

ДІАГНОСТУВАННЯ ПОШКОДЖЕНОСТІ ФЕРОМАГНІТНИХ СТАЛЕЙ ПРИ МЕХАНІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВИМІРЮВАННЯ КОЕРЦИТИВНОЇ СИЛИ

О.П. Гопкало¹, Г.Я. Безлюдько², А.А. Котляренко¹, Ю.П. Кураш¹, Р.М. Соломаха²

¹Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ, вул. Тимирязевська, 2. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

²ТОВ «Спеціальні наукові розробки». 61184, м. Харків, а/с 12036. E-mail: mail@snr-ndt.com

Проведено експериментальне обґрунтування можливості оцінки ступеня отриманих технологічних та експлуатаційних пошкоджень металу конструкцій із феромагнітних сталей за результатами вимірювання коерцитивної сили. Виявлений ефект різкої зміни напрямку та максимальних значень коерцитивної сили при перевищенні напружень умовної межі плинності на поверхні найбільш пошкоджених ділянок виробу дозволяє проводити сепарування пошкоджень, отриманих в металі конструкції в умовах пружного деформування (до умовної межі плинності), і пошкоджень, отриманих при пружно-пластичному деформуванні, аж до руйнування та чітко виділяти межі зон отриманих зворотних та незворотних пошкоджень. Завдяки ефекту різкої зміни напрямку та максимальних значень коерцитивної сили при перевищенні напружень умовної межі плинності у найбільш пошкоджених ділянках конструкцій зникає необхідність у визначенні механічних характеристик міцності та пластичності металу, оскільки діагностування навантаженості проводиться відносно умовної межі плинності. Варіювання орієнтації датчика для вимірювання значень коерцитивної сили відносно досліджуваної поверхні дозволяє визначати найбільш деформовані і пошкоджені зони, встановлювати напрямок головних напружень та оцінювати структурну гомогенність металу. Бібліогр. 14, рис. 10.

Ключові слова: структуроскоп, коерцитивна сила, навантаження, пошкодження, напруження, деформація, руйнування

При технічному обслуговуванні складного високотехнологічного обладнання методи діагностування технічного стану на сьогодні є найбільш актуальними [1, 2]. Про це свідчить і велика кількість нормативної документації, зокрема, ГОСТів, якими регламентується широке коло питань: від термінології до класифікації методів технічного діагностування [3, 4].

Роботи останніх років в області магнітної структуроскопії дозволили встановити зв'язок магнітних і механічних властивостей ряду феромагнітних конструкційних сталей [5, 6]. В якості основного магнітного параметра була обрана коерцитивна сила (H_c , А/см) як найбільш чутлива до зміни щільності дислокаційної структури сталі [7] і пов'язана лінійною залежністю з механічними властивостями. В результаті діаграму розтягу стало можливим моделювати за даними зміни коерцитивної сили.

Раніше проведеними дослідженнями встановлено, що фізична природа реагування коерцитивної сили на механічні навантаження феромагнітних та аустенітних сталей має суттєві відмінності. Так для феромагнітних сталей зміни значень коерцитивної сили при статичному та циклічному деформуванні пов'язані з упорядкуванням орієнтації доменної структури металу (від хаотичної до спрямованої). Для аустенітних парамагнітних (не магнітних у початковому стані) сталей зміни

значень коерцитивної сили при статичному та циклічному деформуванні пов'язані із структурними перетвореннями вихідного аустеніту в деформаційний мартенсит з кінцевим феррито-перлітним розпадом, що викликає зміну магнітних властивостей металу з парамагнітного у феромагнітний стан [8]. В даній роботі представлені результати експериментальних досліджень реагування коерцитивної сили на механічні навантаження лабораторних зразків із феромагнітних сталей.

Мета роботи. Мета роботи полягає в експериментальній перевірці можливості використання одного із методів неруйнівного контролю, а саме інструментального вимірювання змін значень коерцитивної сили в процесі механічного навантаження лабораторних зразків із феромагнітних сталей для оцінки ступеня накопичених пошкоджень.

Методика експериментальних досліджень. Матеріалом для лабораторних зразків слугував лист із сталі Ст3 товщиною 5 мм, з якого у вздовж прокатки вирізали лабораторні зразки з розмірами робочої частини 4,16×50,19×100 мм та зразки із сталі X52 з розмірами робочої частини 7,65×25,14×220 мм, які вирізали із труби діаметром 630×8 мм у повздовжньому напрямку. Механічні характеристики сталі Ст3 складалі: $\sigma_{0,2} = 306,7$ МПа; $\sigma_b = 445$ МПа; $\delta = 29,75$ %. Сталі X52 – $\sigma_{0,2} = 355,6$ МПа; $\sigma_b = 544,6$ МПа; $\delta = 17,6$ %.

Гопкало О.П. – <https://orcid.org/0000-0001-7799-3870>, Котляренко А.А. – <https://orcid.org/0000-0001-8345-3547>,

Кураш Ю.П. – <https://orcid.org/0000-0003-3440-6351>

© О.П. Гопкало, Г.Я. Безлюдько, А.А. Котляренко, Ю.П. Кураш, Р.М. Соломаха, 2020

Були проведені також випробування на циклічний розтяг з перевантаженнями, які імітували штатні гідравлічні випробування та корозійне зношування трубопроводів, лабораторних зразків, з розмірами робочої частини $2,0 \times 26 \times 135$ мм, виготовлених із труби діаметром 630×8 мм із сталі 17Г1С після тривалої експлуатації тепломереж. Також були проведені експериментальні дослідження реагування коерцитивної сили на циклічний розтяг аналогічних лабораторних зразків з концентраторами напружень у вигляді отворів різного діаметру. Механічні характеристики сталі 17Г1С склали: $\sigma_{0,2} = 413,2$ МПа; $\sigma_b = 571$ МПа; $\delta = 19,3$ %. При випробуваннях на циклічний розтяг напруження, які імітували гідравлічні випробування, склали $1,15 \dots 1,25$ від напружень штатного режиму експлуатації тепломереж. Корозійне зношування імітували шляхом підвищення на 7 % діючих напружень.

Крім того, були проведені експериментальні дослідження реагування коерцитивної сили на багатоциклове навантаження лабораторних зразків з розмірами робочої частини $12 \times 20 \times 5,8$ мм із сталі 20. Механічні характеристики сталі 20 склали: $\sigma_{0,2} = 245$ МПа; $\sigma_b = 410$ МПа; $\delta = 25$ %.

Випробування на статичний розтяг при ступінчатому навантаженні з розвантаженням проводили на електрогідравлічній випробувальній машині INSTRON 8802 при швидкості переміщення активного захвату 2 мм/хв.

