УДК:537.634:620.179.17

В.Р.Скальський[1], С.І.Гірний[1], Б.П. Клим[1], Є.П.Почапський[1], П.М.Долішній[1], Я.Д.Толопко[1], П.П. Великий[1], О.С. Дубицький[2]
[1]Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка, НАН України
[2]Луцький національний технічний університет

ВПЛИВ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙНОЇ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ НА ПАРАМЕТРИ СИГНАЛІВ МАГНЕТОПРУЖНОЇ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

У статті наведено результати експериментальних досліджень впливу пластичної деформації конструкційної вуглецевої сталі 15 на параметри сигналів магнетопружної акустичної емісії (МАЕ). Показано, що за незначних пластичних деформацій сума амплітуд сигналів МАЕ суттєво зменшується. Співвідношення між сумами амплітуд сигналів МАЕ, генерованих у вихідному та деформованому зразку досягає свого максимального значення за низьких значень напруженості магнетного поля 0,2–0,4 кА/м. Отримані результати свідчать про перспективність даного методу неруйнівного контролю у виявленні пластично-деформованих ділянок феромагнетних елементів конструкцій і машин.

Ключові слова: *магнетопружна акустична емісія, магнетне поле, феромагнетик, низьковуглецева сталь, стрибки Баркгаузена, пластична деформація*

Актуальність проблеми

Явище магнетопружної акустичної емісії (МАЕ), тобто генерування пружних хвиль акустичної емісії під час перемагнечування феромагнетних матеріалів, було виявлено Лордом під час досліджень намагнечування нікелевих стрижнів у 1974 році [1]. Пружні хвилі виникають в об'ємі феромагнетика через раптове, стрибкоподібне переміщення деменних стінок, що розділяють домени з напрямками векторів намагнечення іншими ніж 180°. Для об'ємо-центрованого заліза (α-Fe) такими є 90°-ні доменні стінки, що розташовані в межах окремих зерен. Щодо 180°-них, тобто антипаралельних доменних стінок, то їх раптові переміщення в процесі намагнечення феромагнетиків зумовлюють відповідні стрибкоподібні зміни магнетної індукції матеріалу, що можна реєструвати зовнішньою електричною котушкою, в якій дискретні зміни магнетного поля, що її перетинають, викликають наведену напругу імпульсного характеру. Про такі електричні імпульси вперше повідомив Баркгаузен у 1919 році [2] і це явище отримало назву ефекту Баркгаузена, а стрибкоподібне переміщення стінок доменів в процесі перемагнечування матеріалу названо стрибками Баркгаузена.

Дослідження МАЕ феромагнетиків, на відміну від електромагнетних досліджень ефекту Баркгаузена, стали можливими лише із розвитком акустико-емісійного інструментарію впродовж останніх десятиліть [3-19] і тому перебувають в початковому стані. За винятком незначного числа фундаментальних праць на цю тему [12,13,18], в літературі переважають дослідження, що тематично дуже вузькі. Серед них спроби встановлення кореляцій між параметрами сигналів МАЕ та фізичними властивостями матеріалів. Наприклад, вивчали залежність параметрів сигналів МАЕ від типу мікроструктури, розміру зерна [4,7], морфології карбідних та інших неметалевих включень, твердості металу [5], міжзеренної сегрегації неметалевих включень [6], кількості перлітної фази [10]. Низка праць присвячена оцінці об'ємного деградування феромагнетних матеріалів під впливом циклічних навантажень [11], високотемпературної повзучості в умовах парогенераторів теплоелектростанцій [14,15], нейтронного опромінення та високої температури в умовах ядерних реакторів електростанцій [8], напружень у феромагнетику [3,9], взаємної орієнтації магнетного поля та поля механічних напружень [12], пластичної деформації [17] тощо.

