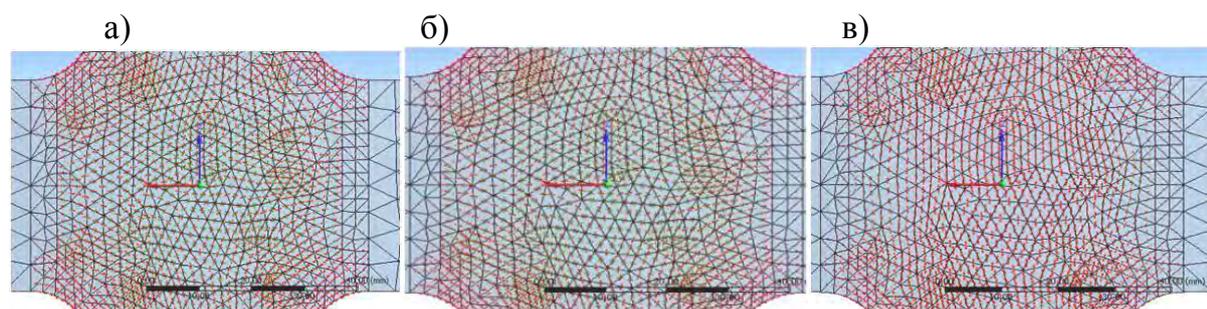


Рис. 1. МКЭ модель основного распределения напряжения/деформации внутри трех одинаковых фрагментов крестообразного образца после приложения напряжений в горизонтальном и вертикальном направлениях в соотношении: а – 2,5:2,5; б – 5:5; в – 2,5:5

Рис. 1, а и 1, б соответствуют симметричному нагружению (отношение главных компонент напряжений 1:1) при двукратной разнице в значении приложенной нагрузки: 2,5 против 5 соответственно. В то же время приложение ассиметричной нагрузки (1:2) во взаимно перпендикулярных направлениях полностью меняет картину (рис. 1, в.) из-за появления сдвиговой компоненты напряжений. Видно, что симметричная нагрузка (пре-небрегая Z-координатой, близкая к гидростатическому состоянию) не влияет на картину деформации/напряжений в модели МКЭ.

При плоском напряженном состоянии материала измерения интенсивности магнитного шума производят в двух взаимно перпендикулярных направлениях, в предположении что в значения магнитного шума, измеренного датчиком, одновременно вносят вклад оба главных напряжения, действующих при плоском напряженном состоянии (принцип суперпозиции).

Функциональная зависимость выходных параметров от входных определяется в этом случае выражением:

$$\begin{cases} V_1(\sigma_1, \sigma_2) = k(\sigma_1) + h(\sigma_2) \\ V_2(\sigma_1, \sigma_2) = k(\sigma_2) + h(\sigma_1) \end{cases}, \quad (1)$$

где  $V_1$ ,  $V_2$  – МШ при расположении датчика вдоль напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  со-

ответственно;  $k(\sigma)$ ,  $h(\sigma)$  – функции преобразования датчика величины напряжения  $\sigma$ , направленного вдоль (перпендикулярно) оси датчика.

Решение системы уравнений с использованием экспериментальных данных в широком диапазоне нагрузок, позволяет получить аналитическую зависимость результатов измерительного процесса при плосконапряженном состоянии. С этой целью проведен эксперимент на натуральных цилиндрических образцах, находящихся под различным внутренним избыточным давлением.

На рис. 2, а представлены экспериментальные и полученные расчетные зависимости модели (1) для цилиндрического образца, на рис. 2, б –  $k(\sigma)$ ,  $h(\sigma)$  – функции преобразования напряжений в магнитный шум.

