

ДІАГНОСТУВАННЯ ПОШКОДЖЕНОСТІ АУСТЕНІТНОЇ СТАЛІ AISI 304 ПРИ МЕХАНІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ПО ВИМІРАХ КОЕРЦИТИВНОЇ СИЛИ

О.П. Гопкало¹, В.О. Нехотящий², Г.Я. Безлюдько³, Ю.П. Кураш¹, Р.М. Соломаха³

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

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150. м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

³ТОВ «Спеціальні наукові розробки». 61184, м. Харків, а/с 12036, Україна

Приведені результати експериментальних досліджень можливості використання коерцитиметричного контролю для оцінки ступеню пошкодження металу при механічному навантаженні по вимірах коерцитивної сили. Показано, що відмінності у реагуванні коерцитивної сили на механічні навантаження феромагнітних та аустенітних сталей полягають 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). Реагування коерцитивної сили на механічні навантаження парамагнітної (у вихідному стані) нестабільної аустенітної сталі AISI 304 (08X18H9) пов'язано із структурними перетвореннями в процесі деформування вихідного аустеніту в деформаційний мартенсит з кінцевим ферито-перлітним розпадом. Механічні навантаження обумовлюють зміну співвідношення феромагнітних та парамагнітних фаз металу, які викликають зростання значень коерцитивної сили до певної величини після чого при руйнуванні має місце зниження цих значень. Було встановлено, що зростання значень коерцитивної сили відповідає пружному та пружнопластичному деформуванню (стадії зародження тріщин), а зниження їх значень пов'язано з втратою суцільності металу при появі пор або тріщин (стадії розвитку тріщин). Для нестабільних 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). Коерцитиметричний моніторинг поверхні реальних конструкцій дозволяє визначати напрямок головних напружень і виявляти появу поверхневих та підповерхневих тріщин та оцінити рівень отриманих пошкоджень. Бібліогр. 18, рис. 18.

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

Мета роботи. Мета роботи полягає у експериментальній перевірці можливості використання одного із методів неруйнівного контролю, а саме інструментального вимірювання змін значень коерцитивної сили в процесі механічного навантаження лабораторних зразків із аустенітної сталі для оцінки ступеня накопичених пошкоджень. Роботи останніх років в області магнітної структуроскопії дозволили встановити зв'язок магнітних і механічних властивостей ряду феромагнітних конструкційних сталей [1, 2]. В якості основного магнітного параметра була обрана коерцитивна сила (H_c , А/см), як найбільш чутлива до зміни щільності дислокаційної структури сталі [3] і пов'язана лінійною залежністю з механічними властивостями. В результаті діаграму розтягу стало можливим моделювати за даними зміни коерцитивної сили.

У зв'язку з встановленими суттєвими відмінностями реагування коерцитивної сили феромагнітних та парамагнітних сталей на механічні навантаження, які обумовлені відмінностями фізичної природи цих явищ, у даній роботі основну увагу приділено дослідженням нестабільної аустенітної

сталі AISI 304, для якої при навантаженні характерні більш високі максимальні значення коерцитивної сили, ніж для феромагнітних сталей, та відсутність впливу ефекту розвантаження на значення H_c [4–6]. Для феромагнітних сталей зміни значень коерцитивної сили при механічному навантаженні пов'язані з упорядкуванням орієнтації доменної структури металу (від хаотичної до направленої). При навантаженні цих сталей відбувається зростання значень коерцитивної сили, а при розвантаженні після дії напружень, які перевищували умовну межу плинності металу, відбувається поворот на 90° диполів та підвищення у 1,5...2,0 рази аналогічних значень H_c . Для парамагнітних (не магнітних у початковому стані) зміни значень коерцитивної сили при навантаженні пов'язані із структурними перетвореннями вихідного аустеніту в деформаційний мартенсит з кінцевим ферито-перлітним розпадом, які викликають зміну магнітних властивостей металу з парамагнітного у феромагнітний стан. Слід зазначити, що оскільки механічні навантаження викликають еволюцію структури, яка обумовлює зміни значень коерцитивної сили, то останні зберігаються після роз-

О.П. Гопкало <https://orcid.org/0000-0001-7799-3870>

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

© О.П. Гопкало, В.О. Нехотящий, Г.Я. Безлюдько, Ю.П. Кураш, Р.М. Соломаха, 2019

вантаження. Дана обставина дозволяє проводити адаптування змін значень коерцитивної сили до накопичених пошкоджень у локальних зонах металу конструкцій в умовах експлуатації незалежно від наявності навантаження.

При циклічному навантаженні, крім цих перетворень відбувається утворення і накопичення мікропошкоджень у металі, які впливають на магнітні властивості та значення коерцитивної сили в тому числі. Використання коерцитивного контролю в умовах втомного навантаження дозволить проводити повноцінну діагностичну експертизу поточного стану елементів конструкції, а не суміш дефектоскопії з дефектометрією, як це має місце сьогодні [7].

Серед інших неруйнівних методів контролю коерцитиметрична оцінка пошкодження металу конструкцій з нестабільних аустенітних нержавіючих (спочатку немагнітних) сталей є досить перспективною. Згідно з отриманими в роботі [8] даними пластичне деформування аустенітної сталі збільшило значення коерцитивної сили в 10...30 разів і об'єму феромагнітної фази (α -Fe) в 15...150 разів відносно початкового стану. З чого випливає, що ступінь небезпеки допустимого деформування металу реальних конструкцій можна оцінювати за змінами коерцитивної сили з урахуванням її кінетики. Такої інформаційної чутливості до процесів деформування металу поки не виявлено іншими методами неруйнівного контролю.

Особливості накопичення пошкоджень при механічному навантаженні. При проектуванні металоконструкцій конструктори, як правило, припускають роботу металу у пружному діапазоні деформування та знижуючи при цьому дію експлуатаційних напружень різними за призначенням коефіцієнтами запасу. Але в наслідок наявності в окремих зонах конструкції концентраторів напружень різного походження в них виникають умови для малоциклового пружнопластичного деформування. Відомо [9, 10], що для діапазону малоциклової втоми характерно накопичення двох основних видів пошкоджень: малоциклового квазістатичного та малоциклового втомного руйнування. Квазістатичне руйнування, характерно для «м'якого» навантаження (контролі амплітуди напружень), відбувається внаслідок переважаючого процесу накопичення деформації циклічної повзучості до критичних значень, які приблизно відповідають значенню відносного подовження δ при розтязі з утворенням характерної «шийки». Руйнування від втоми, характерно для «жорсткого» навантаження (контролі амплітуди деформацій), відбувається в результаті зародження та розвитку до критичних значень тріщини втоми при відсутності накопичених деформацій.

Але характер закономірностей накопичення пошкоджень при «м'якому» та «жорсткому» навантаженні має суттєві відмінності. Якщо, наприклад, оцінювати ступінь накопичених пошкоджень металу при «м'якому» та «жорсткому» навантаженні відносним навантаженням (відношенням діючих максимальних напружень $\sigma_{\text{цикл}}^{\text{max}}$ до циклічної умовної межі плинності $\sigma_{0,2}$), то кінетика процесу накопичення пошкоджень суттєво відрізняється (рис. 1). Для «м'якого» навантаження характерно монотонне зростання відносного навантаження при циклічному напруванні, а для «жорсткого» навантаження – характерна його стабільність.

В даний час при статичному і циклічному навантаженнях увесь процес накопичення пошкоджень за звичай поділяють на дві основні стадії: стадії зародження і стадії поширення тріщин, оскільки закономірності процесів пластичного деформування і руйнування при різних видах навантаження мають багато спільного [11–13].

У свою чергу стадія зародження тріщин включає в себе стадії статичної і циклічної мікроплинності, стадії статичної і циклічної плинності (з появою дефектів атомних масштабів і зародкових субмікротріщин з розмірами від тисячі ангстрем) і стадії деформаційного зміцнення з появою субмікротріщин розміром близько 1...2 мкм. При розтязі стадія зародження тріщин завершується досягненням максимального навантаження і початком шийкоутворення. При циклічному навантаженні стадія циклічного зміцнення (знеміцнення), завершується досягненням лінії незворотних пошкоджень (лінії Френча). Так само, як і при статичному деформуванні, на цій стадії поряд з процесами деформаційного зміцнення спостерігається розвиток пошкоджуваності у вигляді утворення субмікротріщин [14]. Стадію розвитку втомних тріщин зазвичай описують кінетичними діаграмами втомного руйнування (залежністю між швидкістю росту втомної тріщини і розмахом коефіцієнта інтенсивності напружень).

