

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА

А.В. Грузевич<sup>1,3</sup>, Д.Л. Никифоров<sup>2</sup>, Д.А. Дереча<sup>3,4</sup>, Ю.Б. Скирта<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Трипольская ТЭС. 08720, Киевская область, Обуховский р-н, г. Украинка. E-mail: Gruzevich@bigmir.net

<sup>2</sup>ПАО «Центрэнерго». 03022, г. Киев, ул. Казацкая, 120/4

<sup>3</sup>Институт магнетизма НАН Украины и МОН Украины. 03142, г. Киев, бульв. Акад. Вернадского, 36-б

<sup>4</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». 03056, г. Киев, просп. Победы, 57

Получены данные о взаимосвязи фазовых, структурных и магнитных свойств ферритно-перлитной стали 12Х1МФ как в исходном состоянии, так и после эксплуатации. Показано, что наибольшая интенсивность и величина изменения магнитного отклика проявляются в металле труб поверхностей нагрева, находившихся в эксплуатации и имеющих структуру, отличную от исходной. Представлена возможность использования величины скачкообразного изменения интенсивности магнитного поля, основанного на эффекте Баркгаузена, для обнаружения зон с недопустимыми структурными изменениями в металле поверхностей нагрева, а также зон максимальных концентраций напряжений, находящихся в зоне риска. Библиогр. 8, табл. 1, рис. 8.

*Ключевые слова:* магнитная индукция, структурно-фазовые состояния, эффект Баркгаузена, поверхность нагрева, гистерезис

В настоящее время для надежной работы энергетического оборудования ТЭС требуется повышение эксплуатационной надежности различных элементов конструкции котла. При этом удовлетворительное состояние металла труб поверхностей нагрева (ПН) является важнейшим условием безаварийной и экономичной работы котлоагрегата в целом.

Стандартные методы определения состояния металла ПН предусматривают проведение вырезов образцов из отдельных труб для оценки микроструктуры и уровня механических свойств. Данный подход не позволяет осуществить стопроцентный контроль металла котельных труб и предоставить объективную оценку необходимого объема замен в период ремонтных кампаний.

В связи с этим перспективным является использование методик магнитной диагностики, которая позволяет установить зависимости между механическими свойствами и структурными составляющими с магнитными характеристиками металла.

Данные методики (эффект магнитной памяти металла, явление температурного магнитного гистерезиса) основаны на использовании магнитоупругого, магнитомеханического эффектов, магнитопластики и получили значительное развитие в странах Европы и РФ, что отражено в ряде международных стандартов ISO 24497-1:2007(Е), 24497-2:2007(Е), 24497-3:2007(Е) и распорядительных документах (РД 34.17.446—97, РД 34.17.451-48).

В Украине магнитная диагностика не получила должного развития и, соответственно, практического применения.

Указанные выше методики, преимущественно, направлены на установление и локализацию зон концентрации максимальных напряжений, при этом остается неясной взаимосвязь между микроструктурой, механическими свойствами с областями аномальных скачков напряженности остаточного магнитного поля в металле котельных труб с различными сроками наработок.

Предложенная методика, основанная на эффекте Баркгаузена, позволяет провести изучение изменений ферритно-перлитных структур в процессе эксплуатации, оценить их влияние на изменение магнитного поля, а также предоставляет инструмент для выявления браковочных структур котельных труб в процессе эксплуатации и на начальном этапе работы энергетических установок.

Получение экспериментальных данных о влиянии магнитного поля важно не только для изучения возможностей определения свойств металлов и сплавов, но и для понимания причин такого влияния, создания теории воздействия магнитного поля на материал в процессе структурных превращений.

Как известно, метод шумов Баркгаузена основан на концепции индуктивного измерения амплитуды шумоподобных сигналов – шумов Баркгаузена, которые генерируются в ферромагнитном образце при приложении магнитного поля (рис. 1).