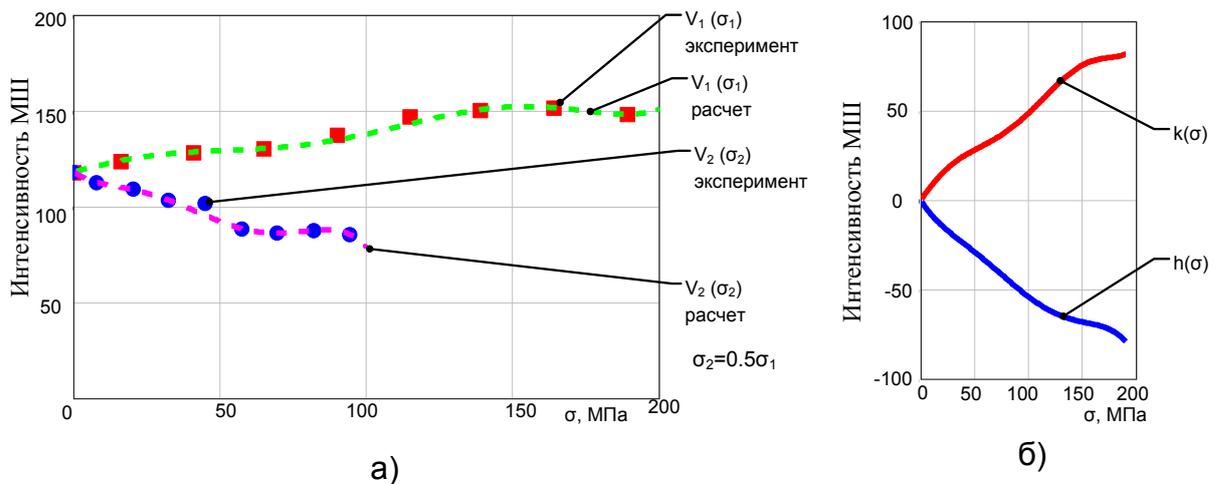


Рис. 2. Графики: а – градуировочных зависимостей, полученных при эксперименте и моделировании; б – функций преобразования датчика

Функции преобразования напряжений в магнитный шум  $k(\sigma)$ ,  $h(\sigma)$  в зоне упругой деформации равны между собой с отличием в знаке. Таким образом, систему уравнений (1) можно записать в виде:

$$\begin{cases} V_1(\sigma_1, \sigma_2) = f(\sigma_1 - \sigma_2) \\ V_2(\sigma_1, \sigma_2) = f(\sigma_2 - \sigma_1) \end{cases} \quad (2)$$

Как видно, интенсивность магнитного шума зависит от разности напряжений, а не от их абсолютного значения [1].

Для проверки адекватности предложенной математической модели измерения МШ при плосконапряженном состоянии проведено сравнение результатов эксперимента, основанного на испытании крестообразного образца и численного моделирования, полученного подставлением в систему уравнений (1) значений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  от 0 до 200 МПа и нахождением через функции преобразования  $k(\sigma)$  и  $h(\sigma)$ ,  $V_1$  и  $V_2$ . Графическое представление в виде 3D-диаграммы изменения магнитного шума (ось аппликата) в зависимости от величин главных значений деформаций по обеим осям  $X$  и  $Y$  приведены на рис. 3.