При розтязі і циклічному деформуванні розподіл напружень по перерізу виробів вельми нерівномірний через наявність шорсткості та концентрації напружень. При цьому пластичне деформування деталі теж дуже неоднорідне як по поверхні, так і по глибині і в умовах однорідного напруженого стану починається раніше, ніж в його серцевині [15]. Проведені експериментальні дослідження показали, наприклад [16], що в умовах однорідного напруженого стану, поверхневий шар в низько вуглецевій сталі, має межу плинності на 25 % нижче, ніж основний метал, а за деякими іншими даними [17], умовна межа плинності найтонших зразків складає всього 20 % величини для товстих зразків. При механічному навантаженні коли на поверхні проходить пластична течія, то серцевина знаходиться ще у пружному стані. Тому при циклічному навантаженні руйну-

вання, як правило, завжди починається в локальних зонах з поверхні.

В силу зазначених обставин при статичному та циклічному навантаженні поверхневі шари матеріалу починають раніше деформуватися і змінювати вихідну структуру металу, ніж основний метал, що викликає нерівномірність розподілу механічних та фізичних властивостей по поверхні та поперечному перетину виробів. При застосуванні неруйнівних методів контролю точність вимірювання характеристик фізичних властивостей матеріалу (наприклад, коерцитивної сили) в локальних поверхневих зонах буде залежати від габаритів датчика і глибини намагнічування металу. Тому при дослідженні механічних властивостей металів, наприклад, по зміні значень коерцитивної сили у найбільш пошкоджених локальних зонах поверхневих шарів, необхідно використовувати структуроскопи (коерцитиметри) з малогабаритними датчиками неглибокого намагнічування.

Методика експериментальних досліджень.

Об'єктом досліджень була полоса 40×5 мм, метал труб $\varnothing 76 \times 3$ і $\varnothing 159 \times 4$ мм з подовжнім зварним швом із аустенітної сталі AISI 304, італійського виготовлення у відповідності з європейським стандартом EN 10217-7.

Для випробувань використовували плоскі лабораторні зразки з розмірами робочої частини 120×14×4,5 мм, 150×14×3 мм, 28×14×3,6 мм та 28×14×5 мм. Випробування на розтяг і малоциклового втому при контролі амплітуди деформації («жорстке» навантаження) зразків проводили на модернізованій електрогідравлічній випробувальній машині 3201 UE-20 (СКБІМ, Росія) та INSTRON-8802 відповідно до ГОСТ 1497-84, 25.502-79 та ГОСТ 25.505-85. Випробування на багатоциклового втому проводили на резонансній випробувальній машині RUMUL TESTRONIC 50kN виробництва компанії RUSSENBERGER PRÜFMASCHINEN AG (Швейцарія). Випробування на циклічний вітнулевий розтяг зразків з частотою 2 цикла/хв проводили на важільній випробувальній машині ІП-4М (ЦНИИТМАШ, Росія). Всі згадані вище випробування проводили при кімнатній температурі.

Для вимірювання коерцитивної сили в лабораторних зразках при механічному навантаженні використовували структуроскоп КРМ-Ц-К2М (ТОВ «Спеціальні наукові розробки», м. Харків) відповідно до стандартів ІСО4301, ГОСТ 30415-96 та методичних вказівок РД ІКЦ «Кран» 07/97/02 (Росія), МВ 0.00-7.01-05 (Україна). В даній роботі для вимірювання значень коерцитивної сили використовували структуроскоп з різними датчиками, що відрізняються базою вимірювання та глибиною намагнічування: стандартний датчик D65 (база – 65 мм) з глибиною намагнічування до 30

мм, малобазний датчик D27 (база – 27 мм) з глибиною намагнічування до 4 мм і датчик зі зменшеною базою D12 (база – 12 мм) з глибиною намагнічування до 1 мм. Останній був розроблений і виготовлений за рекомендацією авторів, де базою вимірювання вважали відстань між зовнішніми краями наконечників полюсів магнітів.

Визначення значень коерцитивної сили на поверхні виробу або лабораторного зразка полягає у намагніченні металу до насичення, його розмагнічуванні з послідовним намагнічуванням магнітним полем протилежної полярності для нейтралізації залишкового магнетизму та вимірювання значень H_c . Тривалість циклу визначення значень коерцитивної сили складає 10 с. При цьому зміна напрямку орієнтації наконечників полюсів магнітів датчика відносно досліджуваної поверхні впливає на величину коерцитивної сили. Слід нагадати, що при односторонньому намагнічуванні датчиком розподіл магнітного потоку по товщині металу не рівномірний і локальність вимірювання коерцитивної сили обмежена габаритами (базою вимірювання) датчика.

Вимірювання об'єму феромагнітної фази (α -Fe) в аустенітній сталі проводили ферітометром «Ferritghaltmesser 1.053 Forster».

Результати експериментальних досліджень.

На рис. 2 показана кінетика значень коерцитивної сили по числу циклів навантаження з амплітудою знакозмінної деформації $\epsilon_a = \pm 0,4$ % («жорстке» навантаження) в залежності від бази вимірювання датчиків. З отриманих даних слідує, що зі зменшенням бази вимірювання (збільшенням локальності вимірювань) значення коерцитивної сили збільшуються. Таким чином, використання структуроскопу не глибокого намагнічування зі зменшеною базою датчика D12 дозволяє отримувати більш високі значення коерцитивної сили і більш точно та детально (у різних напрямках відносно напрямку навантаження) дослідити її кінетику в поверхневих більш локальних зонах металу при механічному навантаженні.

На рис. 3 приведена кінетики коерцитивної сили, яку вимірювали за допомогою датчика D12 в зоні руйнування, по числу циклів навантаження з амплітудою деформації $\epsilon_a = \pm 0,5$ % в залежності від орієнтації наконечників полюсів магнітів датчика відносно напрямку навантаження (напрямок вимірювання уздовж або поперек зовнішньої поверхні зразка з 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 пружнопластичному деформуванню (стадії зародження тріщин), а зниження значень H_c – стадії розвитку тріщин, пов'язаної зі зниженням магнітних властивостей

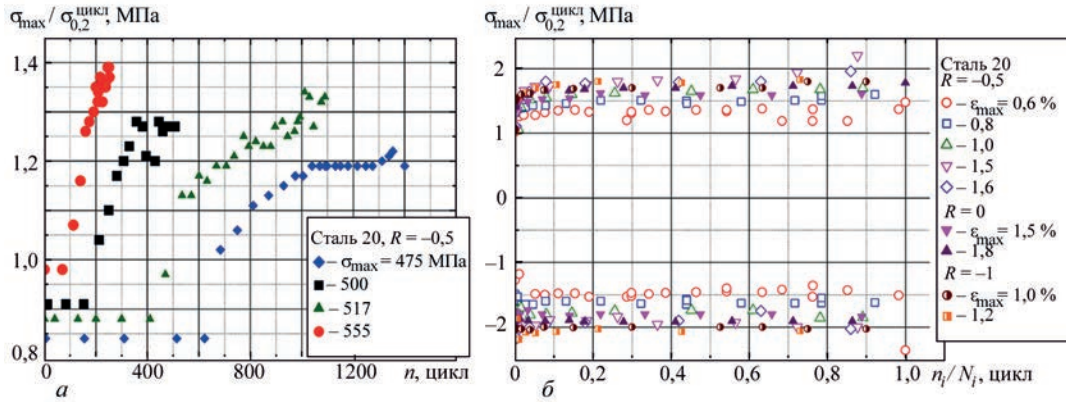


Рис. 1. Відмінності характеру відносної навантаженості металу зразків із сталі 20 при «м'якому» (а) та «жорсткому» (б) циклічному навантаженні

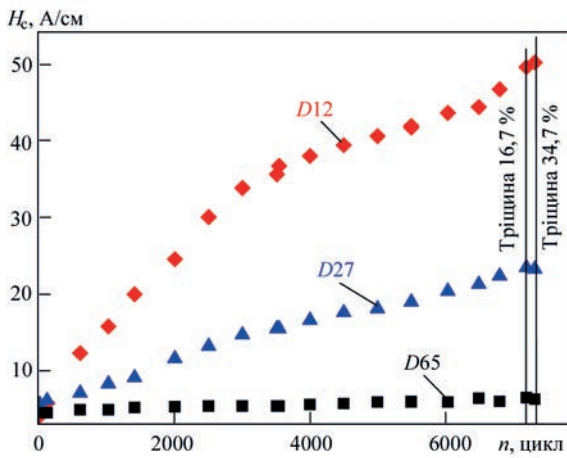


Рис. 2. Кінетика значень коерцитивної сили H_c по числу циклів напрацювання з амплітудою знакозмінної деформації $\epsilon_a = \pm 0,4\%$ в залежності від бази вимірювання датчиків