На амплитуду шумов Баркгаузена оказывают влияние любые включения в структуре, которые препятствуют движению доменных стенок, к которым относятся дефекты, например, инородные

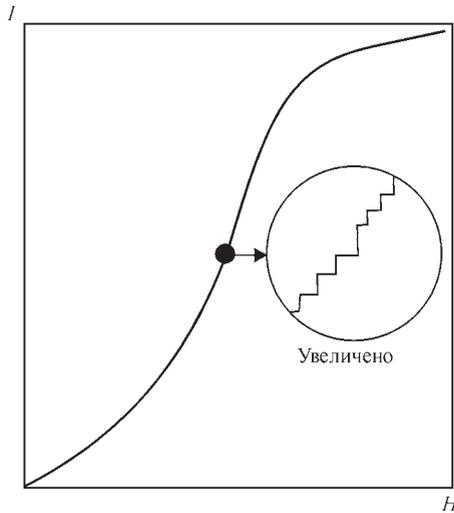


Рис. 1. Скачки Баркгаузена на кривой намагничивания [1]

включения подобно карбидным отложениям, микротрещины, микропоры, а также остаточные напряжения и микроструктура (рис. 2).

Так как твердость является характеристикой определенного структурного состояния, то по изменению твердости можно судить об изменениях, происходящих в микроструктуре материала [2].

Известно, что в общем случае магнитоупругий параметр возрастает при уменьшении твердости и увеличении напряжения растяжения и, напротив, амплитуда шумов Баркгаузена снижается при увеличении твердости и увеличении напряжения сжатия. Таким образом, измеряя амплитуду шума можно оценить остаточные напряжения в ферромагнитном материале или сделать заключение о состоянии микроструктуры детали [3, 4].

Таким образом, магнитные методы косвенной оценки свойств металлов позволяют, при значительном сокращении времени и объема испытаний, определять структурно-фазовые состояния элементов конструкций и степень их дефектности.

Авторами работы [3–5] рассматривался вопрос влияния перлита на генерацию шума Баркгаузена в простых углеродистых сталях. Реакции чисто перлитной и чисто ферритной микроструктур определяются как совершенно разные. Однако результаты образцов, содержащие ферритно-перлитные структуры, в результате различий в поведении закрепления доменных стенок между

различными микроструктурами, содержат повышенное значение высоты импульса, характерное для смешанного состава структур.

При этом число скачков при нарастании поля имеет характер, подобный зависимости индукции от намагничивающего поля и для некоторых ферромагнетиков практически линейна.

Целью данной работы является использование методов магнитного и структурного анализа для изучения эволюции структуры в слабомагнитных и магнитных материалах энергетического оборудования под влиянием различных факторов: температуры, механических напряжений, коррозионных процессов и т. п., имеющих место при эксплуатации.

Суть исследования заключается в установлении корреляции между структурной эволюцией и изменениями магнитных свойств материалов с увеличением срока наработки котельных труб.

Результаты работы позволят достоверно указывать степень структурного повреждения материалов, что особенно важно на начальных стадиях их разрушения.

Для исследования шумов Баркгаузена в образцах ферромагнитных материалов был сконструирован измерительный стенд (рис. 3).

Образцы были размещены в приемной катушке индуктивности в качестве сердечника, катушка вместе с образцом находилась между полюсами электромагнита. Развертка поля электромагнита происходит с помощью управляемого блока питания. Магнитное поле при этом менялось с шагом примерно 25 Э в пределах от -4,0 до 4,0 кЭ, точное значение магнитного поля измерялось с помощью датчика Холла. При изменении магнитного поля в катушке электромагнита на один шаг в исследуемом образце наблюдаются скачки Баркгаузена. Они индуцируют в приемной катушке импульсы напряжения, которые подаются на вход усилителя. После усиления предварительным усилителем сигнал оцифровывается с помощью звуковой карты, оцифрованные значения подаются в условных единицах – отсчетах 16 битного АЦП звуковой карты. Усилитель мощности и динамик выполняют роль звукового индикатора, который помогает качественно оценить наличие и интенсивность шумов

