

## ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ ПО МАГНИТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ

© 2024 г. Алексей Николаевич Сташков<sup>1\*</sup>, Е. А. Шапова<sup>1</sup>, А. П. Ничипурук<sup>1</sup>,  
Н. В. Гордеев<sup>1,2</sup>, А. М. Матосян<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> – Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620108 Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18

<sup>2</sup> – Уральский федеральный университет имени Б.Н. Ельцина, 620002 Екатеринбург, ул. Мира, 19

\* - [stashkov@imp.uran.ru](mailto:stashkov@imp.uran.ru)

Представлены результаты исследований магнитных свойств технически чистого железа, углеродистых сталей и никеля, подвергнутых упругим и пластическим деформациям. Измерялись полевые зависимости дифференциальной и обратимой магнитной проницаемости как на отожженных недеформированных образцах, так и на упруго и пластически деформированных образцах. Установлено, что появление дополнительных максимумов на кривых связано с возникновением магнитной текстуры типа «легкая плоскость» в образцах из-за остаточных или приложенных напряжений (рис. 1а). Одним из основных условий возникновения такой магнитной текстуры являются разные по знаку магнитострикция и напряжения ( $\lambda \cdot \sigma < 0$ ). Появление дополнительных максимумов на кривых связано со смещением преимущественно 90-градусных доменных границ, наиболее чувствительных к механическим напряжениям. Из экспериментально измеренных кривых были определены значения полей максимумов  $H_1$  и  $H_2$  (рис. 1б), а также рассчитаны значения механических напряжений сжатия в стальных образцах и растяжения в никеле:

$$\sigma_{xx} = -\alpha \frac{2\mu_0 H_{avg} M_S}{3\lambda_{100}}, \quad (1)$$

где  $M_S$  – намагниченность насыщения,  $\lambda_{100}$  – константа магнитострикции в направлении (100);  $\sigma_{xx}$  – компонента тензора механических напряжений,  $\alpha$  – коэффициент, связанный с типом кристаллической решетки ферромагнетика (0,82 для железа и феррито-перлитных сталей);  $H_{avg}$  – среднеарифметическое полей  $H_1$  и  $H_2$ .

Данный подход является новым и позволяет применить его для неразрушающего контроля механических напряжений в конструкциях и деталях из ферромагнитных материалах. Более подробно результаты работы приведены в [1-5].

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», №122021000030-1).

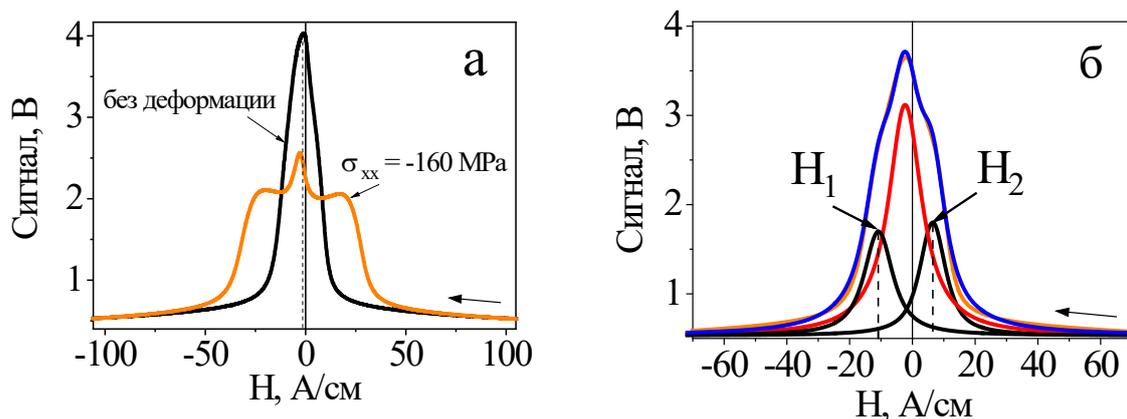


Рис. 1. Полевые зависимости сигнала индукционного преобразователя, пропорциональные обратной магнитной проницаемости, для технического чистого железа (а) и пример обработки экспериментальной кривой для нахождения полей  $H_1$  и  $H_2$  (б).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Nichipuruk A.P., Rozenfel'd E.V., Ogneva M.S., Stashkov A.N., Korolev A.V. An experimental method for evaluating the critical fields of moving domain boundaries in plastically tension-deformed low-carbon wires // Russ. J. Nondestruct. Test. 2014. V. 10. P. 18–26. DOI: 10.1134/S1061830914100088.
2. Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Korolev A.V. Magnetic incremental permeability as indicator of compression stress in low-carbon steel // NDT & E International. 2021. V. 118. P. 102398–102402. DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102398.
3. Stashkov A.N., Schapova E.A., Afanasiev S.V., Stashkova L.A., Nichipuruk A.P. Estimation of residual stresses in plastically deformed eutectoid steel with different perlite morphology via magnetic parameters // J. Magn. Mater. 2022. V. 546. P. 168850–168856. DOI: 10.1016/j.jmmm.2021.168850.
4. Stashkov A.N., Schapova E.A., Nichipuruk A.P., Stolbovsky A.V. Magnetic Incremental Permeability of Elastically Deformed Iron and Nickel // Journal of nondestructive evaluation. 2024. V. 43. P. 8–15. DOI:10.1007/s10921-023-01023-y.
5. Nichipuruk A.P., Stashkov A.N., Kuleev V.G., Schapova E.A., Osipov A.A. A Procedure and Device for Calibration-Free Determination of Residual Compression Stresses in Low-Carbon Steels Deformed by Tension. // Russ. J. Nondestruct. Test. 2017. V. 11. P. 772–778. DOI:10.1134/S1061830917110055.