

ДІАГНОСТУВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ МЕТАЛУ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ МЕХАНІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ПО ВИМІРАХ КОЕРЦИТИВНОЇ СИЛИ

О.П. Гопкало¹, Г.Я. Безлюдько², В.О. Нехотящий³, Ю.П. Кураш¹

¹ Інститут проблем міцності імені Г.С.Писаренка НАН України, м. Київ

² ТОВ "Спеціальні наукові розробки" м. Харків

³ Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, м. Київ

Abstract. The results of experimental investigations of the possibility of using a coercimetric control for assessing the degree of metal damage to structures under mechanical load by measurements of coercive force are presented. It is shown that the differences in the response of the coercive force to the mechanical loads of ferromagnetic and austenitic steels are the differences in the physical nature of these phenomena.

Мета роботи. Мета роботи полягає у експериментальному встановленні закономірностей реагування коерцитивної сили на механічні навантаження ферромагнітних та парамагнітних сталей для визначення можливості використання методу коерцитиметричного контролю для оцінки ступеня накопичених пошкоджень.

Методика експериментальних досліджень. Для перевірки можливості оцінки накопичених пошкоджень металу конструкцій при механічному навантаженні по результатам вимірювання коерцитивної сили були проведені спеціальні експериментальні дослідження на лабораторних зразках. Об'єктом досліджень була полоса 40x5мм, метал труб $\varnothing 76 \times 3$ і $\varnothing 159 \times 4$ з подовжнім зварним швом із аустенітної сталі AISI 304 (08X18H9), італійського виготовлення у відповідності з європейським стандартом EN 10217-7 та листову сталь 05кп товщиною 3 мм і метал труби $\varnothing 630 \times 8$ із сталі 17ГС.

Для випробувань використовували плоскі лабораторні зразки з різними розмірами робочої частини. Випробування на розтяг і малоциклову втому при контролі амплітуди деформації ("жорстке" навантаження) зразків проводили на електрогідравлічних випробувальних машинах 3201 UE-20 (СКБІМ, Росія) та INSTRON-8802 відповідно до ГОСТ 1497-84, 25.502-79 та ГОСТ 25.505-85. Випробування на багатоциклову втому проводили на резонансній випробувальній машині RUMUL TESTRONIC 50kN виробництва компанії RUSSENBERGER PRÜFMASCHINEN AG (Швейцарія). Випробування на циклічний вітнулевий розтяг зразків при контролі рівня прикладених зусиль ("м'яке" навантаження) з частотою 2 цикла/хв. проводили на важільній випробувальній машині ПП-4М (ЦНИИТМАШ, Росія). Всі вищезгадані випробування проводили при кімнатній температурі.

Для вимірювання коерцитивної сили (H_c) в лабораторних зразках при механічному навантаженні використовували структуроскоп КРМ-Ц-К2М (ТОВ "Спеціальні наукові розробки" м.Харків) відповідно до стандартів ISO4301, ГОСТ 30415-96 та методичними вказівками РД ІКЦ «Кран» 07/97/02 (Росія), МВ 0.00-7.01-05 (Україна). В даній роботі використовували структуроскоп з різними датчиками, що відрізняються базою вимірювання та глибиною намагнічування: стандартний датчик D65 (база - 65 мм) з глибиною намагнічування до 30мм, малобазний датчик D27 (база - 27 мм) з глибиною намагнічування до 4мм і датчик із зменшеною базою D12 (база - 12 мм) з глибиною намагнічування до 1мм. Останній був розроблений і виготовлений за рекомендацією авторів. Де базою вимірювання вважали відстань між зовнішніми краями наконечників полюсів магнітів.