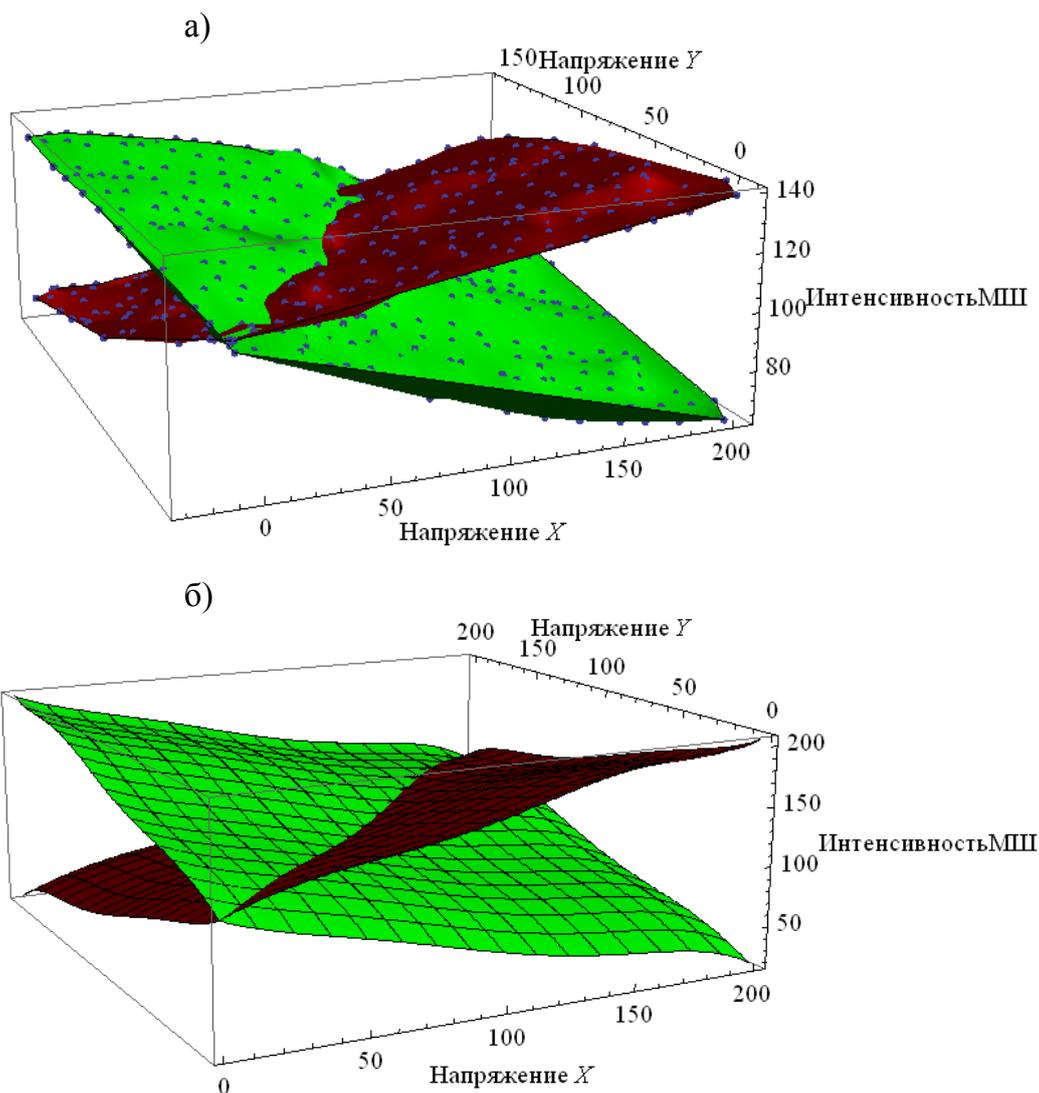


Рис. 3. 3D-диаграмма интенсивности МШ (ось Z) в зависимости от значений напряжений  $\sigma_x$  (X-ось) и  $\sigma_y$  (Y-ось): а – эксперимент; б – расчет

Сравнение приведенных графиков приводит к выводу о достаточной близости друг к другу результатов измерений МШ на крестообразном образце и расчетных значений МШ, а также об адекватности разработанной математической модели и возможности ее применения для моделирования процесса измерения плосконапряженного состояния. К тому же из результатов видно, что увеличение напряжений может вызывать как рост величины МШ, так и его уменьшение, что обуславливает необходимость учета значений главных напряжений при решении обратной задачи определения напряжений методом, основанным на эффекте Баркгаузена [2].

Анализируя полученные результаты и, в частности, 3D-диаграммы можно сделать вывод о том, что интенсивность магнитного шума зависит только от девиаторной (сдвиговой) компоненты тензора напряжений, а в условиях гидростатического сжатия или растяжения зависит только от микроструктуры материала, а не от значений симметричных деформаций/

напряжений. Присутствие остаточных напряжений в материале вызывает только смещение градуировочной характеристики магнитного шума вдоль соответствующей оси на величину остаточных напряжений, что позволяет достаточно просто их определить и учитывать в процессе измерения. Этот вывод подтверждается независимыми измерениями интенсивности МШ на крестообразном образце оптимальной формы и цилиндрических образцах, таких как трубы и баллон, под давлением.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sablik, M. J.** Modeling the Effects of Biaxial Stress on Magnetic Properties of Steels with Application to Biaxial Stress NDE / M. J. Sablik // Nondestructive Testing and Evaluation. – 1995. – Vol. 12, No. 2. – P. 87–102.
2. Advance in Stress Measurement via Barkhausen Noise / V. Vengrinovich // 19th World Conference on Non-Destructive Testing, WCNDT 2016, 13-17 June 2016; Proceedings. – Munich, Germany.