

ВПЛИВ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ НА СИГНАЛ ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА МАГНІТНОЇ АНІЗОТРОПІЇ

В. М. УЧАНІН¹, С. М. МІНАКОВ²

¹Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.

E-mail: uchanin@ipm.lviv.ua

²НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37

Представлено результати дослідження розробленого вихрострумowego перетворювача магнітної анізотропії з робочим діаметром 17 мм. Показано чутливість перетворювача до напружень розтягу і стиску у феромагнітних сталях. Зокрема, показано характер годографів сигналів на робочих частотах 5,0; 20,0 і 50,0 кГц від напружень розтягу і стиску, створених під час реалізації циклу «навантаження–розвантаження» по схемі чотириточкового згину. Показано протилежний напрямок годографів для напружень розтягу і стиску від точки балансування, що дозволяє визначити характер напружень за напрямком годографу у комплексній площині або по знаку вихідного сигналу після амплітудно-фазового перетворення. Досліджено зміни амплітуди сигналу вихрострумowego перетворювача під час реалізації циклу навантаження–розвантаження. Показано існування магнітопружного гістерезису для обох видів напружень. Бібліогр. 24, рис. 4

Ключові слова: механічні напруження розтягу і стиску, магнітна анізотропія, вихрострумований перетворювач, годограф, магнітопружний гістерезис

Стан проблеми. Оцінювання технічного стану і прогнозування довговічності конструкцій неможливі без інформації про їх напружений стан. Особливої уваги слід приділяти критичним елементам конструкцій, де робочі напруження можуть додаватися до залишкових напружень. Зокрема це стосується зварних конструкцій через характерні залишкові напруження, викликані усадкою металу і фазовими змінами під час формування зварного шва [1–3].

Існуючі методи вимірювання напружень в елементах конструкцій можна поділити на руйнівні і неруйнівні [4]. До найбільш популярних для визначення залишкових напружень відносяться механічні методи, побудовані на вимірюваннях деформацій під час відокремлення певної частки матеріалу конструкції. В якості прикладу можна назвати метод отвору з тензометричними вимірюваннями поверхневих деформацій [5]. Загалом, крім цього, відомо багато інших фізичних методів, серед яких на практиці найчастіше використовують рентгенівський, ультразвуковий, тензометричний, оптичні (голографічний і метод електронної спекл-інтерферометрії) і магнітні методи [4, 6–10]. Кожний з цих методів має свої переваги і обмеження, через що формуються відповідні сфери їх застосування.

Значного поширення для визначення напруженого стану набули магнітні методи, побудовані на властивості феромагнітних матеріалів змінювати магнітний стан під впливом механічних напружень, що обумовлено перебудовою магнітних

доменів [7]. Ця магнітомеханічна взаємодія обумовлена дією зворотного магнітострикційного ефекту (ефект Віллари). Більшість магнітних методів побудовано на залежності різних параметрів петлі гістерезису або параметрів шумів Баркгаузена від напружень [7–11]. В той же час встановити однозначну функціональну залежність між цими параметрами і напружено-деформованим і структурним станом поки не вдається, незважаючи на незаперечні успіхи у застосуванні цих методів.

Довгу історію розвитку мають магнітопружний і магнітоанізотропний способи визначення напруженого стану, які також використовують зворотний магнітострикційний ефект [12–20]. Магнітоанізотропний метод побудований на визначенні зміни анізотропії магнітних властивостей контрольного матеріалу, що виникають під дією робочих і залишкових напружень. Тобто йдеться про складову магнітної анізотропії, яка обумовлена напруженнями, на відміну від її кристалографічної і текстурної складових [21]. В англійській літературі цю особливість іноді підкреслюють вдалим терміном «Stress induced magnetic anisotropy method». Використання магнітоанізотропних перетворювачів дозволяє зменшити вплив низки факторів, пов'язаних з впливом температури, зовнішніх магнітних полів, змін зазору між перетворювачем і контрольною поверхнею тощо. Крім того, нами показано інваріантні властивості магнітоанізотропного методу щодо структурного стану матеріалу, що вигідно відрізняє його від інших магнітних методів і створює передумови для побудови способів роздільного визначення структурного і напруженого стану

матеріалу на основі використання одночасно двох магнітних методів [20, 22].