Результати експериментальних досліджень реагування коерцитивної сили на механічні навантаження аустенітної сталі AISI 304 (08X18H9). На рис. 1 показана кінетика значень коерцитивної сили по числу циклів навантаження з амплітудою

знакозмінної деформації $\varepsilon_a = \pm 0,4\%$ ("жорстке" навантаження) зразків із парамагнітної у вихідному стані аустенітної сталі AISI 304 (08X18H9) в залежності від бази вимірювання датчиків. З отриманих даних слідує, що із зменшенням бази вимірювання (збільшенням локальності вимірювань) значення коерцитивної сили збільшуються. Таким чином, використання структуроскопу не глибокого намагнічування із зменшеною базою датчика D12 дозволяє отримувати більш високі значення коерцитивної сили і більш точно дослідити її кінетику в поверхневих більш локальних зонах металу при механічному навантаженні. На рис. 2 приведена кінетики коерцитивної сили, яку вимірювали за допомогою датчика D12 в зоні руйнування, по числу циклів навантаження з амплітудою деформації $\varepsilon_a = \pm 0,5\%$ на зовнішній та внутрішній поверхнях лабораторного зразка із труби. Наявність перелому на кривій кінетики коерцитивної сили по числу циклів навантаження при циклічному знакозмінному деформуванні свідчить про стадійність процесів пошкодження металу: зростання значень коерцитивної сили відповідає пружно-пластичному деформуванню (стадії зародження тріщин), а зниження значень H_c – стадії розвитку тріщин, пов'язаної із зниженням магнітних властивостей металу при втраті його суцільності. Перелом кривої кінетики коерцитивної сили в залежності від числа циклів малоциклового "жорсткого" навантаження обумовлений появою та розвитком тріщин втоми (втрати суцільності металу) в зоні руйнування після 1600 циклів циклічного знакозмінного деформування.

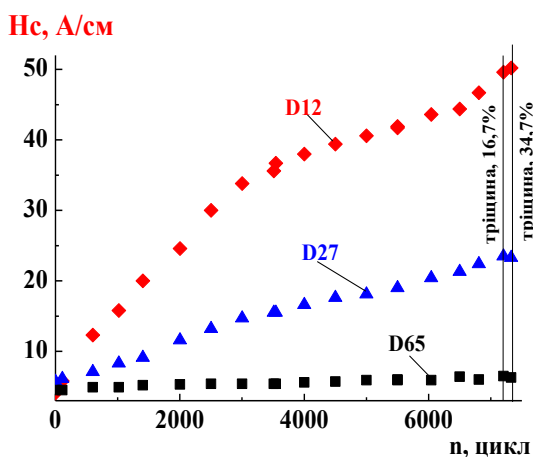


Рис. 1. Кінетика значень коерцитивної сили H_c по числу циклів напрацювання з амплітудою знакозмінної деформації $\varepsilon_a = \pm 0,4\%$ в залежності від бази вимірювання датчиків.

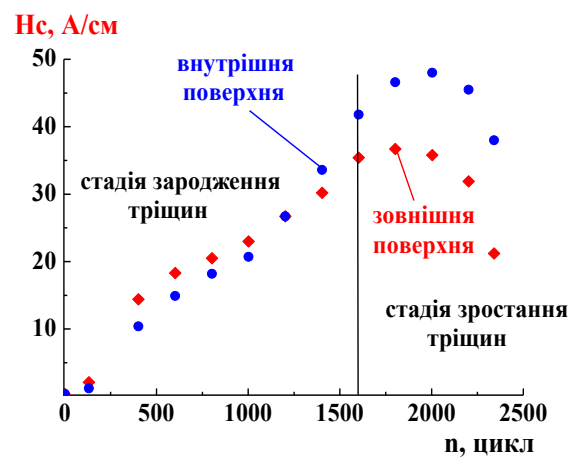


Рис. 2. Кінетика коерцитивної сили на зовнішній і внутрішній поверхнях зразка з труби в зоні руйнування при положенні полюсів наконечників магнітів датчика уздовж робочої довжини зразка при циклічному деформуванні з амплітудою деформації $\varepsilon_a = \pm 0,5\%$.

Поява і розвиток тріщин втоми на зовнішній поверхні зразка з труби обумовлює більш інтенсивне зниження магнітних властивостей металу і, відповідно, значень коерцитивної сили, на фоні пружно-пластичного деформування решти об'єму металу у тому числі між тріщинами. В той же час на внутрішній поверхні зразка із труби, де тріщини втоми відсутні, теж відбувається пружно-пластичне деформування, яке обумовлює інтенсивне зростання значень коерцитивної сили, але наявність тріщин втоми на зовнішній поверхні зразка також обумовлює зміну напрямку її кінетики. Ця обставина свідчить про можливість моніторингу процесів накопичення пошкоджень як на поверхні виробу та і у під поверхневих шарах металу (над дефектом) в період експлуатації, наприклад з внутрішньої поверхні, до якої не має доступу.