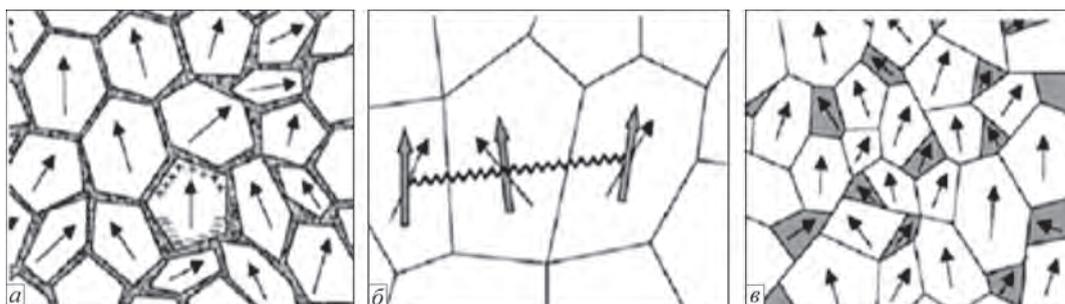


Рис. 2. Движение доменных стенок различных типов сплавов (а–в)

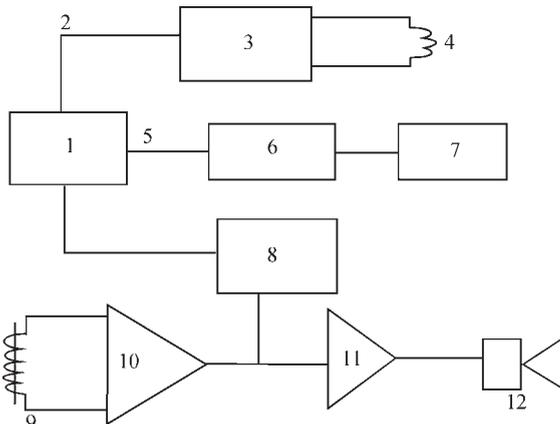


Рис. 3. Схема стэнда для ісследовання шумов Баркгаузена: 1 – комп'ютер; 2 – USB-інтерфейс; 3 – блок живлення Singlent SPD3303S; 4 – електромагніт; 5 – інтерфейс RS-485; 6 – АЦП I-7018; 7 – датчик Холла; 8 – звукова карта; 9 – приймальна котушка з образцом; 10 – попередній усилитель; 11 – усилитель потужності; 12 – динамік

Баркгаузена. Оцифровка починається в началі шага змінення поля і продовжується в теченні 2,27 с, що відповідає 100 000 відліків АЦП при частоті дискретизації 44 кГц. Для зменшення впливу шумів і спрощення розрахунків проводилось усереднення по кожному 100 відлікам АЦП. Визначали середню інтенсивність шумів Баркгаузена на кожному кроці вимірювань – різниця середньої амплітуди сигналу на звуковій карті в теченні реєстрації шумів Баркгаузена і середньої інтенсивності власних шумів котушки при незмінному полі. Після проведення циклу вимірювань була отримана залежність відносної інтенсивності шумів Баркгаузена в образці від напруги зовнішнього магнітного поля.

В дослідженні розглядалися зразки поверхностей нагріву енергетичного обладнання з різними характеристиками і нароботками. Серед них метал тилового екрана верхньої радіаційної частини (ВРЧ), поточного пароперегрівача (ППП), екрани поворотної камери (ЕПК) і метал нової труби. Зразки підверглися лабораторним дослідженням: візуальному огляду і макроаналізу; стилоскопічному аналізу; механічним випробуванням і металлографічному аналізу; дослідженню магнітних характеристик.