Стан проблеми

Пластична деформація зумовлює зміну дислокаційної структури металу, що веде до значних змін його магнетних властивостей [17]. Зі зростанням густини дислокацій збільшується кількість перешкод для руху міждоменних стінок, а отже ускладнюється процес перемагнечування феромагнетика. Встановлена у попередніх дослідженнях чутливість параметрів сигналу МАЕ до механічних напружень та деформацій [3] зумовила пошуки щодо впровадження методу МАЕ як потенційно ефективного засобу неруйнівного контролю машин і елементів конструкцій, виготовлених із феромагнетних матеріалів. В Україні, де питання надійності роботи та продовження ресурсу конструкцій, машин та споруд має неабияку вагу, внесок у розвиток цього

методу зробили вчені Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України [18]. Для ефективного впровадження у виробництво систем неруйнівного контролю методом МАЕ необхідно провести численні дослідження з метою виявлення та селекції найчутливіших і найстабільніших параметрів сигналів та оптимізації як елементів збудження магнетного поля, так і систем відбору акустико-емісійних даних.

Проведення експериментальних досліджень

На рис. 1 показано навантажувальний пристрій, у якому здійснювали одночасне деформування зразка, його перемагнечування та відбір сигналів МАЕ, що при цьому генеруються. Зразок розмірами 3х30х245 мм виготовили із листової сталі 15. Ця сталь відноситься до ферито-перлітного класу із високим об'ємним вмістом феритної фази, в межах якої відбуваються стрибки Баркгаузена. Тензометричні мости для вимірювань навантаження та переміщення захопів підключали до двох параметричних каналів цифрової вимірювальної системи SKOP-8M. Зразок встановлювали у соленоїд, на який подавали з програмованого генератора напругу синусоїдальної форми з можливістю регулювати її амплітуду та частоту. Проведено дві серії вимірювань: до і після пластичного деформування металу. У кожній серії реєстрували МАЕ для наростаючих значень максимальних амплітуд напружень магнетного поля, починаючи від 0,1 кА/м до 0,85 кА/м, тобто значно нижче, ніж область магнетного насичення металу.

У верхній частині зразка розміщували п'єзокерамічний перетворювач сигналів МАЕ з робочою смугою частот 200-600 кГц, акустичний контакт якого із поверхнею зразка забезпечували за допомогою акустичнопрозорого контактного шару. Отриманий на виході перетворювача електричний сигнал подавали на вхід попереднього підсилювача з коефіцієнтом підсилення 40 дБ, а відтак – на вхід інформаційно-вимірювальної акустико-емісійної системи МАЕ-1Л. Фіксували суму амплітуд імпульсів сигналів МАЕ згідно методики, описаної у праці [19].

Рис. 1 Загальний вигляд обладнання для випробувань.

На рис. 2. наведено криву напруження-деформація σ–ε досліджуваної вуглецевої сталі. Зразок деформували пластично за напружень в околі межі текучості матеріалу. Після досягнення кожного ступеня навантаження його розвантажували і проводили реєстрування сигналів МАЕ.

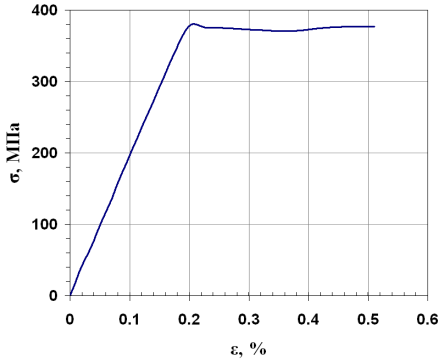

Рис. 2 Діаграма розтягу зразка

©В.Р.Скальський, С.І.Гірний, Б.П. Клим, Є.П.Почапський, П.М.Долішній, Я.Д.Толопко, П.П. Великий, О.С. Дубицький

Сигнал МАЕ має імпульсний характер, причому інтенсивність імпульсів пропорційна швидкості зміни магнетної індукції матеріалу. Його типовий вигляд показано на рис. 3 за частоти перемагнечування 10 Гц. Добре помітне періодичне зростання імпульсної активності двічі у періоді перемагнеченні металу.