При механічному навантаженні експериментально була встановлена залежність значень коерцитивної сили від орієнтації полюсів наконечників магнітів датчика

відносно напрямку навантаження, що дозволяє для реальних конструкцій визначати напрямки головних напружень і виявляти появу поверхневих та підповерхневих тріщин. На рис. 3 наведені дані значень коерцитивної сили в зоні тріщини та на прилеглих ділянках після циклічного напруження (з амплітудою деформації $\varepsilon_a = \pm 0,4\%$) до числа циклів $n = 7204$ та $n = 7328$ (при цьому площа тріщини складала, відповідно, 16,7% і 33,4% від номінальної).

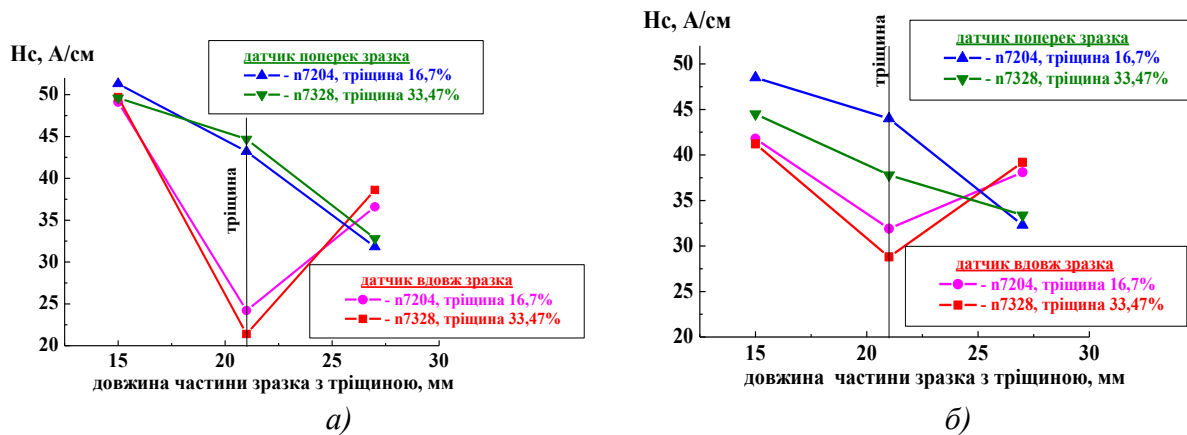


Рис. 3. Значення коерцитивної сили H_c на зовнішній (а) і внутрішній (б) поверхнях зразка при орієнтації наконечників полюсів магнітів датчика вздовж і поперек робочої частини зразка (при $n = 7204$ і $n = 7328$ числа циклів навантаження).

При орієнтуванні наконечників полюсів магнітів датчика уздовж зовнішньої поверхні робочої частини зразка (вздовж напрямку прикладеного навантаження, тобто перпендикулярно напрямку тріщини) в зоні тріщини мають місце більш низькі значення коерцитивної сили по відношенню до периферійних зон, що сприяє їх виявленню. Слід зазначити, що при орієнтуванні наконечників полюсів магнітів датчика уздовж робочої частини зразка на внутрішній поверхні зразка з труби, де тріщини втоми відсутні, також має місце зниження значень коерцитивної сили (рис. 3 б). Це підтверджує можливість виявлення підповерхневих тріщин за допомогою малогабаритного датчика D12.

Аналогічні закономірності реагування коерцитивної сили на механічні навантаження лабораторних зразків із AISI 304 мали місце при багатоциклового навантаженні.

Так отримані результати випробувань лабораторних зразків на багатоциклового втому дозволили по зміні напрямку кривої коерцитивної сили розробити дуже простий метод побудови кривої незворотної пошкоджуваності (за Френчем) [1]. Де межею зворотної та незворотної пошкоджуваності прийнято вважати екстремум (максимальні значення) на кривій зміни коерцитивної сили при певному числі циклів механічного навантаження (рис. 4). Фізичний сенс лінії Френча полягає в тому, що після досягнення цієї лінії при випробуваннях на втому метал містить в поверхневому шарі мікроскопічні тріщини довжиною близько зерна (за експериментальними даними довжина таких тріщин в низьковуглецевих сталях може досягати 100 мкм). Фактично досягнення цієї лінії свідчить про те, що в металі завершився 1-й період втоми (період зародження мікротріщин) і подальше навантаження пов'язане вже з періодом поширення втомних тріщин.