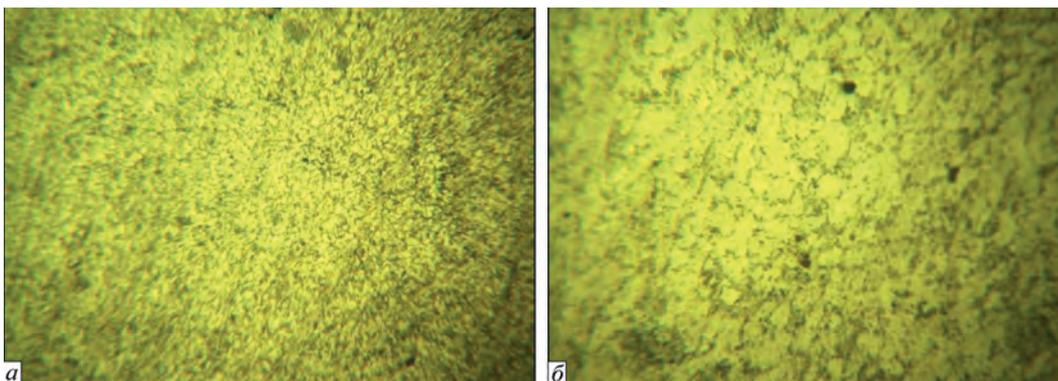


Рис. 4. Результати металлографічних досліджень зразка ВРЧ: а –  $\times 100$ ; б – 500

При проведенні спектрального аналізу склад контролювали рентгенофлуоресцентним спектрометром NITON XL2, у всіх зразках були виявлені наступні легируючі елементи: хром (в межах 1%), молибден (в межах 0,3%), ванадій (в межах 0,2%), що може відповідати їх проектній марці сталі 12Х1МФ.

При проведенні металлографічного аналізу зразка ВРЧ було встановлено: структура металу труби складається з зерен ферриту, перліта і карбидів і відповідає бальному 5–6 (згідно додатку В «Шкали мікроструктур котельних труб із сталі марок 12Х1МФ, 12Х1МФ – ПБ, 15Х1М1Ф і 12Х2МФСР», к ТУ 14-3-60:2009/ТУ У 27.2-05757883-207:2009). Зерна перліта рихлі, сфероїдезовані. По шкалі деградації перлітної складової, згідно СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009, структура відповідає бальному 3–4. Структура металу зразка, з боку обмуровки, складається з зерен ферриту, перліта і карбидів, що відповідає бальному 5 (додаток В). Межі зерен чіткі, зерна перліта рихлі. По шкалі деградації перлітної складової, згідно СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009, структура відповідає бальному 3.

На рис. 4 зображені результати металлографічних досліджень зразка ВРЧ з збільшенням 100 і 500. Наочно прослідковується на малюнку феррито-перлітна структура з включеннями карбидів.

Структура металу труби зразка нової труби (НТ) складається з зерен ферриту, перліта і карбидів, і відповідає бальному 4 (додаток В). По шкалі деградації перлітної складової, згідно СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009, структура відповідає бальному 1–2, а бали по шкалі полосчатості 0–1.

На рис. 5 зображені результати металлографічних досліджень зразка НТ з збільшенням 100 і 500. Наочно прослідковується на малюнку, що перлітна складової має кращий вигляд, ніж у зразка ВРЧ.