Магнітоанізотропний спосіб контролю традиційно відносять до магнітних способів можливо через те, що він базується на змінах магнітної проникності. Але у цій роботі будемо дотримуватися альтернативної думки і вважати його варіантом вихрострумowego методу, зважаючи на використання (у нашому випадку) змінного електромагнітного поля. Можливим компромісом тут може бути усвідомлення певного дуалізму цього методу, коли за характером первинного електромагнітного поля метод є типово вихрострумowym, а за параметром досліджуваного матеріалу, який впливає на сигнал, – магнітним. Повернення магнітоанізотропного способу вимірювання напружень в «лоно» вихрострумowego методу [20] дозволяє застосувати традиційні для цього методу підходи, зокрема пов'язані з презентацією сигналу первинного перетворювача, що буде реалізовано в даній роботі.

Методика досліджень. Конструкція вихрострумowego перетворювача магнітної анізотропії (ВСПМА) дозволяла визначити різницю між значеннями вторинного електромагнітного поля вихрових струмів в двох точках, де їх напрямки (і відповідно напрямки первинного електромагнітного поля) є ортогональними [23]. Це можливо виконати, коли обмотки збудження і вимірювання розміщені анаксіально. Вторинне електромагнітне поле в кожній точці буде залежати від складових магнітної проникності для відповідних ортогональних напрямків первинного поля, які в свою чергу залежать від прикладених чи залишкових напружень. В конструкції використовували дві генераторні і дві вимірювальні обмотки, розміщені на феритових осердях діаметром 4,3 мм. Робочий діаметр ВСПМА 17 мм. Вихідні сигнали ВСПМА реєстрували стандартним універсальним вихрострумowym дефектоскопом типу ВД 3-81 [24]. Зміни сигналу ВСПМА реєстрували у комплекс-

ній площині дефектоскопа на робочих частотах 5,0; 20,0 і 50,0 кГц під час навантажень розтягу і стиску. Крім цього, в режимі вимірювання реєстрували зміни амплітуди сигналів під час навантажень розтягу і стиску на робочих частотах 5,0 і 10,0 кГц.

Експериментальна установка з встановленим на зразку ВСПМА і вихрострумowym дефектоскопом подана на рис. 1, а. Установка працює по схемі чистого згину, що забезпечується чотириточковим навантаженням силами P (рис. 1, б). Перевагою такого навантаження є можливість формування напружень двох типів (стиску і розтягу) на різних сторонах зразка. Із розподілу моментів M згину по довжині зразка (рис. 1, б) видно, що в центральній зоні зразка між точками прикладання сили P формується однорідний розподіл напружень (поперечна сила на цій ділянці також відсутня). Це важливо, так як сигнал ВСПМА не буде залежати від його положення на зразку у цих межах. Прикладені сили можна змінювати вручну шляхом гвинтового опускання важеля (на рис. 1, а) важіль показано зверху, а гвинт важеля праворуч). Для визначення напружень здійснювали вимірювання прогину у середині зразка за допомогою індикатора «годинникового типу» (див. рис. 1, а) із ціною поділки 0,01 мм, який попередньо був прокалібрований за допомогою динамометра.

Досліджували зразки із сталі 09Г2С із перерізом 8×60 мм та довжиною 450 мм. Під час встановлення ВСПМА на зразок за умови нульових напружень на виході буде спостерігатися сигнал, пов'язаний з текстурною складовою магнітної анізотропії матеріалу і не ідеально однаковою чутливістю зондів вимірювання електромагнітного вторинного поля. Пов'язана з цими факторами похибка має адитивний характер і може бути компенсована стандартною для вихрострумowych дефектоскопів процедурою компенсації небалансу. Для цього дефектоскоп має функцію векторної

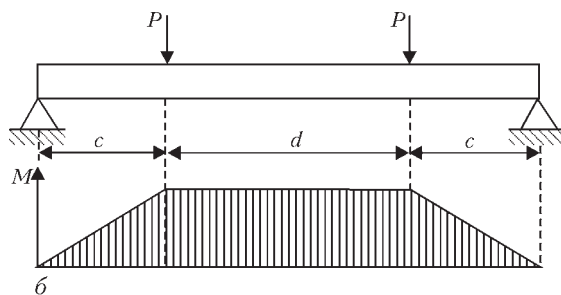


Рис. 1. Експериментальна установка для чотириточкового навантаження з вихрострумowym дефектоскопом типу ВД 3-81 (а) по схемі чистого згину (б): $c = 100$; $d = 200$ мм