На рис. 5 приведені результати експериментальної перевірки схеми побудови кривої незворотної пошкоджуваності, які базуються на даних аналізу кінетики коерцитивної сили (рис. 4) при механічному навантаженні. Для перевірки схеми побудови кривої незворотної пошкоджуваності було проведено попереднє циклічне напруження 5-ти зразків з амплітудою напружень $0,75\sigma_{0,2}$ до числа циклів $n=1 \times 10^4$, 3×10^4 , 4×10^4 , 5×10^4 та $5,5 \times 10^4$ циклів з наступним навантаженням з меншою амплітудою напружень $0,6\sigma_{0,2}$ до $n=1 \times 10^6$ циклів (зразки №1 ... №4), або до

руйнування (зразок №5). На основі отриманих даних була побудована лінія незворотної пошкоджуваності. Таким чином, на основі отриманих даних розроблено достатньо простий метод побудови кривої незворотної пошкоджуваності (за Френчем) для нестабільних аустенітних сталей, який базується на визначенні екстремуму (максимуму) на кінетичній кривій коерцитивної сили при циклічному напруженні, після досягнення якого відбувається падіння значень H_c внаслідок накопичення незворотних пошкоджень. Використання розробленого методу побудови кривої незворотної пошкоджуваності дозволяє для нестабільних аустенітних сталей при оцінці залишкового ресурсу металу конструкції істотно знизити ризики руйнування.

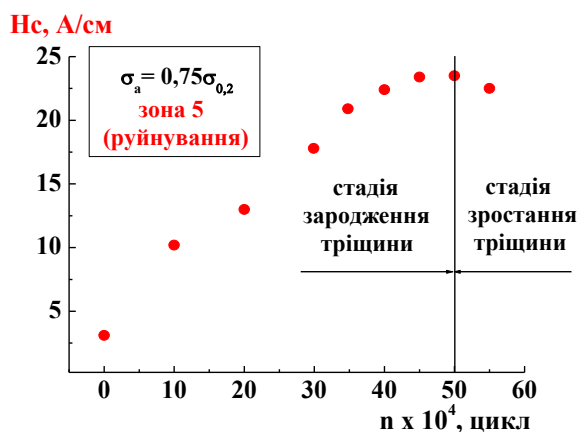


Рис. 4. Кінетика зміни коерцитивної сили H_c від числа циклів n навантаження при частоті 80Гц у зоні руйнування робочої частини лабораторного зразка при амплітуді напружень $\sigma_a = 0,75 \sigma_{0,2}$.

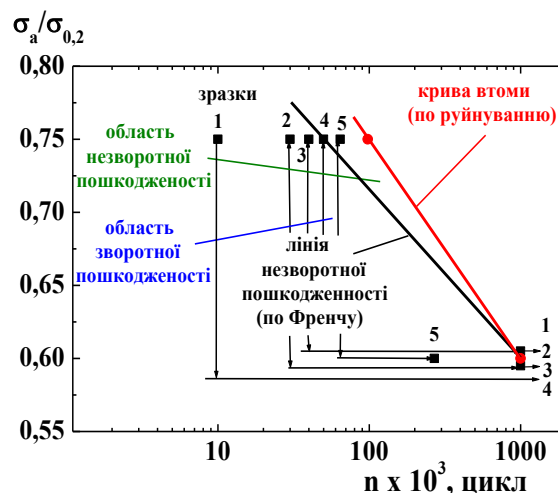


Рис. 5. Схема побудови кривої незворотної пошкоджуваності (за Френчем): зразок 1 – напруження $n=1 \times 10^4$ циклів, $H_c = 10,3$ А/см;
 2 – $n=3 \times 10^4$ циклів, $H_c = 17,8$ А/см;
 3 – $n=4 \times 10^4$ циклів, $H_c = 22,4$ А/см;
 4 – $n=5 \times 10^4$ циклів, $H_c = 23,5$ А/см;
 5 – $n=5,5 \times 10^4$ циклів, $H_c = 22,4$ А/см.