При проведенні металлографічного аналізу зразка ППП виявлено, що структура металу з «огневої» сторони складається з ферриту, перліта і малих карбидів по границям зерен. Межі зе-

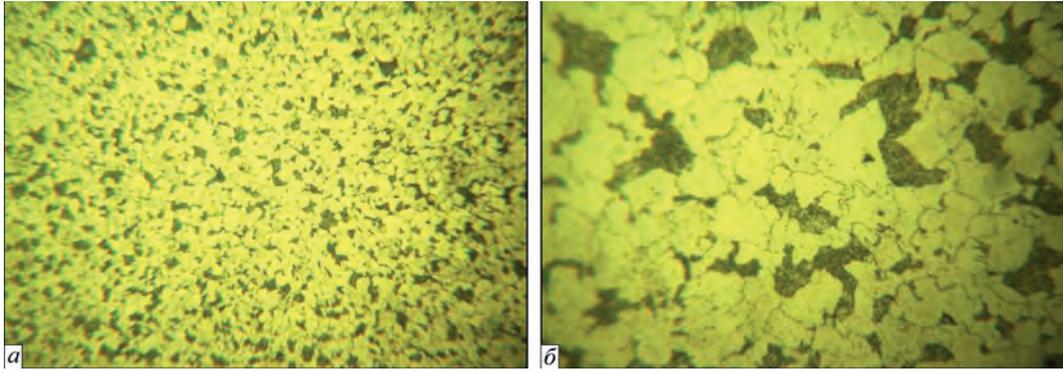


Рис. 5. Результаты металлографических исследований образца НТ: *a* –  $\times 100$ ; *b* – 500

рен четкие, перлит плотный. Структура металла по шкале (приложение В) соответствует баллу 4–5. По шкале деградации перлитной составляющей стали, согласно СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009, структура металла отвечает баллу 2. Структура металла со стороны обмуровки состоит из феррита, перлита и мелких карбидов по границам зерен. Границы зерен четкие, перлит плотный. Структура металла по шкале (приложение В) соответствует баллу 4–5. По шкале деградации перлитной составляющей стали, согласно СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009, структура металла отвечает баллу 1–2.

На рис. 6 изображены результаты металлографических исследований образца ППП с увеличением 100 и 500. Наглядно просматривается на рисунке, что перлитная составляющая имеет лучший вид, чем у образца ВРЧ.

При проведении металлографического анализа образца ЭПК выявлено, что структура метал-

ла предоставленной вырезки с «огневой» стороны и со стороны обмуровки идентична и состоит из феррита, сфероидизированного перлита и мелких карбидов по границам зерен. Границы зерен нечеткие, перлит рыхлый. Структура металла по шкале (приложение В) соответствует баллу 6–7. По шкале деградации перлитной составляющей стали, согласно СОУ-Н ЕЕ 20.321:2009, структура металла отвечает баллу 3–4.

На рис. 7 изображены результаты металлографических исследований образца ЭПК с увеличением 100 и 500. Наглядно просматривается на рисунке, что перлитная составляющая имеет вид хуже, чем у образцов ВРЧ и НТ.

Все полученные характеристики в результате механических испытаний занесены в таблицу.

Исходя из результатов механических испытаний характеристики образцов приближались к требуемым значениям согласно ТУ 14-3-460:2009/

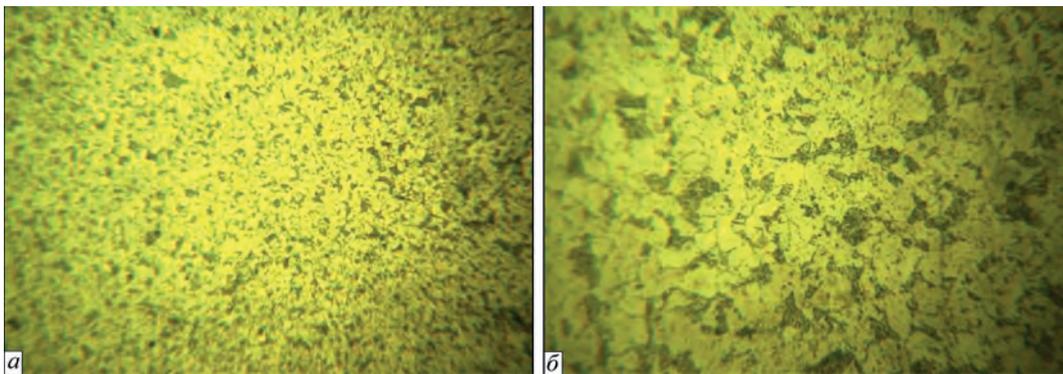


Рис. 6. Результаты металлографических исследований образца ППП: *a* –  $\times 100$ ; *b* – 500