компенсації небалансу ВСПМА в автоматичному режимі (операція балансування). Очевидно, що традиційна для вихрострумових дефектоскопів векторна компенсація забезпечує вищу точність вимірювання порівняно з компенсацією постійної напруги небалансу після фазочутливого детектора, яка застосована у більшості відомих приладів для визначення напружень магнітоанізотропним способом. Операцію компенсації небалансу здійснювали під час встановлення ВСПМА на зразок у розвантаженому стані перед проведенням навантаження. Таким чином, амплітуда сигналу ВСПМА U_{σ} під час навантаження обумовлена тільки наведеними напруженнями змінами магнітної анізотропії матеріалу зразка.

Результати досліджень. Годографи сигналів ВСПМА, які характеризують зміни сигналу в комплексній площині на робочих частотах 5,0; 20,0 і 50,0 кГц під час реалізації циклу навантаження-розвантаження зі створенням напружень розтягу і стиску від 0 до 225 МПа, подано на рис. 2. Попередньо напрямком годографів відносно нульової точки після балансування (на рис. 2 помічено цифрою 1) під час навантаження розтягу був зорієнтований вгору (приблизно вертикально) вибором відповідного повороту комплексної площини дефектоскопу. Чутливість вибиралась такою, щоб відповідний годограф при навантаженні розтягу до максимального рівня не виходив за межі екрану дефектоскопу.

З ростом напружень розтягу амплітуда сигналу зростає і точка, що відповідає кінцю вектора вимірюваного сигналу ВСПМА, відхиляється від нульової точки вертикально вгору відповідно до

попередньо вибраного повороту комплексної площини. Під час розвантаження зразка ця точка пересувається у зворотному напрямку, тобто відповідні годографи сигналів ВСПМА під час навантаження і розвантаження зразка на рис. 2 збігаються.

Зі зростанням напружень стиску амплітуда сигналу також зростає, але відповідна точка годографу відхиляється від нульової точки у протилежному напрямку, тобто приблизно вертикально вниз.

За малих навантажень годографи змін сигналів близькі до лінійних, тобто фазовий кут сигналів практично не змінюється. І тільки, коли напруження досягають певного рівня можна спостерігати незначні зміни фазового кута сигналу і, відповідно, незначну нелінійність годографів.

За напрямком годографів сигналу ВСПМА можна визначати характер напружень (розтягу або стиску), але за умови, що відповідна операція балансування ВСПМА виконана під час його встановлення на повністю розвантаженому зразку. Якщо балансування ВСПМА буде здійснено на зразку з певним рівнем напружень, цей рівень напружень буде умовно вважатися нульовим і відповідна точка буде встановлена в центр комплексної площини.

Зміни амплітуди сигналу залежно від рівня напружень розтягу в діапазоні від 0 до 225 МПа під час реалізації циклу навантаження-розвантаження подано на рис. 3. Відповідні зміни амплітуди сигналу залежно від рівня напружень стиску в тому ж діапазоні напружень подано на рис. 4.

Отримані залежності змін амплітуди сигналу ВСП для циклів навантаження-розвантаження розтягу (рис. 3) і стиску (рис. 4) демонструють високу чутливість розроблених ВСПМА до різних видів на-