Випробування на циклічний вітнульовий розтяг зразків з частотою 2 цикла/хв. при контролі рівня прикладених зусиль проводили на важільній випробувальній машині ІП-4М (ЦНІИТМАШ, Росія), оснащеної механізмом циклічного підйому вантажу на важелі.

Випробування на багатоциклову втому проводили на резонансній випробувальній машині RUMUL TESTRONIC 50kN виробництва компанії RUSSENBARGER PRÜFMASCHINEN AG (Швейцарія). Всі вищезгадані випробування проводили при кімнатній температурі.

Вимірювання значень коерцитивної сили у навантаженому та розвантаженому стані на кожній ступені навантаження проводили за допомогою структуроскопів КРМ-Ц-К2М (розробник ТОВ «Спеціальні наукові розробки», м. Харків), укомплектованих датчиками з базами вимірювання – 65 мм (датчик D65), – 27 мм (датчик D27) та – 12 мм (датчик D12), які дозволяють вимірювати інтегральні значення коерцитивної сили у достатньо великих об'ємах металу ($65 \times 32 \times 30$ мм, $27 \times 25 \times 4$ мм та $12 \times 12 \times 1$ мм відповідно). Глибина намагнічування металу датчиком D65 становить до 30 мм, датчиком D27 – до 4 мм та датчиком D12 – до 1 мм. Вимірювання значень коерцитивної сили на

поверхні виробу або лабораторного зразка полягає у намагнічуванні металу до насичення, його розмагнічуванні з наступним намагнічуванням магнітним полем протилежної полярності для нейтралізації залишкового магнетизму та вимірювання значень H_c . Тривалість циклу визначення значень коерцитивної сили складає 5 та 10 с для датчиків D27 та D65, D12 відповідно. Слід зазначити, що при наявності анізотропії структури металу, у тому числі після пластичного деформування, зміна орієнтації магнітів датчика відносно досліджуваної поверхні впливає на вимірювану величину коерцитивної сили. Вимірювання значень коерцитивної сили структуроскопом не потребує будь якої підготовки досліджуваної поверхні. Наприклад, при використанні датчика D65 допускається загальна товщина лакофарбових та захисних покриттів до 6 мм.

На рис. 1 приведена схема орієнтації магнітів датчиків D65 та D27 відносно поверхні лабораторних зразків. В даній роботі прийнято вважати, що магнітний потік в положенні I датчика ($H_{c\perp}$) направлений поперек зразка, а у положенні II ($H_{c\parallel}$) – вздовж зразка.

Результати експериментальних досліджень. На рис. 2 приведені діаграма деформування (σ - ϵ) та кінетика коерцитивної сили (σ - H_c) при ступінчатому розтягуванні з розвантаженням в залежності від орієнтації полюсів магнітів датчика відносно осі зразків (напрямку навантаження) із сталей Ст3 (а, б) та Х52 (в, г) у навантаженому та розвантаженому стані.

Отримані результати показують, що максимальні значення коерцитивної сили при навантаженні суттєво залежать від позиціонування положення датчика відносно напрямку навантаження. Так при пластичному деформуванні у навантаженому стані напрямок максимальних значень коерцитивної сили ($H_{c\perp}$) орієнтований перпендикулярно напрямку навантаження (рис. 2, а, в). Слід зауважити, що після пластичного деформування при орієнтації полюсів магнітів перпендикулярно напрямку навантаження ($H_{c\perp}$) у навантаженому стані максимальні значення коерцитивної сили перевищують аналогічні величини у розвантаженому стані (рис. 2, б, г). А при орієнтації полюсів магнітів у напрямку навантаження ($H_{c\parallel}$), навпаки, у розвантаженому стані максимальні значення ко-

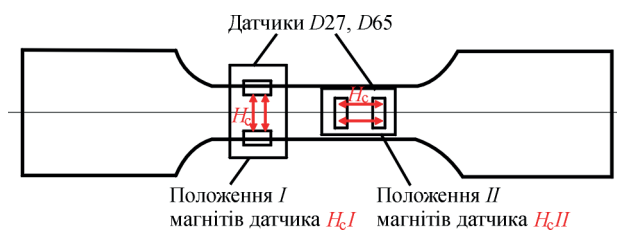


Рис. 1. Схема орієнтації полюсів магнітів датчиків D65 та D27 відносно поверхні лабораторних зразків