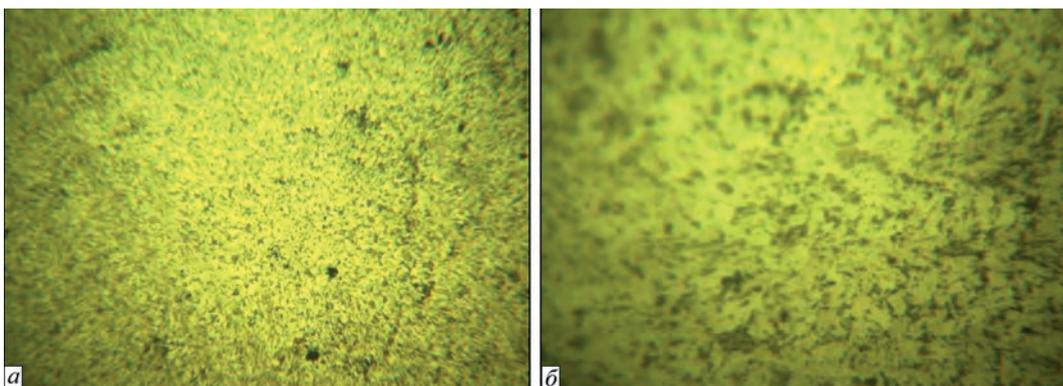


Рис. 7. Результаты металлографических исследований образца ЭПК: *a* –  $\times 100$ ; *b* – 500

Полученные значения характеристик для опытных образцов

Наименование образца	Характеристика металлов			Ширина петли гистерезиса, отн. ед.	Балл микро-структуры металла по ТУ 14-3-460:2009	Наработка, ч	Твердость <i>HВ</i>
	$\sigma_b$ , кг/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\psi$ , %				
Задний экран ВРЧ	48	23,5	78,3	9000	5–6	280814	134...151
ППП	образец 1	55,7	27,5	7000	4–5	14570	140...157
	образец 2	58,5	28,4		4–5		142...159
ЭПК (фронт, тыл)	51,3	24,5	70,1	10000	6–7	276651	133...150
НТ	50,2	28,2	75,6	5000	4	0	135...152
Согласно ТУ 14-3-460:2009	45...65	21	55	–	–	–	–

ТУ У 27.2-05757883-207:2009 «Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов».

В результате исследования были получены значения максимальных и усредненных значений накоплений интенсивности в каждой точке значений для каждого образца металлических поверхностей.

Для удобства был построен график средних значений накоплений интенсивности (рис. 8). Из графика видно, что наибольших значений интенсивности достигает образец ЭПК, характеризующийся максимальными значениями повреждения структуры металла, границы зерен данного образца не имеют четких границ, перлит рыхлый.

В случае, когда образцы имеют четкие границы зерен и отсутствуют значительные механические повреждения, дефекты, инородные включения подобно карбидным отложениям, микротрещины, микропоры, значения интенсивности шумов Баркгаузена имеют меньшие значения и их зависимость от магнитной индукции более линейна. Данные особенности характерны для графиков с минимальными значениями интенсивности образца ППП.

На графике явно прослеживаются зависимости интенсивности значений в абсолютных единицах

от изменения магнитной индукции. Данные результаты позволяют сделать вывод о возможности выявления механических повреждений, микротрещин, микропор в структуре металлических поверхностей магнитоупругим методом.