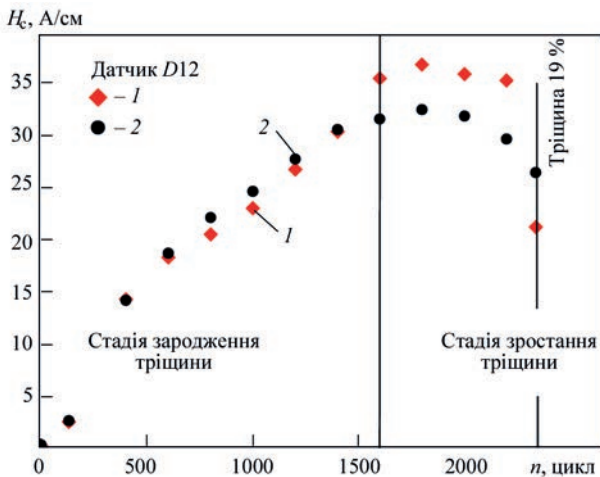


Рис. 3. Кінетика коерцитивної сили H_c в зоні руйнування, по числу циклів навантаження з амплітудою деформації $\epsilon_a = \pm 0,5\%$ в залежності від орієнтації полюсів наконечників магнітів датчика уздовж (1) або поперек (2) зовнішньої поверхні зразка з труби металу при втраті його суцільності. Перелом 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. 4). При цьому крім магні-

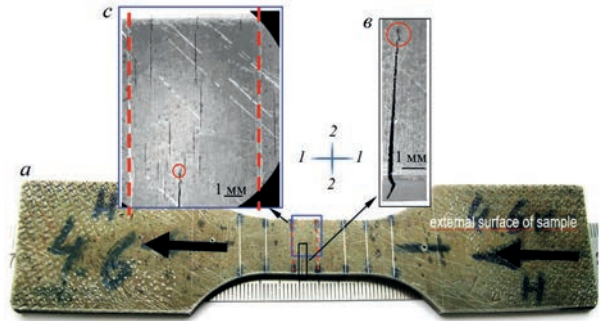


Рис. 4. Макрознімки зразка (а) після циклічного напрацювання до появи магістральної тріщини площею 19 % номінального поперечного перерізу; де b, c – фрагменти ділянки з тріщинами на зовнішній поверхні зразка; напрямки орієнтації полюсів наконечників магнітів уздовж (1-1) та поперек (2-2) осі зразка

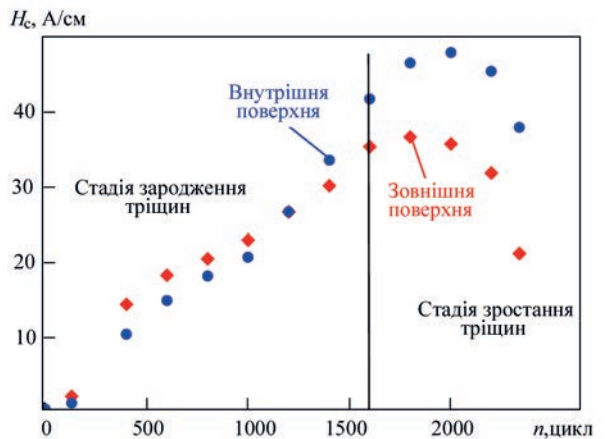


Рис. 5. Кінетика коерцитивної сили на зовнішній і внутрішній поверхнях зразка із труби в зоні руйнування при положенні полюсів наконечників магнітів датчика уздовж робочої довжини зразка при циклічному деформуванні з амплітудою деформації $\epsilon_a = \pm 0,5\%$

стральної чвертьеліптичної крайової тріщини (b) в зоні руйнування на зовнішній поверхні зразка виявлено кілька дрібних (близько 1 мм) не наскрізних тріщин (c), характерні тільки для зовнішньої поверхні зразка (1, відповідно, труби) і відсутні на внутрішній поверхні.

Такий характер руйнування пов'язаний з відмінністю технологічних залишкових напружень

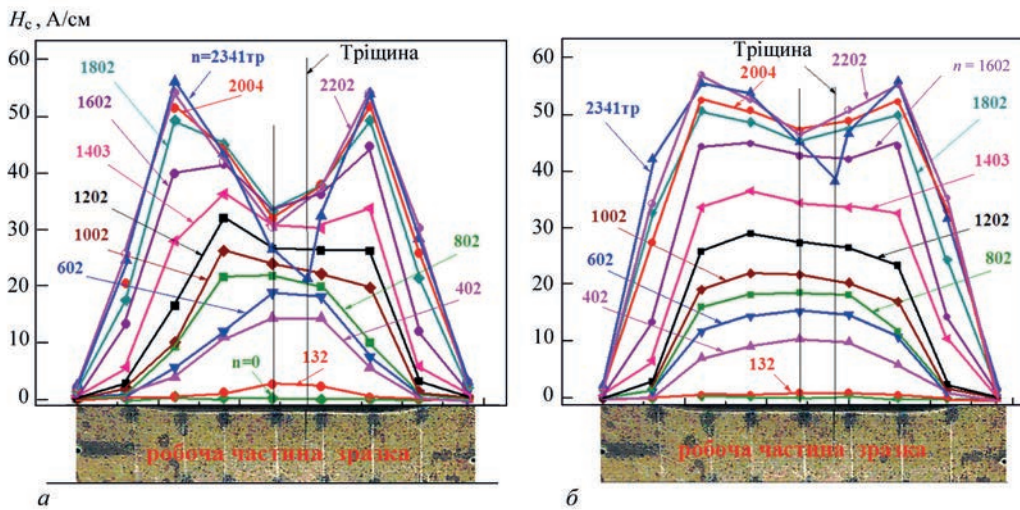


Рис. 6. Розподіл значень коерцитивної сили H_c по зовнішній (а) та внутрішній (б) поверхні робочої довжини зразка з труби при малоциклового «жорсткому» навантаженні при орієнтації полюсів наконечників магнітів датчика вздовж зразка розтягу та стиску у зовнішніх та внутрішніх шарах труби з повздовжнім зварним швом, виготовленої із листового металу. Дана обставина впливає на характер кінетики коерцитивної сили на зовнішній та внутрішній сторонах зразка із труби при циклічному навантаженні (рис. 5). Поя-

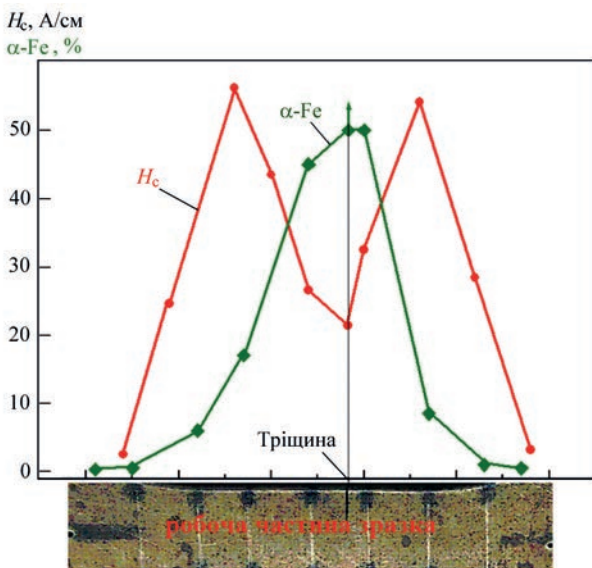


Рис. 7. Розподіл об'єму феромагнітної фази (α -Fe) і коерцитивної сили H_c по робочій довжині зразка після малоциклового «жорсткого» навантаження до руйнування з амплітудою пружнопластичної деформації $\epsilon_a = \pm 0,5\%$

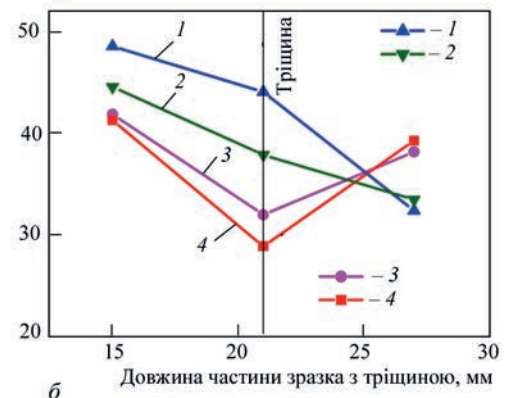
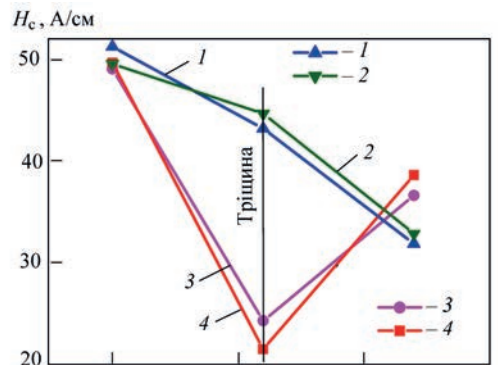