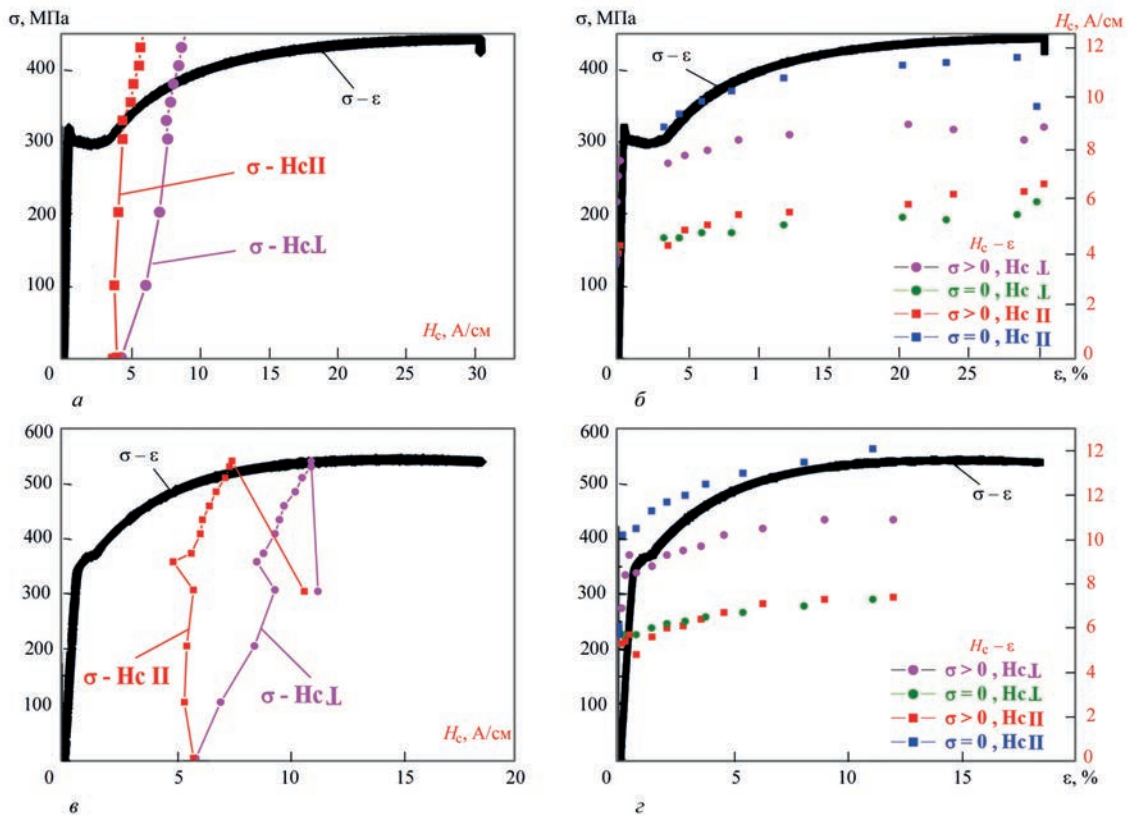


Рис. 2. Діаграми деформування (σ - ϵ) та кінетика коерцитивної сили (σ - H_c) при ступінчатому розтягуванні з розвантаженням в залежності від орієнтації полюсів магнітів датчика відносно осі зразків (H_{cII} – вздовж зразка, H_{cI} – поперек зразка) із сталей Ст3 (а, б) та X52 (в, г) у навантаженому ($\sigma > 0$) та розвантаженому ($\sigma = 0$) стані

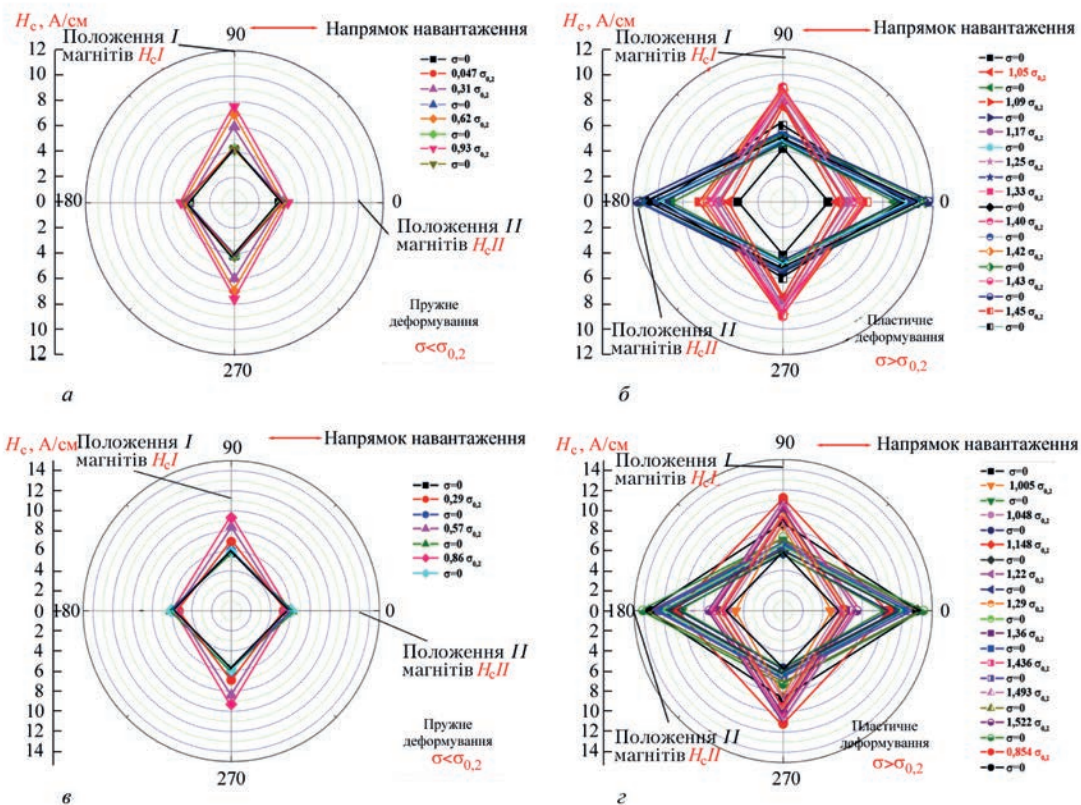


Рис. 3. Епюри коерцитивної сили по поверхні лабораторного зразка при ступінчатому пружному (а, б) та пластичному (в, г) деформуванні розтягом з розвантаженням на кожній ступені зразків із сталей Ст3 (а, в) та X52 (б, г), де епюри H_c по поверхні зразка у двох взаємно-перпендикулярних напрямках при дії напружень (у навантаженому стані, $\sigma \neq 0$) відображені у червоних тонах, а у розвантаженому стані ($\sigma = 0$) – у темних тонах

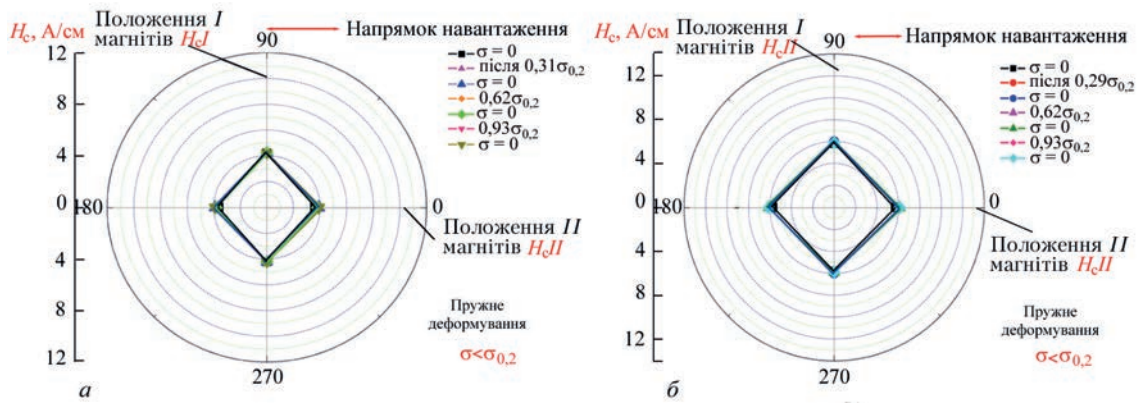


Рис. 4. Епюри коерцитивної сили по поверхні лабораторних зразків із сталей Ст3 (а) та Х52 (б) у розвантаженому стані після пружного деформування