Використання структуроскопу дозволило розробити достатньо простий інструментальний метод визначення границі витривалості аустенітних сталей. На рис. 6 приведена залежність коерцитивної сили від амплітуди напружень у різних зонах по довжині робочої частини зразка (зони 1 ... 6). При циклічному навантаженні з амплітудою напружень $\sigma_a = 0,6 \sigma_{0,2}$ у діапазоні 0 ... $1,5 \times 10^6$ числа циклів значення коерцитивної сили H_c , вимірюваною структуроскопом, практично, не змінюється, що підтверджує припущення про відсутність суттєвих змін структури металу, а значення амплітуди циклічних напружень може відповідати межі витривалості. Підвищення амплітуди напружень з кроком у 3% викликає відповідне зростання значень коерцитивної сили, що, ймовірно, пов'язано із зміною структури металу. Слід зазначити, що непрямым свідченням досягнення діючих напружень величини межі витривалості при випробуваннях на багатоциклову втому при частоті навантаження 80Гц являється початок характерного розігрівання зразка. При циклічному навантаженні за швидкістю зростання коерцитивної сили можна визначити також значення обмежених меж витривалості на різних базах довговічності. Аналогічні закономірності реагування коерцитивної сили на механічні навантаження лабораторних зразків із AISI 304 мають місце при випробуваннях на статичний та циклічний розтяг.

Таким чином із отриманих експериментальних результатів можна зробити висновок про незалежність кінетики коерцитивної сили від виду навантаження і, відповідно, виду отриманих пошкоджень. Встановлення стадій зародження та розвитку тріщин дозволяє оцінювати ступінь пошкодження (різного походження) металу

конструкції на кожній із стадій простим неруйнівним інструментальним методом одним і тим же приладом. При механічному навантаженні за величиною коерцитивної сили на висхідних або низхідних ділянках кінетичних кривих H_c можна оцінювати залишкову міцність металу на кожній із стадій пошкодження.

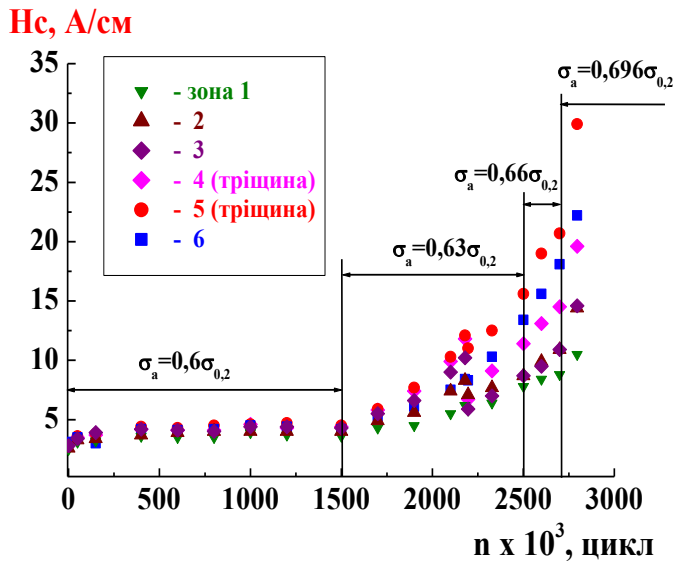


Рис. 6. Залежність коерцитивної сили від амплітуди напружень у різних по довжині робочої частини зразка зонах.