Рис. 8. Значення коерцитивної сили H_c на зовнішній (а) і внутрішній (б) поверхнях зразка при орієнтації наконечників полюсів магнітів датчика вздовж (3, 4) та поперек (1, 2) робочої частини зразка (при $n = 7204$, тріщина 16,7% (1, 3) і $n = 7328$, тріщина 33,4% (2, 4))

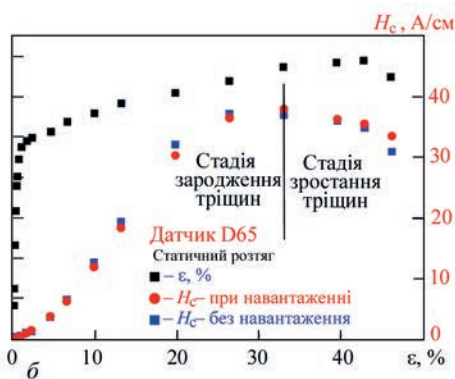
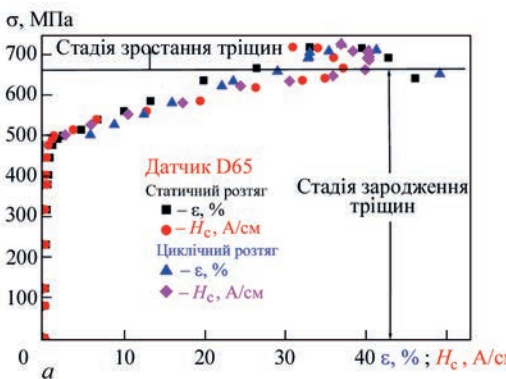


Рис. 9. Діаграми статичного та циклічного розтягу (а) та залежність коерцитивної сили H_c вимірювано датчиком D65, від деформацій ϵ (б) при розтязі з розвантаженням, у навантаженому та розвантаженому стані

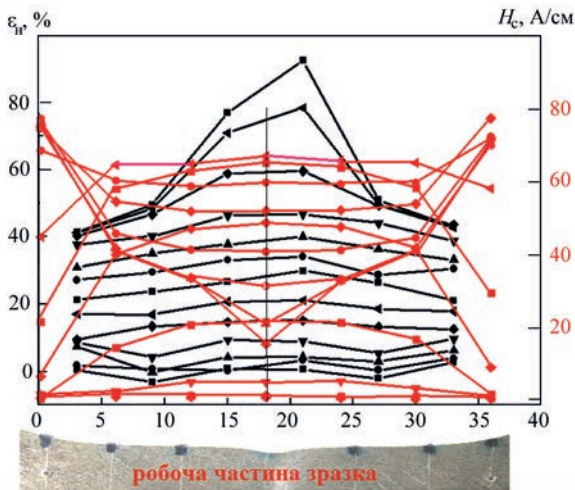


Рис. 10. Розподіл деформацій ϵ_n (чорні лінії) і коерцитивної сили H_c (червоні лінії), виміряної за допомогою датчика D12 у повздожньому напрямку, по довжині робочої частини зразка при розтязі

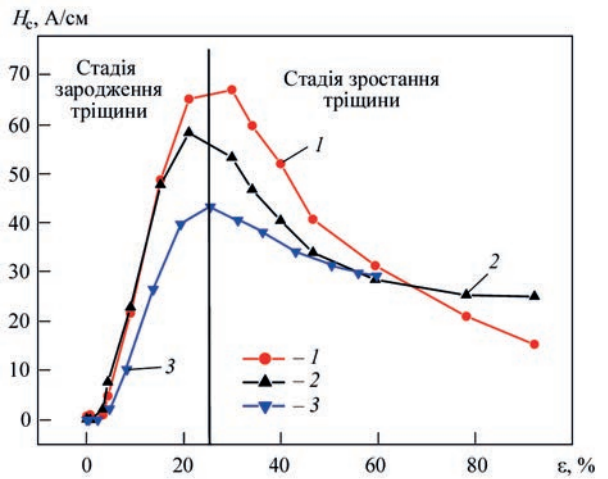


Рис. 11. Залежність значень коерцитивної сили, виміряної за допомогою датчиків D12 і D27, від накопичених деформацій зразка при розтягуванні при орієнтації наконечників полюсів магнітів датчика вздовж (1 – D12) і поперек (1 – D12; 3 – D27) зовнішньої поверхні робочої частини зразка із труби

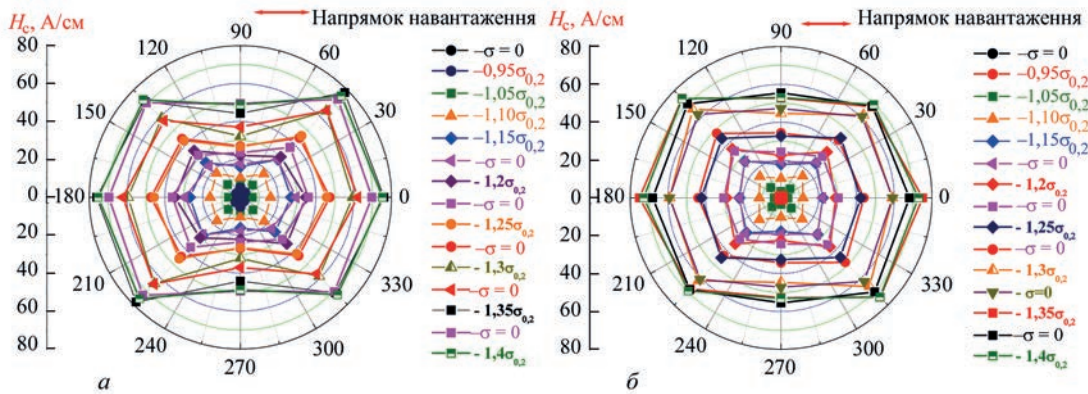


Рис. 12. Епюри розподілу значень коерцитивної сили по поверхні лабораторного зразка з концентратором напружень від не-наскрізного отвору діаметром 3,5 мм – сторона I (а) та з протилежної сторони навпроти ненаскрізного отвору – сторона II (б)

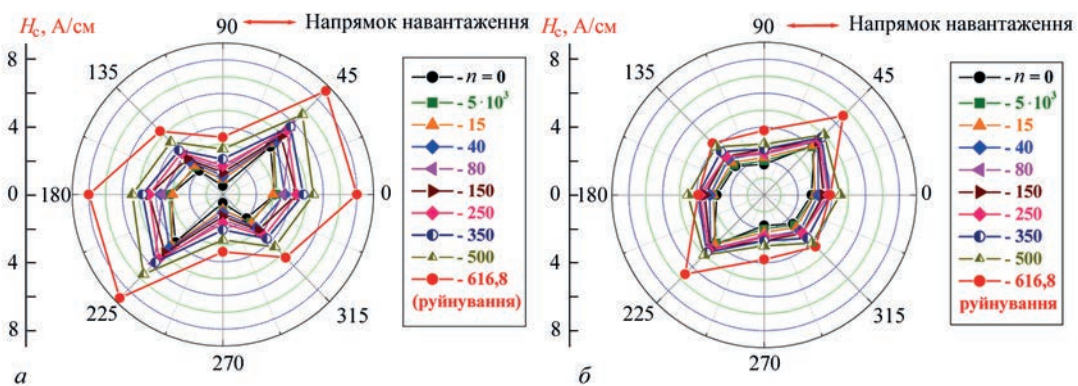


Рис. 13. Епюри розподілу значень коерцитивної сили по поверхні зразка з концентратором напружень в зоні отвору (а) та на (протилежній отвору (б) стороні зразка) при різному числі циклів напруцювання ва тріщин втоми на зовнішній поверхні зразка із труби обумовлює більш інтенсивне зниження магнітних властивостей металу і, відповідно, зниження значень коерцитивної сили, враховуючи нерівномірність розподілу по товщині металу магнітного поля при намагніченні на фоні пружнопластичного деформування об'єму металу, у тому числі між тріщинами. В той самий час на внутрішній поверхні зразка із труби, де тріщини втоми відсутні, теж відбувається пружнопластичне деформування, яке обумовлює інтенсивне зростання значень коерцитивної сили, але наявність тріщин втоми на зовнішній поверхні зразка обумовлює зміну напрямку її кінетики. Дана