Из графиков (рис. 8) можно сделать вывод о зависимости интенсивности шумов Баркгаузена от изменения микроструктуры металла поверхностей нагрева. Полученные максимальные значения интенсивности сигнала в зависимости от магнитной индукции позволили вычислить значение площади петли гистерезиса. Данные были занесены в таблицу. Наибольшая ширина петли гистерезиса наблюдалась в металле котельных труб, дефектность которых была выше по сравнению с другими образцами [6–8].

**Выводы**

В результате работы полученные данные позволяют оценить степень взаимосвязи между магнитными свойствами металла поверхностей нагрева, состоянием их микроструктуры и механическими свойствами.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о целесообразности применения данного метода детекции шумов Баркгаузена для оценки изменений в структуре ферритно-перлитной стали 12Х1МФ в зависимости от срока их наработки.

**Список литературы/References**

1. Бозорт Р. (1956) *Ферромагнетизм*. Москва, Издательство иностранной литературы.  
Bozort, R. (1956) *Ferromagnetism*. Moscow, Inostr. Lit-ra [in Russian].
2. Бида Г.В. (2006) *Магнитные свойства термосточных сталей неразрушающий контроль их качества*. Москва, Маршрут.  
Bida, G.V. (2006) *Magnetic properties of thermostrengthened steels, nondestructive testing of their quality*. Moscow, Marshrut [in Russian].
3. Hakan Gur C. (2019) Microstructure Characterization of Heat-Treated Ferromagnetic Steels by Magnetic Barkhausen Noise Method. *Conference Paper*, Aug 2019.

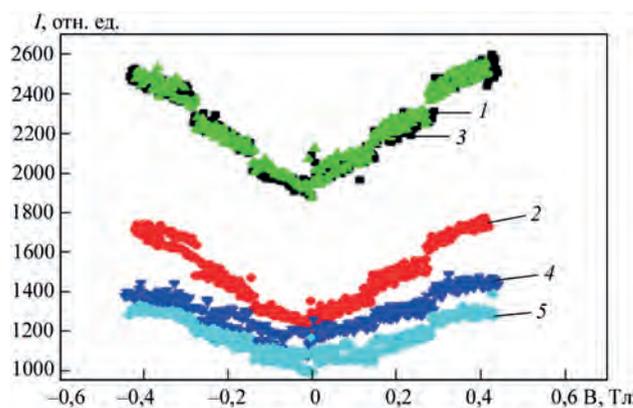


Рис. 8. График съемки по эффекту Баркгаузена (по оси OX – значение магнитного поля, Тл, по оси OY – значение интенсивности сигнала в относительных единицах): 1 – ЭПК (тыл); 2 – ВРЧ (тыл); 3 – ЭПК (фронт); 4 – ППП; 5 – НТ

4. Gur Hakan, Davut Kemal (2010) Monitoring the Microstructural Evolution in Spheroidized Steels by Magnetic Barkhausen Noise Measurements. *Journal of Nondestructive Evaluation*, **29**, 241–247.
5. Altpeter I., Cocogo P., Velasco K. (2016) Electromagnetic methods for characterization of materials. *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods 2016*, 225–262.
6. Anglada-Rivera, Jose & Padovese, L.R. & Capó-Sánchez, J. (2001). Magnetic Barkhausen Noise and hysteresis loop in commercial carbon steel: Influence of applied tensile stress and grain size. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials. J. Magn Magn Mater.* **231**, 299–306.
7. Lo, C.C.H. & Paulsen, Jason & Kinser, Emily & Jiles, David. (2004). Quantitative Evaluation of Stress Distribution in Magnetic Materials by Barkhausen Effect and Magnetic Hysteresis Measurements. *Magnetics, IEEE Transactions on*, **40**, 2173–2175.
8. Kikuchi, H. & Ara, Khushboo & Kamada, Y. & Kobayashi, Satoru. (2011). Characteristics of Barkhausen Noise Properties and Hysteresis Loop on Tensile Stressed Rolled Steels. *Journal of Magnetism*.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРНО-ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ НА МАГНІТНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛУ