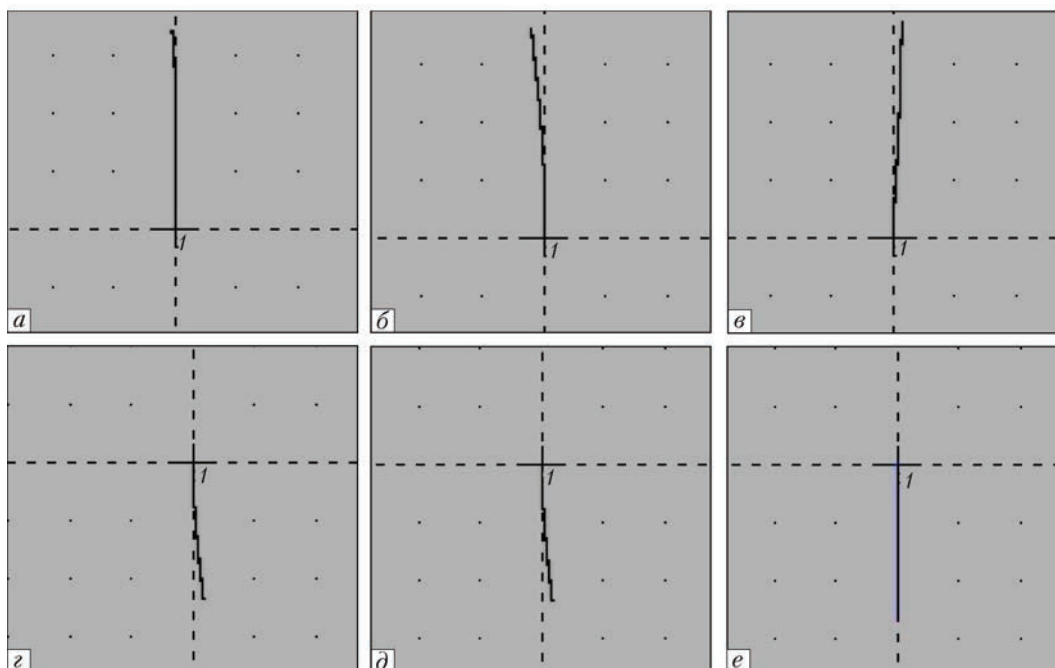


Рис. 2. Годографи сигналів ВСПМА під час зміни напружень розтягу (а-в) і стиску (z-е) на робочих частотах 5,0 (а, z); 20,0 (б, д) і 50,0 кГц (в, е)

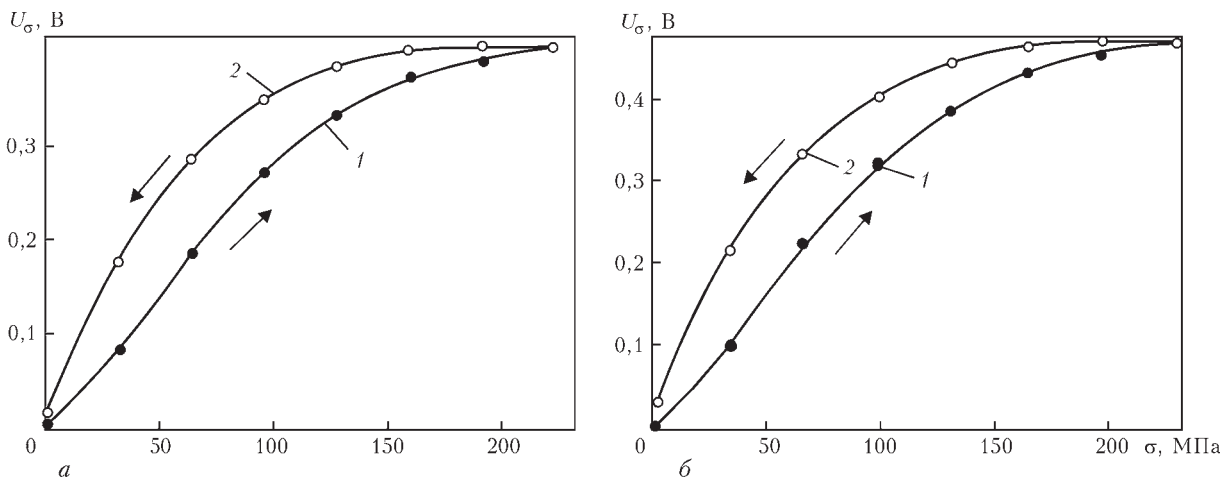


Рис. 3. Залежність амплітуди сигналу ВСПМА від рівня навантаження розтягу (1) з наступним розвантаженням (2) на робочих частотах 5,0 (а) і 10,0 кГц (б)