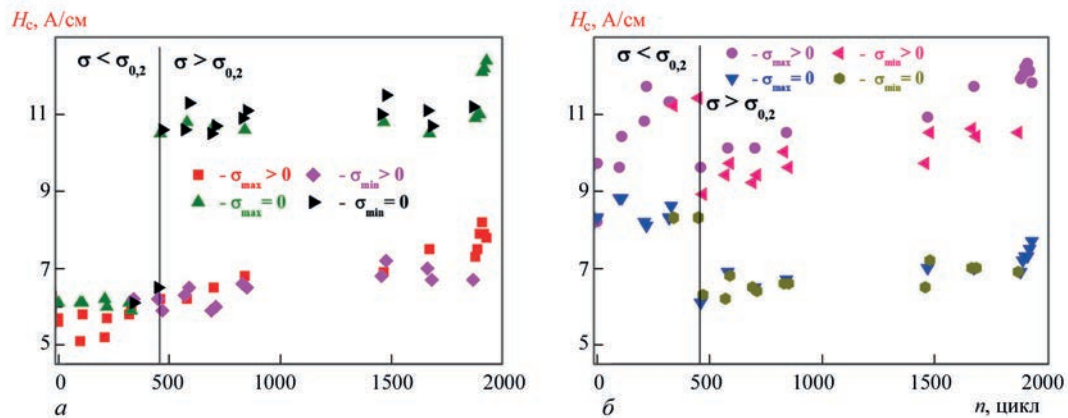


Рис. 5. Кінетика коерцитивної сили в зоні руйнування у навантаженому стані (точки у жовто-червоних тонах) та після розвантаження (точки у чорно-синє-зелених тонах) при орієнтуванні полюсів магнітів датчика вздовж (а) та поперек (б) робочої частини лабораторного зразка

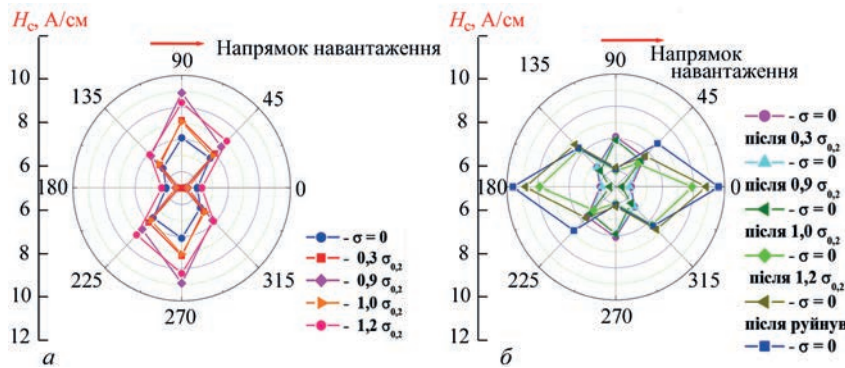


Рис. 6. Епюри коерцитивної сили по поверхні лабораторного зразка у навантаженому стані (а) та після навантаження (розвантажений стан) (б)



Рис. 7. Фото зразка

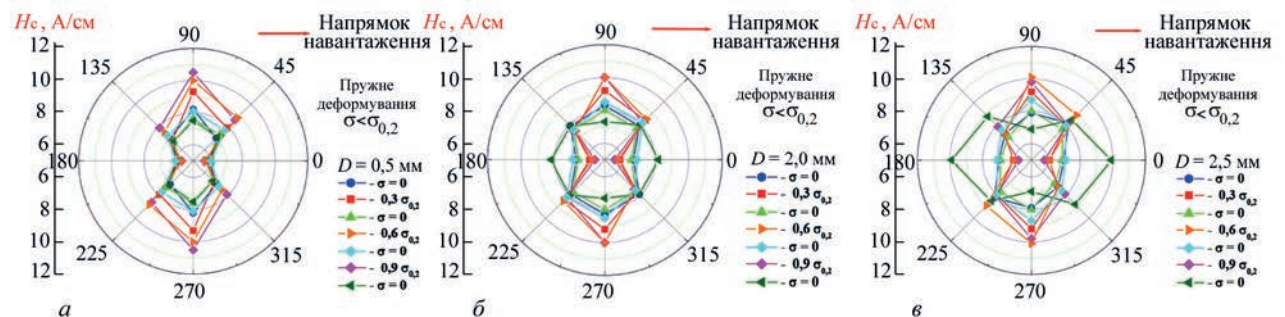


Рис. 8. Епюри коерцитивної сили по поверхні лабораторного зразка з концентраторами напружень у вигляді отворів: а – діаметром 0,5 мм; б – 2,0; в – 2,5 при пружному деформуванні

ерцитивної сили перевищують аналогічні величини у навантаженому стані.

Для наочності розглянуті на рис. 2 дані представлені на рис. 3 у вигляді епюр значень коерцитивної сили по поверхні зразків із сталей Ст3 (а, в) та Х52 (б, г) при ступінчастому пружному (а, б) та пластичному (в, г) деформуванні розтягом з розвантаженням на кожній ступені.

При пружному деформуванні (див. рис. 3, а, б) у навантаженому стані максимальні значення коерцитивної сили перевищують аналогічні величини у розвантаженому стані і орієнтовані перпендикулярно напрямку навантаження.

Після пружного деформування у розвантаженому стані значення коерцитивної сили у двох взаємно перпендикулярних напрямках практично збігаються, що вказує на однорідність його структурного стану (рис. 4). Слід зазначити, що для багатьох видів прокату характерна структурна неоднорідність, яка викликає розкид механічних та фізичних характеристик сталей, у тому числі значень коерцитивної сили [9, 10]. За даними роботи [11] неоднорідність структури металу різних ділянок виробу може обумовлювати відмінності значень коерцитивної сили, вимірених у двох взаємно перпендикулярних напрямках в межах 10 %, а у деяких випадках до 18 %.

Після пластичного деформування (див. рис. 3, в, г) у розвантаженому стані напрямком максимальних значень коерцитивної сили збігається з напрямком навантаження. При цьому після пластичного деформування металу у розвантаженому стані максимальні значення коерцитивної сили у напрямку навантаження приблизно у 2,5 та 1,75 рази (для сталей Ст3 та Х52 відповідно), перевищують аналогічні величини після пружного деформування. Тобто, при перевищенні діючих напружень умовної межі плинності після розвантаження відбувається різке підвищення («стрибок») значень коерцитивної сили.

Аналогічні закономірності реагування коерцитивної сили на статичний розтяг отримано і при циклічному ступінчастому розтязі з розвантаженням на кожній ступені навантаження лабораторних зразків із сталі 17Г1С. При даних дослідженнях використовували датчик з базою вимірювання 12 мм (датчик D12). На рис. 5, а, б приведена кінетика коерцитивної сили в зоні руйнування у навантаженому стані ($\sigma > 0$) при дії циклічних напружень розтягу та у розвантаженому стані ($\sigma = 0$) при орієнтуванні полюсів магнітів вздовж (а) та поперек (б) робочої частини зразка, де σ_{\max} – напруження, які імітували гідравлічні випробування труби із сталі 17Г1С, а σ_{\min} – напруження при штатному режимі навантаження. Слід зазначити, що у навантаженому стані при орієнтуванні полюсів маг-

нітів вздовж робочої частини зразка (рис. 5, а) незалежно від рівня напружень має місце монотонне зростання значень коерцитивної сили із незначним підвищенням їх величин при руйнуванні.