А.В. Грузевич<sup>1,3</sup>, Д.Л. Нікіфоров<sup>2</sup>, Д.А. Дереча<sup>3,4</sup>, Ю.Б. Скірта<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Трипільська ТЕС. 08720, Київська область, Обухівський р-н, м. Українка. E-mail: Gruzevich@bigmir.net

<sup>2</sup>ПАТ «Центрэнерго». 03022, м. Київ, вул. Козацька, 120/4

<sup>3</sup>Інститут магнетизму НАН України та МОН України. 03142, м. Київ, бульв. Акад. Вернадського, 36-б

<sup>4</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 57

Отримано дані про взаємозв'язок фазових, структурних та магнітних властивостей ферито-перлітної сталі 12Х1МФ як в початковому стані, так і після експлуатації. Показано, що найбільша інтенсивність і величина зміни магнітного відгуку проявляються в металі труб поверхонь нагріву, які перебували в експлуатації та мають структуру, відмінну від початкової. Представлено можливість використання величини стрибкоподібної зміни інтенсивності магнітного поля, заснованого на ефекті Баркгаузена, для виявлення зон із неприпустимими структурними змінами в металі поверхонь нагріву, а також зон максимальних концентрацій напруг, що знаходяться в зоні ризику. Бібліогр. 8, табл. 1, рис. 8.

*Ключові слова:* магнітна індукція, структурно-фазовий стан, ефект Баркгаузена, поверхня нагріву, гістерезис

## INVESTIGATION OF THE IMPACT OF STRUCTURAL-PHASE TRANSFORMATIONS ON THE METAL MAGNETIC PROPERTIES

A.V. Gruzevich<sup>1,3</sup>, D.L. Nikiforov<sup>2</sup>, D.A. Derecha<sup>3,4</sup>, Yu.B. Skirta<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Tripolye TPS. 08720, Ukrainka, Obukhov District, Kyiv Region, Ukraine. E-mail: Gruzevich@bigmir.net

<sup>2</sup>PJSC «Tsentrenergo». 120/4 Kazatskaya Str., 03022, Kyiv, Ukraine.

<sup>3</sup>Institute of Magnetism of the NAS of Ukraine and MES of Ukraine. 36-b Acad. Vernadskii Blvd., 03142, Kyiv.

<sup>4</sup>NTUU «Igor Sykorsky Kyiv Polytechnic Institute», 57 Pobedi Prosp., 03056, Kyiv.

Data on interaction of phase, structural and magnetic properties of ferritic-pearlitic steel 12Kh1MF, both in the initial condition and after operation were obtained. It is shown that the highest intensity and magnitude of magnetic response variation are manifested in the metal of heating surface pipes, which have been in operation and have the structure different from the initial one. A possibility is presented of using the magnitude of jump-like changes of magnetic field intensity based on Barkhausen effect, in order to detect zones with inadmissible structural changes in the metal of the heating surfaces, as well as zones of maximum stress concentration, located in the risk zone. 8 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

*Keywords:* magnetic induction, structural-phase state, Barkhausen effect, heating surface, hysteresis

Поступила в редакцію  
09.12.2019

**Передплата — 2020 на журнал «Технічна діагностика та неруйнівний контроль»  
www.patonpublishinghouse.com/rus/journals/tdnk  
Передплатний індекс 74475**

Україна		Зарубіжні країни	
на півріччя	на рік	на півріччя	на рік
400 грн.	800 грн.	30 дол. США	60 дол. США

У вартість передплати включена доставка рекомендованою банделроллю.

Передплату на журнал «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» можна оформити безпосередньо через редакцію або по каталогам передплатних агентств: ДП «Преса», «Пресцентр», (Україна); каталог зарубіжних видань «Белпочта» (Білорусь); каталог АТ «Казпочта» видання України (Казахстан). Передплату також можна оформити самостійно через сайт видавництва.