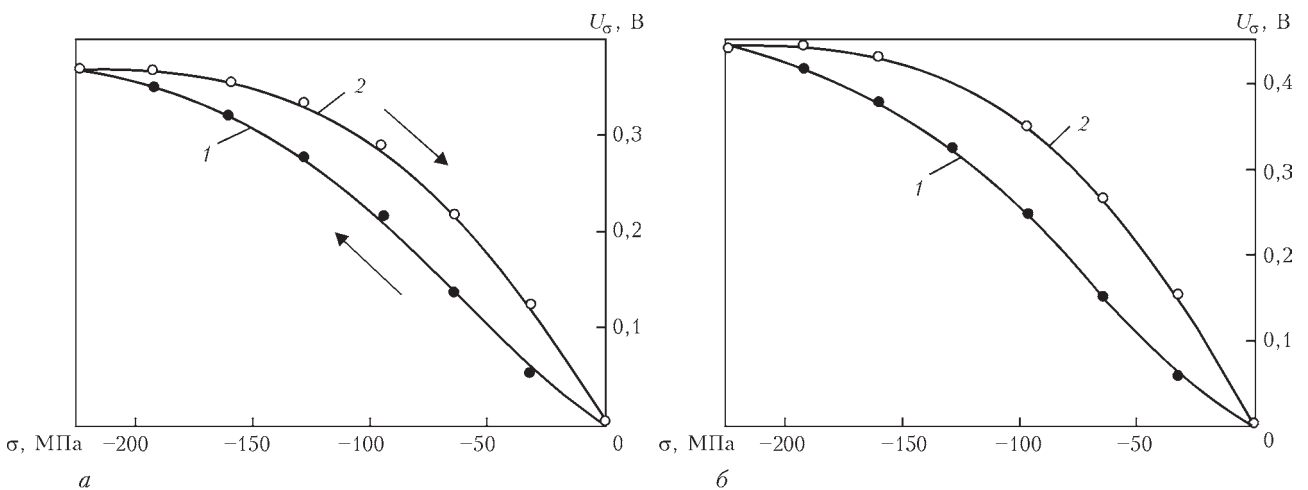


Рис. 4. Залежності амплітуди сигналу ВСПМА від рівня навантаження стиску (1) з наступним розвантаженням (2) на робочих частотах 5,0 (а) і 10,0 кГц (б)

пружень, а також існування суттєвого ефекту магнітопружного гістерезису для обох випадків.

Магнітопружний гістерезис можна вважати наслідком двох процесів: механічного гістерезису, викликаного наявністю залишкових деформацій, що виникають при як завгодно малих механічних напруженнях (пружна післядія), і магнітного гістерезису, викликаного специфікою процесів намагнічування. Очевидно, що магнітопружний гістерезис може бути джерелом відповідної похибки під час визначення абсолютного значення механічних напружень. Але слід зазначити, що магнітопружний гістерезис має місце в інших магнітних методах визначення напружень, зокрема побудованих на визначенні коерцитивної сили, що не заважає успішно використовувати його для оцінювання напружено-деформованого стану конструкцій із феромагнітних матеріалів. В багатьох випадках для оцінювання небезпечно критичного стану контрольованого матеріалу важливо визначити не стільки абсолютні значення напружень, скільки порівняти напруження в різних зонах для оцінювання розбалансувань в умовах дії робочих навантажень, а також визначити локальні

зони концентрації напружень і характер їх розподілу. Крім того, зазначимо, що під час виконання повторних циклів навантаження–розвантаження магнітопружний гістерезис зменшується, що буде досліджено і подано в наших наступних роботах. Сказане не зменшує важливості пошуку підходів, які би призвели до зменшення впливу магнітопружного гістерезису, що також буде предметом наших подальших досліджень.

Висновки

1. Коротко представлено магнітні методи визначення напруженого стану конструкцій із феромагнітних матеріалів.

2. Представлено розроблений ВСПМА з робочим діаметром 17 мм. Показано чутливість запропонованого ВСПМА до напружень у феромагнітних сталях. Зокрема, показано характер годографів сигналів ВСПМА на робочих частотах 5,0; 20,0 і 50,0 кГц від напружень розтягу і стиску, створених під час реалізації циклу навантаження–розвантаження по схемі чотириточкового згину. Показано протилежний напрямок годографів для напружень розтягу і стиску від точки балансуван-

ня, що дозволяє визначити характер напружень за напрямком годографу у комплексній площині або по знаку вихідного сигналу після амплітудно-фазового перетворення.

3. Досліджено зміни амплітуди сигналу ВСПМА під час реалізації циклу навантаження–розвантаження. Показано існування магнітопружного гістерезису для обох видів напружень.