У розвантаженому стані після дії напружень, які перевищували значення умовної межі плинності металу ($\sigma > \sigma_{0,2}$), відбувається різке, майже двократне підвищення значень коерцитивної сили, яке майже не змінює своїх величин, практично, до руйнування.

У навантаженому стані при орієнтуванні полюсів магнітів поперек робочої частини зразка (рис. 5, б) при пружному деформуванні ($\sigma < \sigma_{0,2}$) має місце зростання значень коерцитивної сили до їх максимальних величин при досягненні напружень умовної межі плинності і при подальшому підвищенні напружень ($\sigma > \sigma_{0,2}$) відбувається різке зниження («стрибок») приблизно на 20 % значень H_c . При подальшому циклічному розтязі з підвищенням напружень має місце поступове зростання значень коерцитивної сили, які при руйнуванні приблизно співпадають з аналогічними значеннями H_c при напруженнях умовної межі плинності. У розвантаженому стані відбувається аналогічне зниження («стрибок») значень коерцитивної сили після перевищення напружень умовної межі плинності.

Слід зазначити, що закономірності кінетики коерцитивної сили для досліджених сталей Ст3 та Х52 (рис. 3) співпадають також і для сталі 17Г1С (рис. 6), що може слугувати обґрунтуванням розповсюдження даних закономірностей для багатьох феромагнітних сталей. Так у навантаженому стані, у пружному ($\sigma < \sigma_{0,2}$) та пластичному ($\sigma > \sigma_{0,2}$) діапазоні деформування (рис. 6, а) напрямком максимальних значень коерцитивної сили орієнтований перпендикулярно напрямку навантаження. У розвантаженому стані ($\sigma = 0$, рис. 6, б) після пружного ($\sigma < \sigma_{0,2}$) та пластичного ($\sigma > \sigma_{0,2}$) деформування напрямком максимальних значень коерцитивної сили співпадає з напрямком навантаження. При цьому, після пластичного деформування металу ($\sigma > \sigma_{0,2}$) при розвантаженні до $\sigma = 0$ відбувається поворот на 90° напрямку максимальних значень коерцитивної сили. Дану обставину можна використовувати на практиці для контролю за мірою навантаження окремих ділянок відповідальних елементів конструкцій в період експлуатації. Ефект різкої зміни максимальних значень коерцитивної сили та їх напрямку при перевищенні напружень умовної межі плинності, при моніторингу напружено-деформованого стану елементів конструкцій можна використовувати для встановлення меж пружно- та пластично-деформованого металу. Подібні механізми поведінки магнітних властивостей феромагнітних сталей при навантаженні з розвантаженням описані в роботах [12, 13].

Для встановлення закономірностей реагування коерцитивної сили на механічні навантаження в умовах концентрації напружень були проведені випробування на циклічний розтяг лабораторних зразків з концентраторами напружень у вигляді наскрізних отворів діаметром 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 та 2,5 мм (рис. 7).

На рис. 8 приведені епюри розподілу значень коерцитивної сили по поверхні лабораторного зразка з концентраторами напружень при пружному деформуванні. На рисунку епюри розподілу коерцитивної сили по поверхні лабораторного зразка з концентраторами напружень у навантаженому стані позначено символами у червоних тонах, а у розвантаженому стані (після відповідного навантаження) – синьо-зелених тонах.

Після пружного деформування до значень брутто напружень $0,9\sigma_{0,2}$ металу у зонах концентраторів напружень від отворів діаметром 0,5, 1,0 та 1,5 мм у розвантаженому стані максимальні значення коерцитивної сили складають 71,4 % від аналогічних величин у навантаженому стані (рис. 8, а) і орієнтовані перпендикулярно напрямку навантаження. При цьому, характер епюр коерцитивної сили по поверхні зразка при пружному деформуванні у зоні отвору діаметром 0,5 мм аналогічний епюрам H_c для зразка з отворами діаметром 1,0 та 1,5 мм. Після пружного деформування до значень брутто напружень $0,9\sigma_{0,2}$ металу у розвантаженому стані ($\sigma = 0$) в зоні концентраторів напружень від отворів діаметром 2 та 2,5 мм (номінальні напруження склали відповідно $0,975\sigma_{0,2}$ та $0,995\sigma_{0,2}$, тобто нижчі за умовну межу плинності) мало місце зростання значень коерцитивної сили на 22 та 40,5 %, відповідно, і поворот на 90° напрямку їх максимальних значень відносно аналогічних зон з отворами діаметром 0,5, 1,0 та 1,5 мм (рис. 8, б, в).

Збільшення діаметра отвору від діаметром 2,0 до 2,5 мм при пружному деформуванні до значень брутто напружень $0,9\sigma_{0,2}$ викликає збільшення об'єму пластично-деформованого металу у локальній зоні отвору, і, відповідно, підвищення максимальних значень коерцитивної сили у розвантаженому стані (відносно навантаженого стану) від 82 % (для отвору діаметром 2,0 мм) до 100 % (для отвору діаметром 2,5 мм, де значення H_c у навантаженому та розвантаженому стані, практично, співпадають, рис. 8, в). Відмічене приладом зростання максимальних значень коерцитивної сили у розвантаженому стані після навантаження до брутто напружень $0,9\sigma_{0,2}$ в зоні концентраторів напружень від отворів діаметром 2,0 та 2,5 мм пов'язано з чутливістю датчика до об'єму пластично деформованого металу у зоні вимірювання, де діючі напруження перевищували

умовну межу плинності, які обумовлюють зміну напрямку (поворот на 90°) та абсолютних значень H_c (рис. 8, б, в).

Слід зазначити, що не реагування коерцитивної сили на пружне деформування до брутто напружень $0,9\sigma_{0,2}$ зразків з концентраторами напружень від отворів діаметром 0,5, 1,0 та 1,5 мм пов'язано з недостатньою чутливістю датчика до не великого об'єму пластично деформованого металу у зоні вимірювання, де діючі напруження перевищували умовну межу плинності. Величина об'єму пластично деформованого металу, де відбувається істотна зміна орієнтації доменної структури металу у зоні вимірювання, залежить від розподілу нормальних напружень σ_x по глибині та поверхні отвору (рис. 9, а, б).