У наших експериментах сигнал МАЕ записували під час перемагнечування сталі за умов синхронізації моменту початку запису даних із моментом зміни напрямку синусоїдальної напруги живлення соленоїда. Частоту оцифровування сигналу МАЕ вибрали 1 МГц, причому кожна вибірка містила 64000 даних, що дозволяло повністю перекрити півперіод для частоти 9 Гц, за якої проводили перемагнечування досліджуваного зразка. За допомогою відповідного програмного забезпечення проводили розрахунок суми амплітуд згідно відомої методики [18].

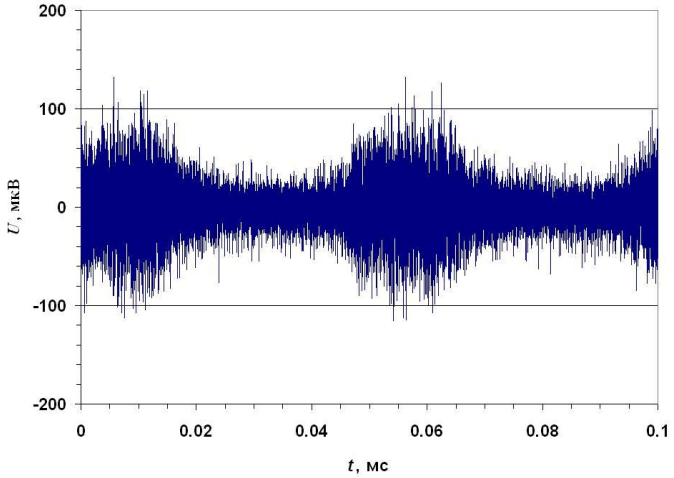

Рис. 3. Типовий сигнал МАЕ за частоти збудження магнетного поля 10 Гц синусоїдальною формою напруги

Залежність суми амплітуд сигналів МАЕ вихідного зразка і пластично-деформованого металу зображено на рис. 4. Інтенсивність сигналів зі зразка за пластичного деформування як за низьких, так і за високих значень напруженості магнетного поля суттєво знижується. У сильніших полях (> 0,6 кА/м) бачимо зменшення кута нахилу кривої. Підвищення напруженості поля пов'язане зі збільшенням струму живлення соленоїда через зменшення індуктивного опору, що, в свою чергу, зумовлено зниженням магнетної проникності металу, який зазнав пластичної деформації. Цей фактор, хоч і незначним чином, все ж збільшує чутливість методу МАЕ до пластичної деформації. Ще одним спостереженням із отриманих залежностей є нижча швидкість наростання суми амплітуд сигналів МАЕ від напруженості магнетного поля в області малих полів (0,1–0,3 кА/м) для пластично-деформованого металу. Це, можливо, пов'язане із блокуючим впливом дислокацій.

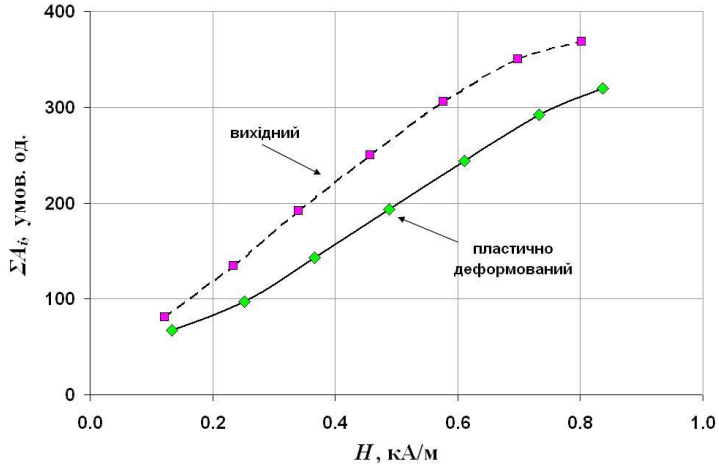

Рис. 4 Залежність суми амплітуд сигналів МАЕ від напруженості магнетного поля в соленоїді для вихідного та пластично-деформованого зразка. ΣAi