Список літератури

1. Nitschke-Pagel T., Wohlfahrt H. (2002) Residual Stresses in Welded Joints – Sources and Consequences. *Mat. Sci. Forum*, 404-407, P. 215–226.
2. Винокуров В. А., Григорьянц А. Г. (1984) *Теория сварочных деформаций и напряжений*. Москва, Машиностроение.
3. Лобанов Л. М., Позняков В. Д., Пивторак В. А. та ін. (2009) Залишкові напруження у зварних з'єднаннях високоміцних сталей. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **6**, 13–22.
4. Rossini N. S., Dassisti M., Benyounis K. Y., Olabi A. G. (2012) Method of measuring residual stresses in components. *Materials and Design*, **35**, 572–598.
5. ASTM Standard E 837–08. (2008) *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole–Drilling Strain-Gage Method*. USA, Philadelphia.
6. Лобанов Л. М., Пивторак В. А., Савицкий В. В., Ткачук Г. И. (2006) Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии. *Автоматическая сварка*, **1**, 25–30.
7. Bulte D. P., Langman R. A. (2002) Origins of magnetomechanical effect. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **251**, 229–243.
8. Осташ О., Вольдмаров О., Учанін В., Безлюдько Г. (2004) Діагностика напружено-деформованого стану та накопичення пошкоджуваності в елементах сталевих конструкцій магнітним методом. *Праці міжнар. конф. «Механіка руйнування і міцність конструкцій»*. Львів, ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ, сс. 749–753.
9. Завальнюк О. П., Учанін В. М. (2013) Моніторинг напружено-деформованого стану несучих елементів суднових конструкцій. *Вибір і обробка інформації*, **38** (114), 13–16.
10. Stuecker E., Hofer G., Koch D., Guenes U. (1988) *Method and apparatus for measuring and precisely locating internal tensile stresses in hardened regions of components by measuring coercive field strength and Barkhausen noise amplitude*. appl. USA, Pat. 4881030, G01B7/24, G01N27/72. 182845, filed 18.04.1988, publ. 14.11.1989.
11. Gur H., Erlan G., Bateglin C. (2016) Investigating the Effect of Subsequent Weld Passes on Surface Residual Stresses in Steel Weldments by Magnetic Barkhausen Noise Technique. *Materials Evaluation*, **3**, 408–423.
12. Мехонцев Ю. Я. (1966) О магнитных способах оценки внутренних напряжений. *Дефектоскопия*, **2**, 94–95.
13. Орехов Г. Т. (1974) Определение остаточных сварочных напряжений магнитоупругим методом. *Автоматическая сварка*, **4**, 30–32.
14. Abuku S. (1977) Magnetic Studies of Residual Stress in Iron and Steel Induced by Uniaxial Deformation. *Japanese Journal of Applied Physics*, **16**, **7**, 1161–1170.
15. Yamada H., Uchiyama S., Takeuchi et al. (1987) Noncontact Measurement of Bending Stress Using a Magnetic Anisotropy Sensor. *IEEE Transactions on Magnetics*, **23**, **5**, 2422–2424.
16. Минаков С. Н., Юрченко В. А., Аносов А. П. (1992) *Способ определения интенсивности напряжений в изделиях из ферромагнитных материалов*. СССР, А. с. 1763909 МКІ G01I/12. Опубл. 23.09.92.
17. Фомичев С. К., Минаков С. Н., Михалко С. В. и др. (2009) Определение силовых воздействий на трубопровод по анализу эпюр распределения продольных напряжений. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 11–14.
18. Жуков С. В., Жуков В. С., Копица Н. Н. (2002) *Способ определения механических напряжений и устройство для его осуществления*. Россия, Пат. 2195636. Опубл. 27.12.02.

19. Lo C. C. H. (2011) Characterization of Residual Stresses in Ferrous Components by Magnetic Anisotropy Measurements Using a Hall Effect Sensor Array Probe. Review of Progress in *Quantitative Nondestructive Evaluation* (Thompson D.O., Ed.), **30**, 1249–1255.
20. Uchanin V., Minakov S., Nardoni G. et al. (2017) Eddy current method for evaluation of stresses in steel components. *Proceeding of 14th Intern. Conf. «Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering»*, September 4–6, 2017, Bernardin, Slovenia, pp. 207–212.
21. Tumanski S. (2011) *Handbook of Magnetic Measurements*. Boca Raton Florida, CRC Press.
22. Учанін В. М., Минаков С. М., Осташ О. П. и др. (2015) *Способ комплексного электромагнитного контролю структурного и напружено-деформованого стану ферромагнітних матеріалів*. Украина, Пат. 100379, МПК G01L1/12, G01N27/72.
23. Учанін В. М. (2013) *Вихрострумові накладні перетворювачі подвійного диференціювання*. Львів, Сполом.
24. Uchanin V., Lutsenko G., Oranasenko A., Dzhaganian A. (2016) PROMPRYLAD Family of Eddy Current Flaw Detectors – From Simple to more Complicated. *19th World Conf. on NDT, 2016, Munich*.