Таким чином, чутливість приладу для вимірювання значень коерцитивної сили до концентрації напружень визначається співвідношенням пружно і пластично деформованих об'ємів металу у зоні вимірювання. Дана обставина може слугувати основою для розробки неруйнівних методів оцінки напружень у зоні концентраторів напружень.

Для визначення реагування коерцитивної сили на багатоциклове навантаження були проведені випробування лабораторних зразків із сталі 20 на осьовий знакозмінний розтяг-стиск з частотою 84 Гц при напруженнях 0,7 від межі плинності ($\sigma_a = 169,5$ МПа) з асиметрією циклу напружень $R_\sigma = -1$.

На рис. 10 приведена кінетика значень коерцитивної сили по числу циклів навантаження в зоні руйнування зразка при орієнтуванні полюсів магнітів датчика поперек (а) та вздовж (б) робочої частини зразка. Оскільки при скануванні значень коерцитивної сили по поверхні робочої частини зразка та прилеглих до неї зон вимірювання проводили з кроком 6 мм (половина бази датчика D12 приладу), то значення H_c у тому числі в зоні руйнування визначали двічі. Слід зазначити, що руйнування лабораторних зразків відбувалось по галтелі (перехідній зоні від робочої частини по радіусу до зони затискання у активному захваті) зразка при дії амплітуди напружень $\sigma_a^f = 0,8\sigma_a^n$ від номінальних напружень (σ_a^n) з мінімальною площею поперечного перерізу по середині робочої частини зразка. Початок руйнування зразка супроводжувався різким зниженням частоти навантаження внаслідок підростання тріщини. При цьому в силу достатньо великої бази вимірювання датчика 12×12 мм при площі тріщини втомі 0,25 від номінальної площі поперечного перерізу у зоні руйнування змін значень коерцитивної сили не було зафіксовано. І тільки при подальшому зростанні тріщини втомі до площі тріщини втомі 0,5 від номінальної площі поперечного

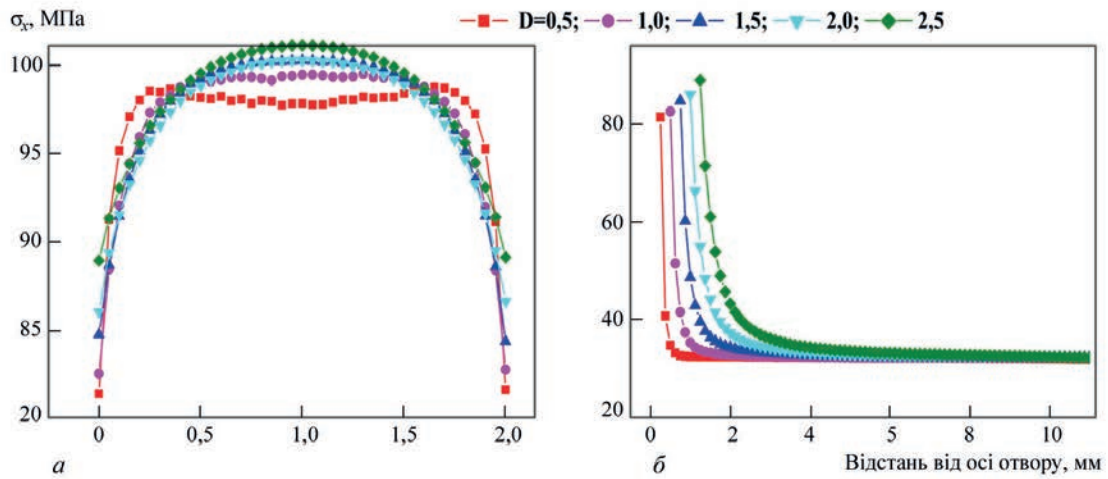


Рис. 9. Розподіл нормальних напружень σ_x по глибині отвору (*a*) та його поверхні (*b*)

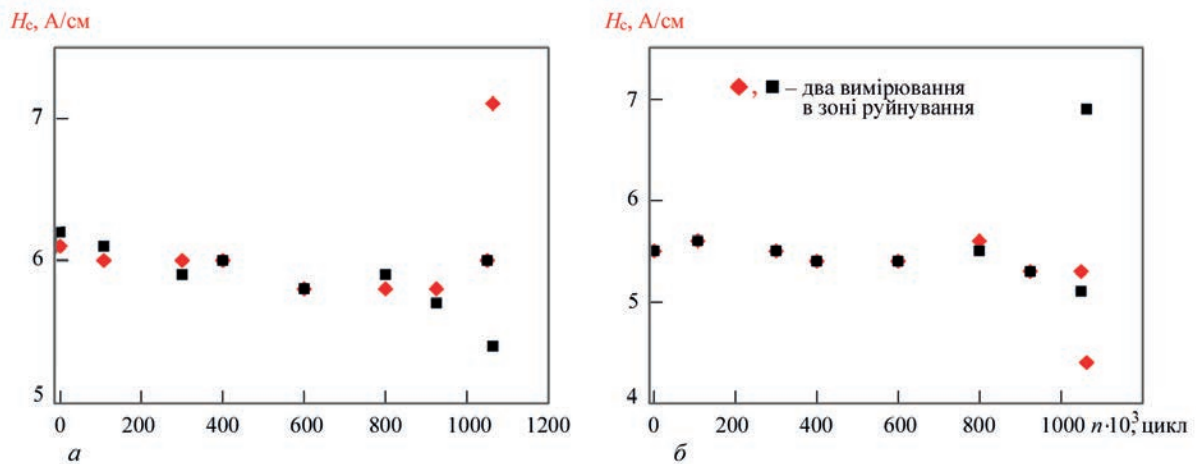


Рис. 10. Кінетика значень коерцитивної сили по числу циклів навантаження в зоні руйнування зразка при орієнтуванні полюсів магнітів датчика поперек (*a*) та вздовж (*b*) робочої частини зразка

перерізу у зоні руйнування були зафіксовані істотні зміни значень коерцитивної сили. Таким чином, при багатоцикловій втоми габарити датчика приладу дозволяють фіксувати тільки достатньо великі тріщини, коли втрата суцільності металу починає впливати на величину магнітних характеристик у зоні вимірювання коерцитивної сили. Тобто, при багатоцикловій втоми, коли основний об'єм металу у зоні вимірювання деформується пружно, чутливість приладу до появи тріщин втоми визначається її розмірами.