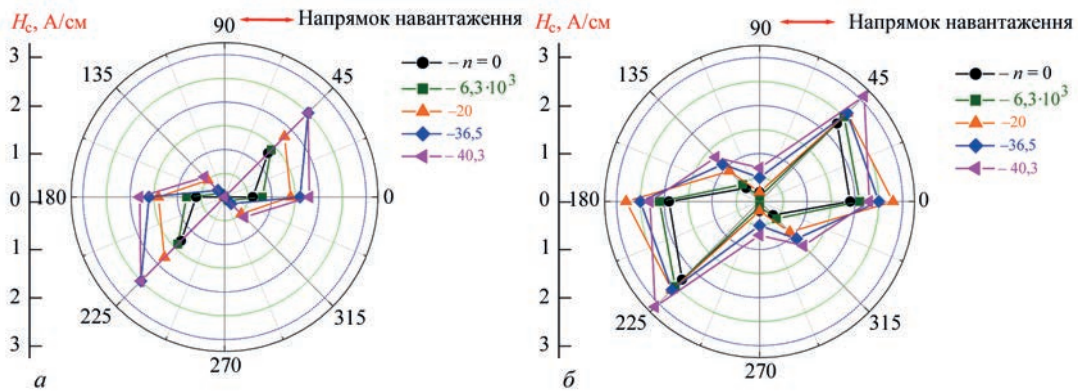


Рис. 14. Епюри розподілу значень коерцитивної сили по зовнішній (а) та внутрішній (б) поверхнях зразка з концентратором напружень у вигляді зварного шва при різному числі циклів напруцювання

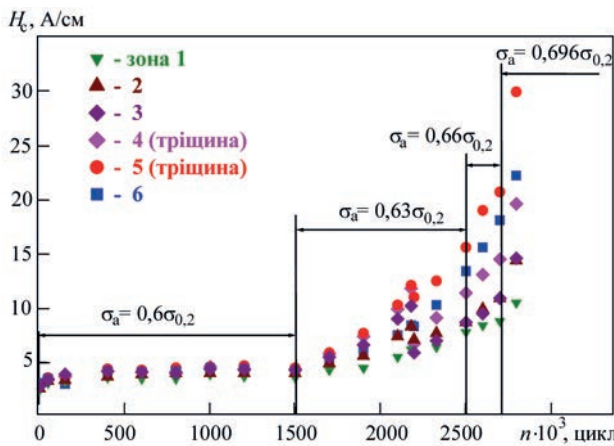


Рис. 15. Залежність коерцитивної сили від амплітуди напружень у різних по довжині робочої частини зразка зонах

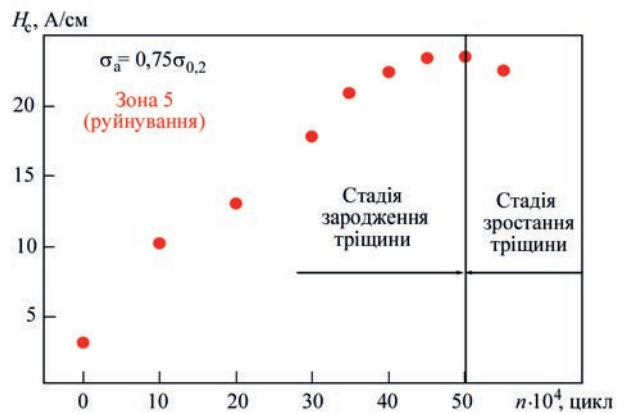


Рис. 16. Кінетика зміни коерцитивної сили H_c від числа циклів n навантаження при частоті 80 Гц у зоні руйнування робочої частини лабораторного зразка при амплітуді напружень $\sigma_a = 0,75\sigma_{0,2}$

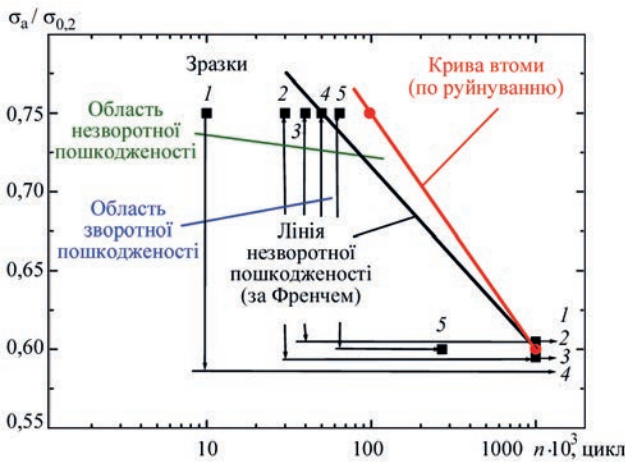


Рис. 17. Схема побудови кривої незворотної пошкоджуваності (за Френчем): зразок 1 – напруцювання $n = 1 \cdot 10^4$ циклів, $H_c = 10,3$ А/см; 2 – $n = 3 \cdot 10^4$ циклів, $H_c = 17,8$ А/см; 3 – $n = 4 \cdot 10^4$ циклів, $H_c = 22,4$ А/см; 4 – $n = 5 \cdot 10^4$ циклів, $H_c = 23,5$ А/см; 5 – $n =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

зміна напрямку кінетики коерцитивної сили при циклічному навантаженні пов'язана з чутливістю датчика до наявності підповерхневих тріщин і свідчить про можливість їх виявлення структуроскопом з малогабаритним датчиком неглибокого намагнічування. Ця обставина свідчить про можливість моніторингу процесів накопичення пошкоджень як на поверхні виробу, так і у підпо-

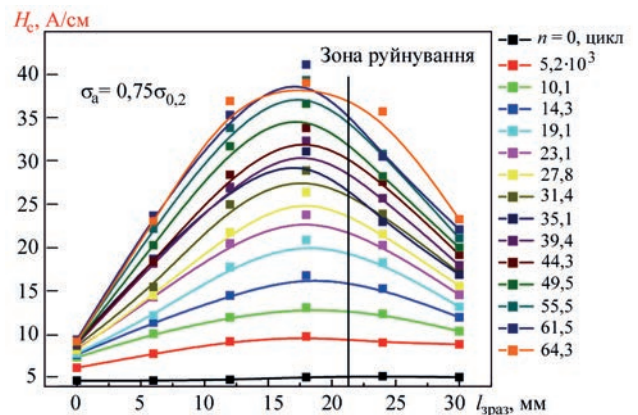


Рис. 18. Розподіл значень коерцитивної сили по довжині робочої частини гладкого зразка

верхневих шарах металу (над дефектом) в період експлуатації, наприклад, з внутрішньої поверхні, до якої не має доступу.

Використання структуроскопу з малогабаритним датчиком не глибокого намагнічування D12 з базою вимірювання 12×12 м дозволило проводити сканування з кроком 6 м (половина габариту датчика) поверхні робочої частини зразка із труби при орієнтуванні у двох взаємно перпендикулярних напрямках наконечників полюсів магнітів датчика відносно напрямку навантаження і побудувати розподіл значень коерцитивної сили по

зовнішній і внутрішній поверхнях при випробуваннях. На рис. 6 наведено розподіл значень коерцитивної сили H_c по зовнішній та внутрішній поверхні робочої довжини зразка із труби при малоцикловогому «жорсткому» навантаженні з амплітудою пружнопластичної деформації $\varepsilon_a = \pm 0,5\%$ при орієнтації полюсів наконечників магнітів датчика вздовж зразка. Зниження значень коерцитивної сили в зоні руйнування на внутрішній поверхні зразка при відсутності видимих тріщин вказує на можливість використання коерцитиметричного контролю для виявлення підповерхневих тріщин.

Слід зазначити, що зниження значень коерцитивної сили на ділянці зони руйнування пов'язано з втратою суцільності матеріалу (появі та розвитку тріщин втоми). При цьому втрата суцільності металу не впливає на зростання долі феромагнітної фази (α -Fe) внаслідок безперервного пружнопластичного деформування металу, у тому числі між тріщинами (рис. 7). Але втрата суцільності металу (поява тріщин) викликає більш інтенсивне зниження значень коерцитивної сили, ніж пружнопластичне деформування, яке сприяє підвищенню об'єму феромагнітної фази (α -Fe) навіть з дефектами, що виникли (тріщинами) та повинна підвищувати значення H_c . При цьому зміни структури металу, оціненої об'ємом феромагнітної фази (α -Fe), навіть після виникнення та розвитку тріщин, не впливають на зростання їх значень і не відображають процесів накопичення пошкоджень.

При механічному навантаженні експериментально була встановлена залежність значень коерцитивної сили від орієнтації полюсів наконечників магнітів датчика відносно напрямку навантаження, що дозволяє для реальних конструкцій визначити напрямок головних напружень і виявляти появу поверхневих та підповерхневих тріщин втоми. На рис. 8 наведені дані значень коерцитивної сили в зоні тріщини та на прилеглих ділянках після циклічного напрацювання (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 % номінальної).

Вимірювання значень коерцитивної сили проводили при розташуванні тріщини втоми по середині між полюсами наконечників полюсів магнітів датчика та на віддаленні середини датчика на 6 мм в обох напрямках від тріщини (на прилеглих до тріщини ділянках) із зовнішньої і внутрішньої поверхонь зразка при орієнтуванні наконечників полюсів магнітів датчика вздовж і поперек його робочої частини. 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 із труби, де тріщини втоми відсутні, також має місце зниження значень коерцитивної сили (рис. 8, б). Це підтверджує можливість виявлення підповерхневих тріщин за допомогою малогабаритного датчика D12.