Розглянемо як впливає напруженість магнетного поля на чутливість вибраного параметра МАЕ. Для цього розрахували співвідношення між сумами амплітуд сигналу для вихідного та пластично деформованого зразка, тобто даних, наведених на рис. 4. Оскільки, як зазначалось вище, абсциси точок двох кривих на рис. 4 дещо зміщені, то для розрахунку використовували інтерпольовані значення суми амплітуд сигналів МАЕ, отриманих від пластично деформованого металу для тих значень напруженості магнетного поля, що відповідають абсцисам точок для сигналів від вихідного металу. Залежність цього співвідношення від напруженості магнетного поля наведена на рис. 5. Спостерігається максимум в області низьких значень напруженості поля: 0,2–0,4 кА/м. Тут сума амплітуд сигналів МАЕ зменшується майже в півтора рази через вплив пластичної деформації.

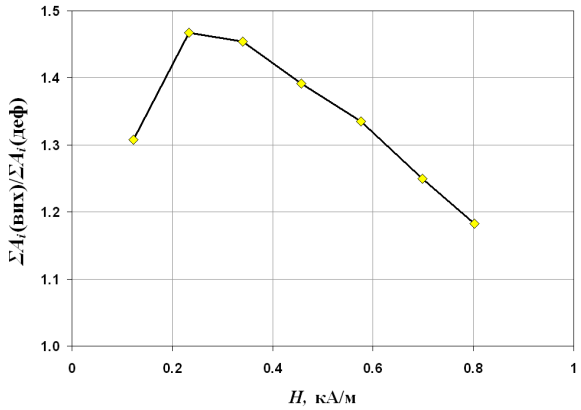

Рис. 5 Вплив напруженості магнетного поля в соленоїді на співвідношення сум амплітуд сигналів магнетопружної акустичної емісії для вихідного та пластично деформованого до 0,32% зразка.

Висока чутливість параметру сигналу МАЕ до пластичної деформації за низьких значень напруженості магнетного поля є дуже привабливою для розробки МАЕ-інструментарію для неруйнівного контролю обладнання і споруд, оскільки суттєво зменшуються вимоги до потужності електромагнетної системи перемагнечування матеріалів в реальних елементах конструкцій. Для цього необхідно створювати накладні електромагнети, що містять феромагнетне осердя та електричну котушку, що живиться від генератора змінної напруги низької частоти.

Висновки

У статті показано, що деформування сталі 15 в області межі текучості суттєво зменшує суму амплітуд сигналів МАЕ в межах зміни напружень магнетного поля 0,1–0,85 кА/м. Співвідношення між сумами амплітуд сигналів МАЕ, генерованих у вихідному та деформованому зразку досягає свого максимального значення за низьких значень напруженості магнетного поля 0,2–0,4 кА/м. Отримані результати свідчать про перспективність побудови відповідного методу неруйнівного контролю з використанням цього ефекту.

1. Lord A.E., Usatchev R., Robinson M. Acoustic emission associated with changes of magnetization in thin nickel rods // Letters in Applied and Engineering Sciences. – 1974. – **2**. – P. 1-9.
2. Barkhausen H. Geräusche beim Ummagnetisieren von Eisen // Physikalische Zeitschrift. – 1919. – **20**. – S. 401–402.
3. Kusanagi H., Kimura H., Sasaki H. Stress effect on the magnitude of acoustic emission during magnetization of ferromagnetic materials // Journal of Applied Physics. – 1979. – **50**. – P. 2985-2987.
4. Grain size measurements using magnetic and acoustic Barkhausen noise / R. Ranjan, D. C. Jiles, O. Buck, R. B. Thompson // Journal of Applied Physics. – 1987. – **61**. – P. 3199–3201.
5. Kameda J., Ranjan R. Nondestructive evaluation of steels using acoustic and magnetic Barkhausen signals— I. Effect of carbide precipitation and hardness // Acta Metallurgica. – 1987. – **35**. – P. 1515–1526.
6. Kameda J., Ranjan R. Nondestructive evaluation of steels using acoustic and magnetic barkhausen signals—II. Effect of intergranular impurity segregation // Acta Metallurgica. – 1987. – **35**. – P. 1527–1531.