Метод діагностування технічного стану виробів коерцитиметричним контролем полягає у проведенні попередніх розрахунків напружено-деформованого стану для встановлення найбільш навантажених локальних ділянок металу конструкції та наступного вимірювання значень коерцитивної сили на поверхні у цих зонах. Оскільки величина коерцитивної сили залежить від орієнтації полюсів магнітів відносно напрямку діючих напружень, то при діагностуванні технічного ста-

ну виробів у найбільш небезпечних локальних зонах вимірювання значень H_c на поверхні необхідно проводити у 4-х напрямках при повороті датчика через кожні 45° відносно попереднього вимірювання з подальшим уточненням напрямку максимальних значень H_c . При цьому при моніторингу розподілу коерцитивної сили по поверхні виробу з'являється можливість встановити напрямки головних напружень, проводити оцінку структурного стану металу і оцінювати його гомогенність. На ділянках конструкцій у початковому стані та після пружного деформування добротного ізотропного металу конструкцій максимальні значення коерцитивної сили у двох взаємно перпендикулярних напрямках повинні відрізнятися не суттєво. При моніторингу значень коерцитивної сили на поверхні виробів різкі зміни значень та напрямку максимальних значень коерцитивної сили вказують на суттєві відмінності типу накопичених пошкоджень металу. Отримані результати можуть слугувати даними для подальшої оцін-

ки технічного стану виробів у поєднанні з іншими неруйнівними методами контролю.

Висновки

Проведено експериментальне обґрунтування можливості оцінки ступеня пошкодженості металу конструкцій із феромагнітних сталей за результатами вимірювання коерцитивної сили. Ефект різкої зміни напрямку та максимальних значень коерцитивної сили при перевищенні напружень умовної межі плинності на поверхні найбільш пошкоджених ділянок виробу дозволяє проводити сепарування пошкоджень, отриманих у металі конструкції в умовах пружного деформування (до умовної межі плинності) і пошкоджень, отриманих при пружно-пластичному деформуванні, аж до руйнування та встановлювати фіксовану межу зворотної та незворотної пошкоджуваності. Завдяки ефекту різкої зміни напрямку та максимальних значень коерцитивної сили при перевищенні напружень умовної межі плинності у найбільш пошкоджених ділянках конструкцій зникає необхідність у визначенні механічних характеристик міцності та пластичності металу, оскільки діагностування навантаженості проводиться відносно умовної межі плинності.

Для феромагнітних сталей експериментально встановлено, що після першого перевантаження металу, коли діючі напруження перевищували умовну межу плинності, при розвантаженні до рівня напружень, нижчих за умовну межу плинності, відбувається «стрибок» і зміна напрямку (на 90°) максимальних значень коерцитивної сили і збереження при цьому їх максимальних величин у розвантаженому стані. Здатність «запам'ятовувати» максимальні значення коерцитивної сили у розвантаженому стані після дії напружень, які перевищували умовну межу плинності, можна використовувати на практиці для контролю за мірою навантаження (пошкодження) окремих ділянок відповідальних елементів конструкцій в період експлуатації.

Встановленні обмеження у можливості оцінки ступеня пошкодження металу по вимірам значень коерцитивної сили у зонах концентрації напружень при циклічному навантаженні, які обумовлені чутливістю приладу (при даних габаритах датчика для вимірювання H_c) до співвідношення об'ємів пружно- та пластично-деформованого металу у зоні руйнування (вимірювання).

Отримані результати можуть бути корисними для оцінки отриманих пошкоджень у зонах локального деформування деталі виробу, при діагностуванні якості сучасних технологій, наприклад, локальної термообробки конструктивних елементів типу «термошок» та при розробці ме-

тодик оцінки залишкових напружень у зонах концентрації напружень та від зварювання.

Результати експериментальних досліджень розширюють уявлення про можливість застосування коерцитиметричного контролю для оцінки накопичених пошкоджень в металах в умовах статичного та циклічного навантаження і можуть стати основою для розробки нових підходів до експресної оцінки залишкового ресурсу металу конструкцій простим неруйнівним методом.

Роботу виконано в рамках науково-дослідної роботи відділу втоми і термовтоми матеріалів Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України за темою 1.3.4.1910 «Розробка методів оцінки втомного пошкодження металічних матеріалів на стадіях зародження і росту тріщин».

Список літератури

1. Лепеш Г.В. (2015) Современные методы и средства диагностики оборудования инженерных систем зданий и сооружений. *Технико-технологические проблемы сервиса*, 4(34), 3–8.
2. Лепеш Г.В. (2015) Диагностика и комплексное обслуживание инженерно-технических систем и оборудования зданий и сооружений. *Там же*, 5(35), 6–16.
3. ГОСТ 18353-79 Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Группа Т59. Non-destructive check. Classification of types and methods. Дата введения 1980-07-01. Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 11 ноября 1979 г. № 4245 дата введения установлена 01.07.80. Взамен ГОСТ 18353-73. Электронный фонд нормативно-правовой документации. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-18353-79> (дата обращения 5.05.2016).
4. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения Technical diagnostics. Terms and definitions. Дата введения 1991-01-01. Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 26.12.89 № 4143. Взамен ГОСТ 20911-75. Переиздание. Ноябрь 2009 г. Режим доступа <http://docs.cntd.ru/document/1200009481> (дата обращения 5.05.2016).
5. Христенко И.Н., Кривова В.В. (1984) Влияние пластической деформации на коэрцитивную силу малоуглеродистой стали. *Дефектоскопия*, 6, 90–98.
6. Горкунов Э.С., Федоров В.П., Бухвалов А.Б., Веселов И.Н. (1997) Моделирование диаграммы деформирования на основе измерения ее магнитных характеристик. *Там же*, 4, 87–95.
7. Попов В.А., Гудошник В.А. (2012) Мифы и реальность применения магнитной структуроскопии при оценке напряженно-деформированного состояния металлоконструкций подъемных сооружений. *Подъемные сооружения. Специальная техника*, 12, 20–21.
8. Гопкало О.П., Нехотящий В.О., Безлюдько Г.Я., Кураш Ю.П. (2019) Діагностування пошкодженості аустенітної сталі AISI 304 при механічному навантаженні по вимірах коерцитивної сили. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 1–13.
9. Ионов Д.В., Попов В.А. (2013) О практике применения магнитной структуроскопии для выявления структурной неоднородности в элементах конструкций объектов повышенной опасности. «Подъемные сооружения. Специальная техника», 4. [Электронный ресурс]. Режим

доступу : en.tuev-dieks.com > articles > sobyitiya-v-mire-diagnostiki-i-ekspertiz

10. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. (1993) Магнитные методы структурного анализа неразрушающего контроля, Москва, Наука.
11. Леонов И.С. (2013) Совершенствование коэрцитиметрического метода для анализа напряженного состояния нефтегазопроводов. Дис. ... канд. техн. наук 25.00.19. Ухта.
12. Малахов О.В., Кочергин А.В., Девяткин Д.С. (2013) Перспективы применения метода магнитной памяти металлов к диагностике состояния металлов. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, 4/5 (64), 20–24. ISSN 1729-3774.
13. Царькова Т.П., Кулеев В.Г. (2009) Особенности магнитоупругого эффекта в пластически деформированных ферромагнитных сталях в слабых магнитных полях. *Там же*, 108, 3, 227–236.