При циклічному «жорсткому» навантаженні, коли в процесі знакозмінного пружно-пластичного деформування, яке обумовлює процеси накопичення пошкоджень від втоми, в металі відбуваються описані вище структурні перетворення, які викликають зміни значень коерцитивної сили. Аналогічні закономірності структурних перетворень, які обумовлюють зміни значень коерцитивної сили, відбуваються також в умовах одновісного статичного та циклічного розтягу, коли накопичення деформацій від розтягу та циклічної повзучості, обумовлюють квазістатичне руйнування.

На рис. 9 приведена діаграми статичного та циклічного розтягу і зміни значень коерцитивної сили, виміряною датчиком D65, при розтязі та залежність коерцитивної сили H_c від деформацій ε при ступінчатому розтязі з розвантаженням, у навантаженому та розвантаженому стані. Важливо відзначити, що на початковій стадії розтягу, включаючи пружно-пластичну область, зміни значень коерцитивної сили відбуваються у відповідності з діаграмою розтягу. При подальшому пластичному деформуванні має місце деяке відставання темпу зростання значень коерцитивної сили по відношенню до прикладених напружень. Після досягнення значень накопичених деформацій приблизно 35...40 % відбувається різке зниження значень коерцитивної сили.

Закономірності різкого зниження значень коерцитивної сили після досягнення екстремуму при розтязі аналогічні «жорсткому» навантаженню, ймовірно, пов'язані з втратою суцільності металу шляхом утворення і зростання кількості і розміру пор. За літературними даними [18] однією з причин такої поведінки коерцитивної сили може бути зниження залишкових стискаючих напружень через зменшення щільності металу, викликаного накопиченням ушкоджень кристалів, утворенням пор і несцільностей при пластичному деформуванні розтягом.

Слід відмітити, що значення коерцитивної сили при ступінчатому розтязі з розвантаженням у навантаженому та розвантаженому стані, практично, збігаються. Таким чином, по величині коерцитивної сили на висхідних або низхідних ділянках кривих можна оцінювати залишкову міцність металу на різних стадіях пошкодження незалежно від наявності навантаження.

На рис. 10 приведено розподіл накопичених деформацій ϵ_n і коерцитивної сили H_c по робочій довжині зразка з труби при статичному розтязі при ступінчастому підвищенні деформації розтягу на 5 %. При розтязі до рівня номінальної деформації близько 25 % у найбільш деформованій зоні зразка відбувається зростання коерцитивної сили до 67,0 А/см, а при подальшому навантаженні має місце зниження значень H_c до 15,3 А/см, ймовірно пов'язане з поступовою втратою суцільності металу в зоні руйнування.

На рис. 11 показана залежність значень коерцитивної сили, виміряної за допомогою датчиків D12 і D27 від накопичених деформацій (ϵ) у найбільш деформованій локальній зоні (руйнування) зразка при розтязі при орієнтації наконечників полюсів магнітів датчика вздовж і поперек зовнішньої поверхні робочої частини зразка із труби. При орієнтуванні наконечників полюсів магнітів датчика D12 у поздовжньому напрямку робочої частини зразка максимальні значення коерцитивної сили на 13 % перевищують аналогічні значення при орієнтуванні наконечників полюсів магнітів у його поперечному напрямку. Наявність висхідних та низхідних ділянок на графіках може свідчити про стадійність і зміну переважаючих механізмів накопичення пошкоджень у металі при розтязі. Висхідній ділянці кривої відповідає пружнопластичне деформування (стадія зародження тріщин), а низхідній – утворення і розвитку пор і тріщин (стадія розвитку тріщин).

Використання для досліджень структуроскопу з датчиком зі зменшеною базою вимірювання D12, завдяки можливості змінювати орієнтацію датчика відносно напрямку навантаження, дозволило побудувати епюри розподілу значень коерцитивної сили по поверхні локальних зон лабораторних зразків при механічному навантаженні.

На рис. 12 приведені епюри розподілу значень коерцитивної сили по поверхні лабораторних зразків у зоні ненаскрізного («глухого» на половину товщини зразка) отвору діаметром 3,05 мм (сторона I) та з протилежної сторони (сторона II, напроти отвору) при ступінчастому навантаженні на циклічний розтяг з розвантаженням. Як слідує з отриманих результатів значення коерцитивної сили в зоні концентратора напружень («глухого» отвору) та з протилежної сторони (напроти отвору), практично, співпадають незважаючи на відсутність металу у порожнині отвору.

Для виявлення відмінностей у реагуванні коерцитивної сили на багатоциклове навантаження, у порівнянні з малоцикловим, проведено відповідні випробування. На рис. 13 приведені епюри розподілу значень коерцитивної сили по поверхні зразка з концентратором напружень у вигляді не наскрізного («глухого») отвору діаметром 1,35 мм (глиби-

ною 1,8 мм, що відповідає половині товщини зразка) в зоні отвору та на протилежній «глухому» отвору стороні зразка при випробуваннях на багатоциклову втому при частоті навантаження 80 Гц при різному числі циклів напруження. Слід звернути увагу на суттєві відмінності максимальних значень коерцитивної сили та характер епюр розподілу значень H_c по поверхні зразків в зоні концентраторів та на протилежних концентраторах сторонам зразків.

Проведені випробування на багатоциклову втому лабораторних зразків з концентраторами напружень показали, що при навантаженні при номінальних напруженнях рівних межі витривалості в дуже малих об'ємах металу в зоні концентраторів відбувається пружнопластичне деформування металу, яке приводить до істотних змін структури металу і, відповідно, значень коерцитивної сили, на фоні пружного деформування достатньо великого об'єму решти металу, який визначається габаритами датчика. У цьому достатньо великому об'ємі решти металу не відбуваються істотні зміни структури і, відповідно, мають місце невеликі максимальні значення коерцитивної сили. Чутливість приладу до зміни значень коерцитивної сили в зонах концентрації напружень при навантаженні визначається співвідношенням пружно та пластично деформованого об'ємів металу у зоні вимірювання.

Із приведених даних слідує, що значення коерцитивної сили у зоні концентратора напружень приблизно на 25 % перевищують аналогічні значення з протилежної сторони зразка. Дані відмінності у значеннях коерцитивної сили у зоні концентратора напружень та з протилежної сторони зразка (напроти отвору), ймовірно, пов'язані з більш високими значеннями напружень (деформацій) у зоні концентратора напружень та їх розподілом по перерізу зразка і їх впливом на значення H_c .

Для прикладу, на рис. 14 приведені епюри розподілу значень коерцитивної сили по зовнішній та внутрішній поверхнях зразка з концентратором напружень у вигляді поперечного зварного шва при випробуваннях на багатоциклову втому при різному числі циклів напруження. Відмінності характеру епюр та максимальних значень коерцитивної сили по зовнішній та внутрішній поверхнях, ймовірно, пов'язані з відмінностями геометричних параметрів зварного шва що, в свою чергу, впливає на ступінь концентрації напружень та розподіл напружень по перерізу зразка, та дії залишкових технологічних напружень від виготовлення труби із листового металу.

Неспівпадіння напрямку максимальних значень коерцитивної сили з напрямком навантаження пов'язане, ймовірно, з впливом залишкових напружень (деформацій) від калібрування з «прокруткою» труби, з якої були виготовлені лабораторні зразки, оскільки циклічне навантаження здійсню-

вали при напруженнях, рівних межі витривалості металу, коли не відбуваються істотні зміни структури, які не були зафіксовані структуроскопом.

Для визначення реагування коерцитивної сили на багатоциклове навантаження лабораторних зразків з розмірами робочої частини $28 \times 14 \times 5$ мм без концентраторів напружень, при напруженнях менших межі плинності, були проведені випробування на осьовий знакозмінний розтяг-стиск з частотою 80 Гц та асиметрією циклу напружень $R_\sigma = -1$.

На рис. 15 приведена залежність коерцитивної сили від амплітуди напружень у різних зонах (зони 1–6) по довжині робочої частини зразка. При циклічному навантаженні з амплітудою напружень $\sigma_a = 0,6\sigma_{0,2}$ у діапазоні $0 \dots 1,5 \cdot 10^6$ числа циклів значення коерцитивної сили H_c , 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 80 Гц являється початок розігрівання зразка. При циклічному навантаженні за швидкістю зростання коерцитивної сили можна визначати значення обмежених меж витривалості на різних базах довговічності. Нульовим значенням швидкості зростання коерцитивної сили відповідають значення межі витривалості при багатоцикловій втомі. Таким чином отримані результати випробувань на багатоциклову втому дозволили розробити фізично обґрунтований метод встановлення межі витривалості для нестабільних аустенітних сталей, який базується на визначенні швидкості зростання значень коерцитивної сили на коротких базах випробувань ($n = 1 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^5$ числа циклів, що відповідає 20...40 хв циклічного навантаження при частоті 80 Гц).