Результати експериментальних досліджень реагування коерцитивної сили на механічні навантаження феромагнітних сталей. Експериментальні дослідження реагування коерцитивної сили на механічні навантаження феромагнітних сталей показали більш обмежені можливості застосуванні коерцитиметричного контролю для оцінки отриманих пошкоджень. Основна відмінність закономірностей реагування коерцитивної сили на механічні навантаження феромагнітних сталей від парамагнітних полягає у відмінностях фізичної природи цих явищ. Для феромагнітних сталей зміни значень коерцитивної сили при механічному навантаженні пов'язані з упорядкуванням орієнтації доменної структури металу (від хаотичної до направленої). При механічному навантаженні парамагнітної (у вихідному стані) аустенітної сталі AISI 304 (08X18N9) при напруженнях, які перевищують межу витривалості металу, відбуваються структурні перетворення вихідного аустеніту в деформаційний мартенсит з кінцевим феррито-перлітним розпадом. При цьому еволюція структури не залежать від виду навантаження та виду накопичених пошкоджень, обумовлює структурні перетворення, які викликають зміни магнітних властивостей металу і впливає на значення коерцитивної сили, які можуть бути адаптовані до отриманих пошкоджень металу. Для феромагнітних сталей стадійність процесу накопичення пошкоджень суттєво відрізняється від аналогічних закономірностей для парамагнітних аустенітних сталей. Так для феромагнітних сталей експериментально встановлено, що після першого перевантаження металу (діючі напруження перевищували умовну межу пластичності), при розвантаженні до нульових значень діючих напружень, відбувається "стрибок" і зміна напрямку (на 90^0) максимальних значень коерцитивної сили і збереженні при цьому їх максимальних величин у розвантаженому стані.

На рис. 7 а, б приведена кінетика коерцитивної сили в зоні руйнування у навантаженому стані при дії циклічних напружень розтягу та у розвантаженому стані при орієнтуванні наконечників полюсів магнітів **поперек а)** та **вздовж 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 при орієнтуванні наконечників полюсів магнітів **поперек** робочої частини зразка (рис. 7а) не залежно від рівня напружень має місце монотонне зростання значень коерцитивної сили із значним підвищення їх величин при руйнуванні.

У навантаженому стані при орієнтуванні наконечників полюсів магнітів **вздовж** робочої частини зразка 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 відповідають умовній межі плинності.

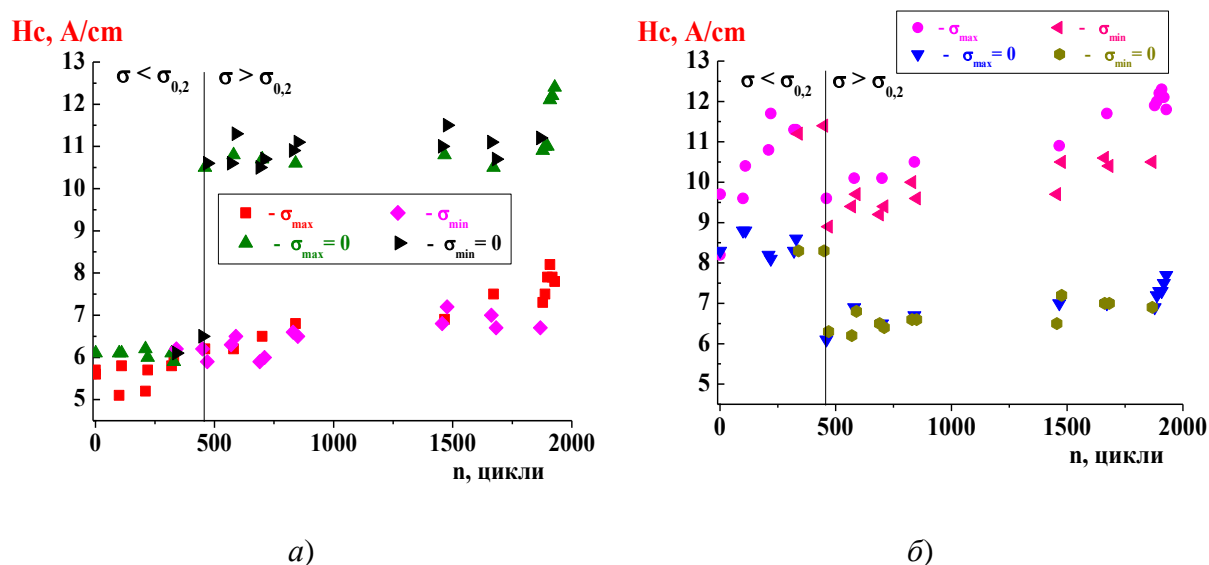


Рис. 7. Кінетика коерцитивної сили в зоні руйнування у навантаженому стані (точки у жовто–червоних тонах) та після розвантаження (точки у чорно–синє–зелених тонах) при розташуванні наконечників полюсів магнітів датчика **поперек** (а) та **вздовж** (б) робочої частини лабораторного зразка.