References

1. Lepesh, G.V. (2015) Sovremennye metody i sredstva diagnostiki oborudovaniya inzhenernykh sistem zdaniy i sooruzhenij. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy` servisa*, 4(34), 3–8 [in Russian].
2. Lepesh, G.V. (2015) Diagnostika i kompleksnoe obsluzhivanie inzhenerno-tehnicheskikh sistem i oborudovaniya zdaniy i sooruzhenij. *Tekhniko-tehnologicheskie problemy` servisa*, 5(35), 6–16 [in Russian].
3. GOST 18353-79 Kontrol` nerazrushayushhij. Klassifikatsiya vidov i metodov. Gruppy T59. Non-destructive check. Classification of types and methods. Data vvedeniya 1980-07-01. Postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta SSSR po standartam ot 11 noyabrya 1979 g. № 4245 data vvedeniya ustanovlena 01.07.80. Vzamen GOST 18353-73. Elektronnyj fond normativno-pravovoj dokumentatsii. Rezhim dostupa: <http://docs.cntd.ru/document/gost-18353-79> (data obrashheniya 5.05.2016) [in Russian].
4. GOST 20911-89 Tekhnicheskaya diagnostika. Terminy i opredeleniya Technical diagnostics. Terms and definitions. Data vvedeniya 1991-01-01. Utverzhen i vveden v dejstvie Postanovleniem Gosudarstvennogo komiteta SSSR po upravleniyu kachestvom produkcii i standartam ot 26.12.89 № 4143. Vzamen GOST 20911-75. Pereizdanie. Noyabr` 2009g.

- Rezhim dostupa <http://docs.cntd.ru/document/1200009481> (data obrashheniya 5.05.2016) [in Russian].
5. Khrystenko, I.N., Kryvova, V.V. (1984) Vliyanie plasticheskoy deformatsii na koertsitivnyuy cilu malouglerodistoy stali. *Defektoskopia*, 6, 90. [in Russian].
6. Gorkunov, E.S., Fedorov, V.P., Bukhvalov, A.B., Veselov, I.N. (1997) Modelirovanie diagrammy deformirovaniya na osnove izmereniya ee magnitnykh characteristic. *Ibid*, 4, 87–95 [in Russian].
7. Popov, V.A. (2012) Mify i realnost primeneniya magnitnoy strukturoskopii pri otsenke napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya metallokonstruktsiy podzemnykh sooruzheniy. Podemnyye soorusheniya. *Spetsialnaya tekhnika*, 12, 20–21. [in Russian].
8. Gopkalo, O.P., Nekhotyashhij, V.O., Bezlyud`ko, G.Ya., Kurash, Yu.P. (2019) Diagnostuvannya poshkodzhennosti` austenitnoy stali` AISI 304 pri mekhanichnomu navantazhenni` po vimirakh koercitivnoy sili. *Tekhn. diagnostika i nerazrush. Kontrol`*, 4, 1–13. [in Ukrainian].
9. Ionov, D.V., Popov, V.A. (2013) O praktike primeneniya magnitnoy strukturoskopii dlya vyyavleniya strukturnoj neodnorodnosti v elementakh konstrukcij obektov povyshennoj opasnosti. «Podyomnye sooruzheniya. Spetsialnaya tekhnika», 4. [Elektronnij resurs]. Rezhim dostupa : en.tuev-dieks.com > articles > sobyitiya-v-mire-diagnostiki-i-ekspertiz > [in Russian].
10. Mikheev, M.N., Gorkunov, E`S. (1993) *Magnitnye metody strukturnogo analiza nerazrushayushhego kontrolya*. Moskva, Nauka. [in Russian].
11. Leonov, I.S. (2013) *Sovershenstvovanie koercitimetriceskoy metoda dlya analiza napryazhennogo sostoyaniya neftegazoprovodov. Dis. kand. tekhn. nauk 25.00.19. Ukhita*. [in Russian].
12. Malakhov, O.V., Kochergin, A.V., Devyatki, D.S. (2013) Perspektivy primeneniya metoda magnitnoy pamyati metallov k diagnostike sostoyaniya metallov. *Vostochno-Evropskij zhurnal peredovykh tekhnologij* ISSN 1729-3774, 4/5 (64), 20–24 [in Russian].
13. Czarkova, T.P., Kuleev, V.G. (2009) Osobennosti magnitoupругого effekta v plasticheski deformirovannykh ferromagnitnykh stalyakh v slabykh magnitnykh polyakh. *Ibid*, 108, 3, 227–236. [in Russian].

DIAGNOSIS OF DAMAGE TO FERROMAGNETIC STEELS DURING MECHANICAL LOADING BY RESULTS OF MEASUREMENTS OF COERCIVE FORCE

O.P. Gopkalo¹, G.Ya. Bezlyudko², A.A. Kotliarenko¹, Yu.P. Kurash¹, R.M. Solomacha²

¹G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NASU, Kyiv, Ukraine. 01014, 2 Timiryazevska str., E-mail: ips@ipp.kiev.ua

²LLC «Special Scientific Developments», Kharkiv, Ukraine. 61184, Kharkiv, s/b 12036. E-mail: mail@snr-ndt.com

An experimental substantiation of the possibility of estimating the degree of technological and operational damage to metal structures made of ferromagnetic steels was performed by the results of measuring the coercive force. The revealed effect of a sharp change of direction and maximum values of coercive force when exceeding the stresses of the conditional yield strength on the surface of the most damaged parts of the product allows separating the damage received in the structure metal under elastic deformation (to the tensile yield strength) and damage obtained at elasto-plastic deformation right up to destruction, and clearly delineating the boundaries of the zones of received reversible and irreversible damage. Due to the effect of a sharp change in the direction and maximum values of coercive force at exceeding the stresses of the conditional yield strength in the most damaged parts of structures, there is no need to determine the mechanical characteristics of strength and ductility of the metal, as the load diagnostics is conducted relative to the conditional yield strength. Variation of the orientation of the pole tips of the sensor magnets to measure the values of coercive force relative to the studied surface allows determination of the most deformed and damaged areas, establishing the direction of principal stresses and assessing the structural homogeneity of the metal. 14 Ref., 10 Fig.

Keywords: *structuroscope, coercive force, load, damage, stress, deformation, fracture*

Надійшла до редакції
24.01.2020