Отримані результати випробувань лабораторних зразків на багатоциклову втому дозволили по зміні напрямку кривої коерцитивної сили розробити дуже простий метод побудови кривої незворотної пошкоджуваності (за Френчем). Де межею зворотної та незворотної пошкоджуваності прийнято вважати екстремум (максимальні значення) на кривій зміни коерцитивної сили при певному числі циклів механічного навантаження (рис. 16). Аналогічні результати були отримані для цієї ж аустенітної сталі для діапазону малоциклової втоми (див. рис. 3, 5) де було встановлено, що зміна тенденції коерцитивної сили до росту чи падіння значень H_c пов'язана із зміною характеру накопичених пошкоджень [4–6].

На рис. 17 приведені результати перевірки схеми побудови кривої незворотної пошкоджуваності, які базуються на даних аналізу кінетики коерцитивної сили (рис. 16) при механічному навантаженні у діапазоні багатоциклової втоми. Для перевірки схеми побудови кривої незворотної пошкоджуваності було проведено попереднє циклічне напрацювання п'яти зразків з амплітудою напружень $0,75\sigma_{0,2}$ до числа циклів $n = 1 \cdot 10^4, 3 \cdot 10^4, 4 \cdot 10^4, 5 \cdot 10^4$ та $5,5 \cdot 10^4$ з наступним навантаженням з меншою амплітудою напружень $0,6\sigma_{0,2}$ до $n = 1 \cdot 10^6$ 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, що базується на визначенні екстремуму (максимуму) на кінетичній кривій коерцитивної сили при циклічному напрацюванні, після досягнення якого відбувається падіння значень H_c внаслідок накопичення незворотних пошкоджень. Використання розробленого методу побудови кривої незворотної пошкоджуваності (за Френчем) дозволяє для нестабільних аустенітних сталей при оцінці залишкового ресурсу металу конструкції істотно знизити ризики руйнування.

Як, приклад, приведені нижче результати практичного застосування коерцитиметричного контролю для дослідження ймовірних причин руйнування за межами робочої частини гладких лабораторних зразків постійного поперечного перерізу при випробуваннях на багатоциклову втому. Досвід випробувань на багатоциклову втому при високих частотах навантаження показав, що незважаючи на те, що при виготовленні гладких лабораторних зразків площа поперечного перерізу середньої робочої частини зразка була свідомо занижена на близько 1 % відносно її периферійних зон, руйнування, у більшості випадків, відбувається по галтелі радіусу переходу від робочої частини до ділянки закріплення у активному захваті випробувальної машини. При цьому руйнування лабораторних зразків відбувалось по галтелі зразка при дії амплітуди напружень $\sigma_a^f = 0,81\sigma_a^n$ від номінальних значень (σ_a^n) з мінімальною площею поперечного перерізу по середині робочої частини зразка. Початок руйнування зразка супроводжувався різким зниженням частоти навантаження в наслідок підростання тріщини.

На рис. 18 приведені дані розподілу значень коерцитивної сили по довжині гладкого зразка з розмірами робочої частини $28 \times 14 \times 5$ мм при випробуваннях на багатоциклову втому з частотою навантаження 80 Гц. Хоча руйнування зразка у даному випадку відбувалось в межах його робочої частини, отримані дані показали суттєві відмінності максимальних значень коерцитивної сили

на краях робочої частини із сторони активного та пасивного захватів. На краю робочої частини зразка, ближчій до активного захвату випробувальної машини (на рис. 18, справа), значення коерцитивної сили приблизно у 3 рази перевищують аналогічні величини з іншого краю робочої частини біля пасивного захвату (на рис. 18, зліва). Так як зміна значень коерцитивної сили при навантаженні обумовлена зміною структурного стану металу, і, відповідно, викликає нерівномірність розподілу значень коерцитивної сили по робочій довжині гладкого зразка то, ймовірно, причина руйнування зразків біля активного захвату пов'язана з нерівномірністю розподілу навантаженості та пошкодженості металу по його робочій довжині. Тобто, навантаженість і, відповідно, пошкодженість металу на краях робочої частини, оціненою значеннями коерцитивної сили, біля активного захвату більша ніж біля пасивного захвату, що, ймовірно, пов'язано з запізненням деформацій відносно силового навантаження при високих швидкостях (частоті). У зв'язку з цим, на практиці для випробувань на багатоциклово втому частіше дають перевагу «корсетним» зразкам непостійного попережного перерізу (типу пісочних годинників).

Висновки

Проведено експериментальне обґрунтування можливості оцінки ступеня пошкодження в процесі експлуатації металу конструкцій, у тому числі у зонах концентрації напружень, простим неруйнівним методом за результатами вимірювання значень коерцитивної сили.

При механічному навантаженні відбувається перерозподіл співвідношень феромагнітних та парамагнітних фаз металу, який обумовлює зростання значень коерцитивної сили до певної величини і після втрати суцільності металу при руйнуванні викликає зниження цих значень. Дана обставина дозволила встановити стадії зародження та розвитку тріщин і при експлуатації виробу оцінювати ступінь пошкодження (різного походження) металу конструкції на кожній із стадій простим неруйнівним інструментальним методом одним і тим же приладом.

Встановлення стадійності накопичення пошкоджень по зміні напрямку кінетичних кривих коерцитивної сили після певного числа циклів напруження дозволяє побудувати криву незворотної пошкоджуваності (за Френчем) дуже простим інструментальним методом і проводити оцінку циклічної довговічності не по кривій втому (руйнуванню) металу, як прийнято в інженерній практиці, а на стадії зародження тріщин, що істотно знижує ризики руйнування.

При моніторингу технічного стану елементів конструкцій шляхом виміру значень коерцитивної

сили надається можливість визначати найбільш деформовані та пошкоджені зони, зі встановленням напрямку головних напружень, і виявляти не суцільності металу у вигляді пор або тріщин (у тому числі поверхневих та підповерхневих).

Встановлені обмеження у можливості оцінки ступеня пошкодження аустенітних сталей при багатоциклової втомі, у тому числі зонах концентрації напружень, за вимірами коерцитивної сили. Дані обмеження обумовлені чутливістю приладу, яка залежить від габаритів датчика для вимірювання коерцитивної сили, до співвідношення об'ємів пружно деформованого (до межі витривалості) та пружнопластично деформованого металу у зоні руйнування (вимірювання).

Запропоновано фізично обґрунтований метод встановлення границі витривалості для аустенітної нестабільної сталі, який базується на визначенні швидкості зростання коерцитивної сили на коротких базах циклічного навантаження. За швидкістю зростання коерцитивної сили можна встановлювати значення обмеженої границі витривалості на різних базах довговічності.

В умовах експлуатації, при моніторингу 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.

Таким чином, отримані експериментальні результати дають оптимістичний прогноз можливості оцінки накопичення втомних пошкоджень на різних стадіях втомі в локальних найбільш пошкоджених зонах конструктивних елементів простим неруйнівним інструментальним методом. Дана обставина має всі ознаки новизни і може знайти широке застосування як для дослідницьких цілей, так і для практичного використання при діагностуванні пошкоджуваності елементів конструкцій.

Метод діагностування технічного стану виробів полягає у проведенні попередніх розрахунків НДС для встановлення найбільш навантажених локальних зон металу конструкції та послідуєчого вимірювання значень коерцитивної сили на поверх-

ні 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 чотирьох 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.

Отримані результати можуть стати основою для розробки нових підходів щодо експресної оцінки залишкового ресурсу металу конструкцій простим неруйнівним методом.

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

Список літератури

- Христенко І.Н., Кривова В.В. (1984) Влияние пластической деформации на коэрцитивную силу малоуглеродистой стали. *Дефектоскопия*, **6**, 90–98.
- 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.
- 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.
- Гопкало А.П., Безлюдько Г.Я., Нехотящий В.А. (2017) К экспертной оценке поврежденности стали AISI 304 при статическом и циклическом нагружении по измерениям коэрцитивной силы. *В мире неразрушающего контроля*, **20**, 45–51.
- Гопкало О., Безлюдько Г., Нехотящий В. (2017) Оцінка пошкодженнь металу конструкцій при статичному та циклічному деформуванні по кінетиці коерцитивної сили. *Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування. Праці конференції. 19–22 вересня 2017 р. Тернопіль*, сс.73–78.
- Gopkalo O., Bezlyudko G., Nekhotiashchiy V. (2018) Evaluation of the structures metal damage under the static and cyclic loadings according to the coersive force value. *Scientific Journal of TNTU*. Ternopil. TNTU, **89**, **1**, 19–32. (Mechanics and materials science).
- Bezlyudko G.Ya., Popov B.E., Solomaha R.N. (2015) Primenenie metoda koercitivnoi sily segodnya. *V mire nerazruwayutishego kontrolya*. Sankt Peterburg, **18**, **4**, 4–8. [in Russian].
- Nehotyatshii V.A., Palienko A.L., Gopkalo A.P. (2015) Osenka degradacii stali 08H18N9 po kinetike koercitivnoi sily. *Ibid.*, 14–16. [in Russian].
- Стрижало В.А. (1978) *Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур*. Киев, Наукова думка.
- Трошенко В.Т., Стрижало В.А., Синявский Д.П., Иващенко В.В. (1982) О влиянии коэффициента асимметрии цикла напряжений на развитие усталостного и квазиста-

тического разрушения при малоцикловом нагружении. *Проблемы прочности*, **8**, 14–21.