References

1. Nitschke-Pagel, T., Wohlfahrt, H. (2002) Residual stresses in welded joints – sources and consequences. *Mat. Sci. Forum*, 404-407, 215-226.
2. Vinokurov, V.A., Grigoryants, A.G. (1984) *Theory of welding strains and stresses*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Lobanov, L.M., Poznyakov, V.D., Pivtorak, V.A. et al. (2009) Residual stresses in welded joints of high-strength steels. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, **6**, 13-22 [in Ukrainian].
4. Rossini, N.S., Dassisti, M., Benyounis, K.Y., Olabi, A.G. (2012) Method of measuring residual stresses in components. *Materials and Design*, **35**, 572-598.
5. (2008) ASTM Standard E 837-08: *Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method*. USA, Philadelphia.
6. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V., Tkachuk, G.I. (2006) Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, **1**, 24-29.
7. Bulte, D.P., Langman, R.A. (2002) Origins of magnetomechanical effect. *J. of Magnetism and Magnetic Materials*, **251**, 229-243.
8. Ostash, O., Voldmarov, O., Uchanin, V., Bezlyudko, G. (2004) Diagnostics of stress-strain state and damage accumulation in steel structure components by magnetic method. *In: Proc. of Int. Conf. on Fracture Mechanics and Strength of Structures*. Lviv, PMI, 749-753.
9. Zavalnyuk, O.P., Uchanin, V.M. (2013) Monitoring of stress-strain state of load-carrying elements of ship structures. *Vidbir i Obrobka Informatsii*, **38**(114), 13-16 [in Ukrainian].
10. Stuecker, E., Hofer, G., Koch, D., Guenes, U. (1988) *Method and apparatus for measuring and precisely locating internal tensile stresses in hardened regions of components by measuring coercive field strength and Barkhausen noise amplitude*. Appl. USA, Pat. 4881030, Int. Cl. G01B7/24, G01N27/72. 182845. Fil. 18.04.1988; publ. 14.11.1989.
11. Gur, H., Erlan, G., Bateglin, C. (2016) Investigating the effect of subsequent weld passes on surface residual stresses in steel weldments by magnetic Barkhausen noise technique. *Materials Evaluation*, **3**, 408-423.
12. Mekhontsev, Yu.Ya. (1966) On magnetic methods of evaluation of internal stresses. *Defektoskopiya*, **2**, 94-95 [in Russian].
13. Orekhov, G.T. (1974) Determination of residual welding stresses by magneto-elastic method. *Avtomatich. Svarka*, **4**, 30-32 [in Russian].
14. Abuku, S. (1977) Magnetic studies of residual stress in Iron and steel induced by uniaxial deformation. *Jap. J. Appl. Phys.*, **16**(7), 1161-1170.
15. Yamada, H., Uchiyama, S., Takeuchi, et al. (1987) Noncontact measurement of bending stress using a magnetic anisotropy sensor. *IEEE Transact. on Magnetics*, **23**(5), 2422-2424.