У розвантаженому стані (рис. 7а) при орієнтуванні наконечників полюсів магнітів **поперек** робочої частини зразка після дії напружень, які перевищували значення умовної межі плинності металу ($\sigma > \sigma_{0,2}$), відбувається різке майже двократне підвищення значень коерцитивної сили, яке не змінює своїх величин, практично, до руйнування. І тільки при руйнуванні відбувається підвищення на 14% значень H_c . У розвантаженому стані при орієнтуванні наконечників полюсів магнітів **вздовж** робочої довжини зразка (рис. 7 б) після дії напружень, які перевищували значення умовної межі плинності металу ($\sigma > \sigma_{0,2}$), відбувається різке зниження на 27% значень коерцитивної сили які поступово підвищуються. І вже при руйнуванні відбувається різке підвищення значень коерцитивної сили до величини, яка приблизно відповідає значенням коерцитивної сили після дії пружних напружень, які не перевищували умовну межу плинності ($\sigma < \sigma_{0,2}$).

Слід зазначити, що у **навантаженому** стані, у пружному ($\sigma < \sigma_{0,2}$) та пластичному ($\sigma > \sigma_{0,2}$) діапазоні деформування (рис. 8а) напрямок максимальних значень коерцитивної сили співпадає з напрямком навантаження. При пружному деформуванні ($\sigma < \sigma_{0,2}$) у навантаженому та розвантаженому стані напрямок і максимальні значення коерцитивної тяж сили співпадають. У **розвантаженому** стані після навантаження (рис. 8б) напрямок максимальних значень коерцитивної сили орієнтований перпендикулярно напрямку навантаження і відповідає орієнтуванню наконечників полюсів магнітів **поперек** зразка. 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 значень коерцитивної сили, при перевищенні напружень умовної межі плинності, при моніторингу НДС 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 [2, 3, 4].

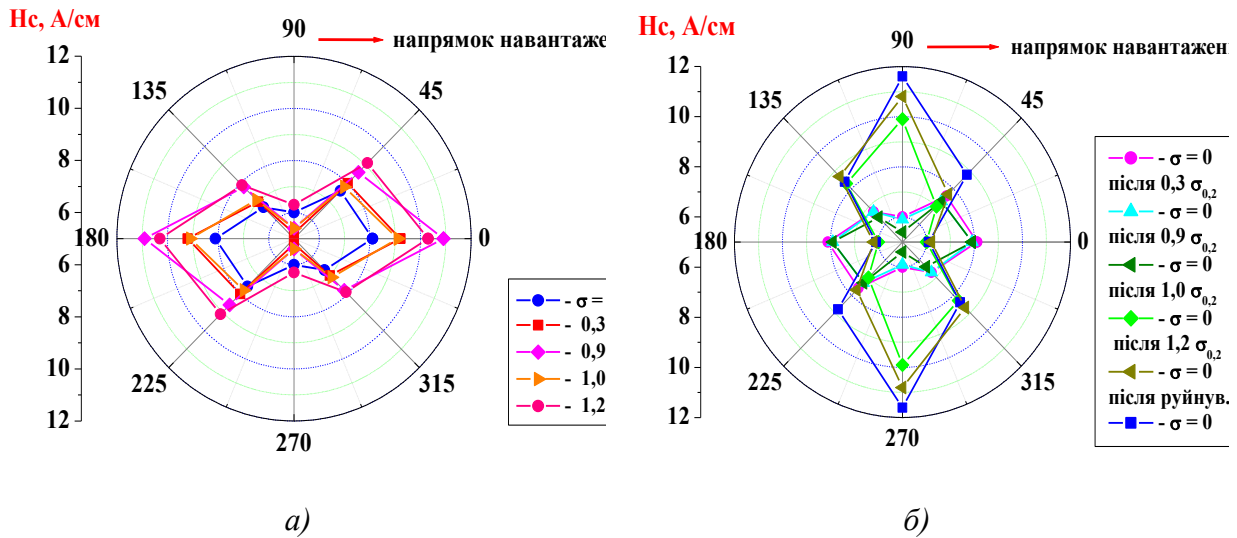


Рис. 8. Епюри розподілу значень коерцитивної сили по поверхні лабораторного зразка у навантаженому стані (а) та після навантаження (розвантажений стан) (б).