- Иванова В.С., Терентьев В.Ф. (1975) *Природа усталости металлов*. Москва, Металлургия.
- Миллер К.Ж. (1994) Усталость металлов – прошлое, настоящее и будущее. *Заводская лаборатория*, **3**, 544–561.
- Новиков И.И., Ермишкин В.А. (1995) Об анализе деформационных кривых металлов. *Металлы*, **6**, 142–154.
- Терентьев В.Ф., Оксогоев А.А. (2001) *Циклическая прочность металлических материалов*. Учеб. пособие. Новосибирск, Изд-во НГТУ.
- Pangborn R.N., Weissmann S., Kramer J.R. (1978) Work hardening in the surface layer and in bulk during fatigue. *Ser. Met.*, **12**, **2**, 129–131.
- Sato Y., Sasaki H., Kumana A. (1980) Surface layer yielding of low-carbon steel cylinders. *J. Mater. Sci. Soc. Jap.*, **17**, **3–4**, 185–192.
- Miyazaki S., Shibata K., Fujita H. (1979) Effect of specimen thickness on Mechanical Properties of Polycrystalline Aggregates with Various grain sizes. *Acta met.*, **27**, **5**, 855–863.
- Гуляев А.П. (1951) *Металловедение*. Москва.

References

- Khristenko, I.N., Krivova, V.V. (1984) Effect of plastic deformation on coercive force of low-carbon steel. *Defektoskopiya*, **6**, 90–98 [in Russian].
- Gorkunov, E.S., Fedorov, V.P., Bukhvalov, A.B., Veselov, I.N. (1997) Modeling of deformation curve based on measurement of its magnetic characteristics. *Ibid.*, **4**, 87–95 [in Russian].
- Popov, V.A., Gudoshnik, V.A. (2012) Myths and reality of application of magnetic structuroscopy at evaluation of the stress-strain state in metal structures of lifting facilities. Lifting facilities. Podjomnye Sooruzheniya. *Spetsialnaya Tekhnika*, **12**, 20–21 [in Russian].
- Gopkalo, A.P., Bezlyudko, G.Ya., Nekhotiashchiy, V.A. (2017) To expert evaluation of damage of AISI 304 steel under static and cyclic loading by coercive force measurements. *V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya*, **20**, 45–51 [in Russian].
- Gopkalo, O., Bezlyudko, G., Nekhotiashchiy, V. (2017) Assessment of structure metal damage at static and cyclic deformation by the kinetics of coercive force. *Damage of materials during operation, methods for its diagnosis and forecasting. In: Proc. of Conference (19-22 September 2017, Ternopil)*, pp. 73-78 [in Ukrainian].
- Gopkalo, O., Bezlyudko, G., Nekhotiashchiy, V. (2018) Evaluation of the structures metal damage under the static and cyclic loadings according to the coercive force value. *Scientific J. of TNTU*. Ternopil. TNTU, **89**(1), 19–32. (Mechanics and Materials Science).
- Bezlyudko, G.Ya., Popov, B.E., Solomaha, R.N. (2015) Application of the coercive force method today. *V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya*, St.-Petersburg, **18**(4), 4-8 [in Russian].
- Nehotyatshii, V.A., Palienko, A.L., Gopkalo, A.P. (2015) Evaluation of 08H18N9 steel degradation according to coercive force kinetics. *Ibid.*, 14-16 [in Russian].
- Strizhalo, V.A. (1978) *Cyclic strength and creep of metals under low-cycle loading at low- and high-temperature conditions*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
- Troshchenko, V.T., Strizhalo, V.A., Sinyavskiy, D.P., Ivakhnenko, V.V. (1992) About effect of the coefficient of stress cycle asymmetry on propagation of fatigue and quasi-static fracture under low-cycle loading. *Problemy Prochnosti*, **8**, 14–21 [in Russian].
- Ivanova, V.S., Terentiev, V.F. (1975) *Nature of fatigue of metals*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
- Miller, K.Zh. (1994) Fatigue of metals: Past, present and future. *Zavodskaya Laboratoriya*, **3**, 544–561 [in Russian].
- Novikov, I.I., Ermishkin, V.A. (1995) On analysis of deformation curves of metals. *Metally*, **6**, 142–154 [in Russian].
- Terentiev, V.F., Oksogoev, A.A. (2001) *Cyclic strength of metallic materials: Manual*. Novosibirsk, NGTU [in Russian].
- Pangborn, R.N., Weissmann, S., Kramer, J.R. (1978) Work hardening in the surface layer and in bulk during fatigue. *Ser. Met.*, **12**(2), 129–131.

16. Sato, Y., Sasaki, H., Kumana A. (1980) Surface layer yielding of low-carbon steel cylinders. *J. Mater. Sci. Soc. Jap.*, 17(3-4), 185-192.
17. Miyazaki, S., Shibata, K., Fujita, H. (1979) Effect of specimen thickness on mechanical properties of polycrystalline aggregates with various grain sizes. *Acta Met.*, 27(5), 855-863.
18. Gulyaev, A.P. (1951) *Metal science*. Moscow [in Russian].

DIAGNOSIS OF DAMAGE IN AUSTENITIC STEEL AISI 304 AT MECHANICAL LOADING BY MEASUREMENTS OF COERCIVE FORCE

O.P. Gopkalo¹, V.O. Nekhotiashchiy², G.Ya. Bezlyudko³, Yu.P. Kurash¹, R.M. Solomakha³

¹G.P. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine. 2 Timiryazevskaya Str., 01014, Kyiv.

E-mail: ips@ipp.kiev.ua

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv. E-mail: office@paton.kiev.ua

³CC «Spetsialni naukovi rozrobky», PO box 12036, 61184, Kharkiv, Ukraine

The paper gives the results of experimental studies of applicability of coercimetric control for assessment of the degree of metal damage at mechanical loading by measuring the coercive force. It is shown that the differences in the reaction of the coercive force on mechanical loading of ferromagnetic and austenitic steels consist in differences of physical nature of these phenomena. For ferromagnetic steels the changes of coercive force values at mechanical loading are related to ordering of the orientation of metal domain structure (from the chaotic to directional). Reaction of the coercive force on mechanical loading of paramagnetic (in the initial state) unstable austenitic steel AISI 304 (08Kh18N9) is related to structural transformations during deformation of initial austenite into deformation martensite with final ferrite-pearlite decomposition. Mechanical loads result in the change of the ratio of ferromagnetic and paramagnetic metal phases, which cause an increase of coercive force values up to a certain level that is followed by lowering of these values at fracture. It was found that increase of the values of the coercive force corresponds to elastic and elasto-plastic deformation (crack initiation stage), while lowering of their values is associated with loss of metal integrity at appearance of pores or cracks (crack propagation stages). For unstable austenitic steels it becomes possible to considerably simplify determination of the endurance limit and establishing the stages of damage accumulation process, by the change of the direction of coercive force kinetics during loading, with plotting of irreversible damage line (by French). Coercimetric monitoring of the surface of real structures allows determination of the direction of principal stresses and detection of initiation of surface and subsurface cracks, as well as assessment of the obtained damage level. 18 Ref., 18 Fig.

Keywords: structuroscope, coercive force, loading, damage, stress, deformation, fracture

Надійшла до редакції
17.07.2019





X спеціалізована виставка **МЕТАЛ ОБЛАДНАННЯ ІНСТРУМЕНТ**

**місце
проведення**

ВЦ «Південний-ЕКСПО»
вул. Щирецька, 36, м. Львів

- металорізальні верстати та оснастка
- металорізальні інструменти
- слюсарний та монтажний інструмент
- зварювальне обладнання
- обладнання для обробки металу

- ручний електроінструмент
- металовироби, вироби для з'єднання та кріплення
- засоби захисту
- ковальське обладнання

Інформаційні спонсори







Контакти
 тел./факс: (032) 244-18-88
 e-mail: expolviv@gmail.com
 web: www.expolviv.ua

Організатор