16. Minakov, S.N., Yurchenko, V.A., Anosov, A.P. (1992) *Method for determination of stress intensity in products of ferromagnetic materials*. USSR author's cert., Int. Cl. G011/12. Publ. 23.09.92 [in Russian].
17. Fomichev, S.K., Minakov, S.N., Mikhalko, S.V. et al. (2009) Determination of force impacts on a pipeline by analysis of longitudinal stress distribution epures. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 11-14 [in Russian].
18. Zhukov, S.V., Zhukov, V.S., Kopitsa, N.N. (2002) *Method of determination of mechanical stresses and device for its realization*. Pat. 2195636 RF, publ. 27.12.02 [in Russian].
19. Lo, C.C.H. (2011) Characterization of residual stresses in ferrous components by magnetic anisotropy measurements using a Hall effect sensor array probe. Ed. by D.O. Thompson. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, **30**, 1249-1255.
20. Uchanin, V., Minakov, S., Nardoni, G. et al. (2017) Eddy current method for evaluation of stresses in steel components. In: *Proc. of 14th Intern. Conf. on Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering* (September 4-6, 2017, Bernardin, Slovenia), 207-212.
21. Tumanski, S. (2011) *Handbook of magnetic measurements*. Boca Raton Florida, CRS Press.
22. Uchanin, V.M., Minakov, S.M., Ostash, O.P. et al. (2015) *Method of complex electromagnetic control of structural and strain-stress state of ferromagnetic materials*. Pat. 100379 Ukraine, Int. Cl. G01L1/12, G01N27/72 [in Ukrainian].
23. Uchanin, V.M. (2013) *Eddy current put-on transducers of double differentiation*. Lviv, Spolom [in Ukrainian].
24. Uchanin, V., Lutsenko, G., Opanasenko, A., Dzhaganian, A. (2016) PROMPRYLAD Family of eddy current flaw detectors – from simple to more complicated. In: *Proc. of 19th World Conf. on NDT, 2016, Munich*.

ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ НА СИГНАЛ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИИ

V. M. UCHANIN¹, S. M. MINAKOV²

¹Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко
НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5.
E-mail: uchanin@ipm.lviv.ua

²НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского». 03056, г. Киев,
пр-т Победы, 37

Представлены результаты исследования разработанного вихретокового преобразователя магнитной анизотропии с рабочим диаметром 17 мм. Показана чувствительность преобразователя к напряжениям растяжения и сжатия в ферромагнитных сталях. В частности, показан характер годографов сигналов на рабочих частотах 5,0; 20,0 и 50,0 кГц от напряжений растяжения и сжатия, созданных при реализации цикла «нагруз-

ка-разгрузка» по схеме четырехточечного изгиба. Показано противоположное направление годографов для напряжений растяжения и сжатия от точки балансировки, что позволяет определить характер напряжений по направлению годографа в комплексной плоскости или по знаку исходящего сигнала после амплитудно-фазового превращения. Исследованы изменения амплитуды сигнала вихретокового преобразователя при реализации цикла нагрузка-разгрузка. Показано существование магнитоупругого гистерезиса для обоих видов напряжений. Библиогр. 24, рис. 4.

Ключевые слова: механические напряжения растяжения и сжатия, магнитная анизотропия, вихретоковый преобразователь, годограф, магнитоупругий гистерезис

INFLUENCE OF MECHANICAL STRESSES ON THE SIGNAL OF EDDY CURRENT TRANSDUCER OF MAGNETIC ANISOTROPY

V. M. UCHANIN¹, S. M. MINAKOV²

¹G. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of
Ukraine, 5 Naukova str, 79060, Lviv.
E-mail: uchanin@ipm.lviv.ua

²NTUU «Igor Sikorskii KPI», 17 Peremogy ave., 03056, Kyiv,
Ukraine

The paper gives the results of studying the developed eddy current transducer of magnetic anisotropy with working diameter of 17 mm. Transducer sensitivity to tensile and compressive stresses in ferromagnetic steels is shown. In particular, shown is the shape of signal travel time curves at working frequencies of 5.0; 20.0; and 50.0 kHz, due to tensile and compressive stresses, induced during realization of loading-unloading cycle by four-point bend schematic. Opposite direction of travel time curves for tensile and compressive stresses from the balancing point is demonstrated that allows determination of the nature of stresses in the direction of travel time curves in a complex plane, or by the output signal sign after amplitude-phase transformation. Changes in the amplitude of eddy current transducer signal during realization of loading-unloading cycle were studied. Existence of magneto-elastic hysteresis for both the kinds of loading is shown. 24 Reference, 4 Figures.

Keywords: mechanical tensile and compressive stresses, magnetic anisotropy, eddy current sensor, travel time curves, magnetoelastic hysteresis

Надійшла до редакції
19.02.2018

**1-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ПО СВАРКЕ И НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ 2018
1st ICWNDT-2018**

22–24 октября 2018 г.

г. Афины, Греция

Адрес: WGI: Trapezountos & Digeni Akrita, Elefsina 192 00, Attikis, Greece.

Phone (+30) 210 3630050, Fax (+30) 2103636917,

Website: www.wgi.gr, E-mail: tzaferis@wgi.gr