Висновки. Метод діагностування технічного стану виробів полягає у проведенні попередніх розрахунків НДС для встановлення найбільш навантажених локальних зон металу конструкції та послідовного вимірювання значень коерцитивної сили на поверхні у цих зонах. Оскільки значення коерцитивної сили залежить від орієнтації наконечників полюсів магнітів відносно напрямку діючих напружень, то при діагностуванні технічного стану 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 . Для оцінки технічного стану найбільш небезпечних зон в процесі експлуатації конструкції необхідно періодично проводити моніторинг значень коерцитивної сили з побудовою її кінетики. Отримані результати можуть слугувати даними для подальшої оцінки технічного стану виробу.

При моніторингу технічного стану елементів конструкцій шляхом виміру значень коерцитивної сили при варіюванні положення (орієнтації) наконечників полюсів магнітів датчика відносно досліджуваної поверхні надається можливість визначити найбільш деформовані і пошкоджені зони, з встановленням напрямку головних напружень, і виявляти не суцільності металу у вигляді пор або тріщин (у тому числі поверхневих та під поверхневих). Для аустенітних сталей по зміні напрямку кінетики коерцитивної сили в процесі навантаження з'являється можливість значно спростити визначення границі витривалості та встановлення стадій процесу накопичення пошкоджень з побудовою лінії незворотної пошкоджуваності (за Френчем).

При визначенні розподілу значень коерцитивної сили по поверхні виробу у найбільш навантажених ділянках, слід звертати увагу не на максимальні значення H_c , які можуть перевищувати аналогічні дані у зоні руйнування, а на зміну напрямку кінетичної кривої H_c на таких ділянках. При цьому в зонах прилеглих до зони руйнування внаслідок пружно-пластичного деформування може продовжуватись зростання значень коерцитивної сили. В умовах експлуатації виробів зміна напрямку кінетичної кривої коерцитивної сили вказує на завершення стадії зародження тріщин і

початок стадії руйнування (розвитку тріщин), що збільшує ризики руйнування. У цьому випадку доцільне застосування інших неруйнівних методів контролю, наприклад, вимірювання товщини металу та ультразвукового контролю для визначення розмірів та розташування дефектів (тріщин) в об'ємі металу зони руйнування.

Для ферромагнітних сталей встановлено більш обмежені можливості застосування коерцитиметричного контролю для оцінки ступеня пошкодження металу. Коерцитиметричний моніторинг поверхні виробу дозволяє проводити тільки сепарування пошкоджень, отриманих у металі в умовах пружного деформування (до умовної межі плинності) і пошкодження отримані при пружно-пластичному деформуванні, а ж до руйнування з встановленням фіксованої межі зворотної та незворотної пошкоджуваності. 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 окремих ділянок відповідальних елементів конструкцій в період експлуатації. Ефект різкої зміни значень та напрямку вимірювання максимальних величин коерцитивної сили, при перевищенні напружень умовної межі плинності, при моніторингу НДС елементів конструкцій можна використовувати для встановлення меж пружно та пластично деформованого металу.

Література:

1. Терентьев В.Ф. Циклическая прочность металлических материалов: Учеб. пособие. [Текст] / В.Ф.Терентьев, А.А. Оксогоев – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2001. – 61 с.
2. Малахов О.В. Перспективы применения метода магнитной памяти металлов к диагностике состояния металлов [Текст] / О.В.Малахов, А.В.Кочергин, Д.С.Девяткин // Восточно–Европейский журнал передовых технологий ISSN 1729-3774, 4/5 (64) 2013 с.20–24].
3. Кулеев В.Г. Исследование причин существенных различий величин коэрцитивной силы, остаточной намагниченности и начальной магнитной проницаемости ферромагнитных сталей в нагруженном состоянии при их пластическом растяжении [Текст] / В.Г.Кулеев, Т.И.Царькова, А.П.Нипичурук. – ФММ. – 2007. – т. 103, – № 2. – С. 136 – 146.
4. Царькова Т.П. Особенности магнитоупругого эффекта в пластически деформированных ферромагнитных сталях в слабых магнитных полях [Текст] / Т.П.Царькова, В.Г.Кулеев. – ФММ. – 2009. – т. 108, – № 3. – С. 227 – 236.