©В.Р.Скальський, С.І.Гірний, Б.П. Клим, Є.П.Почапський, П.М.Долішній, Я.Д.Толопко, П.П. Великий, О.С. Дубицький

7. The effect of nickel hardness and grain size on acoustic and electromagnetic Barkhausen emission / R. Hill, R. S. Geng, A. Cowking, J. W. Mackersie // NDT & E International. – 1991. – **24**. – P. 179–186.
8. Kwon O.-Y., Ono K. Detection of irradiation effects of reactor vessel steels by magneto-acoustic emission // Journal of Acoustic Emission. – 1991. – **9**. – P. 227–236.
9. Effect of stress on magneto-acoustic emission from mild steel and nickel / D.H.L. Ng, J.P. Jakubovics, C.B. Scruby, G.A.D. Briggs // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1992. – **104–107**, 355–356.
10. Dhar A., Clapham L., Atherton D.L. The influence of pearlite on magneto-acoustic emission in plain carbon steels // Acta Metallurgica et Materialia. – 1993. – **41**. – P. 199–204.
11. Evaluation of fatigue damage in steel structural components by magnetoelastic Barkhausen signal analysis / M. R. Govindaraju, A. Strom, D. C. Jiles and oth. // Journal of Applied Physics. – 1993. – **73**. – P. 6165–6167.
12. Augustyniak B. Correlation between acoustic emission and magnetic and mechanical Barkhausen effects // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1999. – **196-197**. – P. 799-801.
13. Examination of the relationship between the parameters of Barkhausen effect model and microstructure of magnetic materials / C.C.H. Lo, S.J. Lee, L.C. Kerdus, D.C. Jiles // Journal of Applied Physics. – 2002. – **91**. – P. 7651–7653.
14. Designing a magnetoacoustic emission measurement configuration for measurement of creep damage in power plant boiler tubes / B. Augustyniak, M. Chmielewski, L. Piotrowski, M. J. Sablik // Journal of Applied Physics. – 2002. – **91**. – P. 8897–8899.
15. Microscopic impact of creep damage incipience and development on the magnetic properties of ferromagnetic Cr–Mo steel / Augustyniak B., Piotrowski L., Chmielewski M., Sablik M.J. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2006. – **304**. – P. e555-e557.
16. Клим Б.П., Почапський Є.П., Скальський В.Р. Інформаційно-обчислювальна система обробки сигналів магнітопружної акустичної емісії // Техническая диагностика и неразрушающ. контроль. – 2008. – №2. – С. 43 – 49.
17. *The influence* of plastic deformation on the magnetoelastic properties of the CSN12021 grade steel / Piotrowski L., Augustyniak B., Chmielewski M., Tomas I. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2009. – **321**. – P. 2331-2335.
18. *Кількісна* оцінка стрибків Баркгаузена за сигналами магнетоакустичної емісії / Скальський В.Р., Сергієнко О.М., Михальчук В.Б., Семигинівський Р.І. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2009. – **45**, № 3. – С. 67-75.
19. *Вплив* водню на зміну потужності стрибків Баркгаузена / Назарчук З.Т., Скальський В.Р., Клим Б.П., Рудавський Д.В., Великий П.П., Толопко Я.Д. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2009. – **45**, № 5. – С. 49-54.