

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВОЇ НАМАГНІЧЕНОСТІ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ ПІСЛЯ ЛОКАЛЬНОГО НАМАГНІЧУВАННЯ ПРИСТАВНИМ МАГНІТНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

В.М. Учанін¹, С.М. Мінаков², Р.М. Соломаха³

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

E-mail: vuchanin@gmail.com

²НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Берестейський, 37.

E-mail: minakovsergey61@gmail.com

³СМ DIAGNOSTICS sp. z o.o., ul. Przemiaraki 23, lokal 8, Krakow, Poland. E-mail: rsolomak@gmail.com

Висвітлено загальну проблему залишкової намагніченості сталевих виробів і характерний випадок її утворення після циклічного перемагнічування приставним магнітним перетворювачем в процесі магнітного структурного аналізу за параметрами петлі магнітного гістерезису. Наголошено важливість достовірного оцінювання залишкової намагніченості, у тому числі для контролю якості розмагнічування сталевих виробів. Представлено методику визначення залишкової намагніченості та оцінювання якості процедур розмагнічування сталевих виробів шляхом вимірювання залишкового магнітного поля. Досліджено залишкову намагніченість зразків зі сталі типу 09Г2С після проведення вимірювань параметрів петлі магнітного гістерезису за допомогою магнітного аналізатора типу КРМ-Ц-МА залежно від кількості циклів намагнічування та її розподіл у зоні прикладання приставного магнітного перетворювача. Показано, що за багатократного перемагнічування рівень залишкової індукції у виробах зі сталі типу 09Г2С не перевищує 0,75 мТл, що дозволяє проведення зварювальних робіт без додаткових операцій розмагнічування. Сформульовано задачі подальших дослідження щодо впливу залишкової намагніченості сталевих виробів із різних сталей на їх подальше використання та утворення додаткових заводів під час проведення вихрострумового контролю. Показано, що наявність залишкової намагніченості після багатократних вимірювань параметрів петлі магнітного гістерезису не впливає на точність їх повторного вимірювання, що підтвердило стійкість процедури вимірювань магнітним аналізатором типу КРМ-Ц-МА щодо створеної ним залишкової намагніченості. Бібліогр. 16, рис. 3.

Ключові слова: залишкова намагніченість, магнітний структурний аналіз, приставний магнітний перетворювач, параметри петлі магнітного гістерезису, розмагнічування

Вступ. Стан проблеми. Під час проведення магнітного та вихрострумового контролю конструкцій із феромагнітних матеріалів часто використовують намагнічування, у тому числі до стану технічного насичення. Після припинення дії зовнішнього магнітного поля матеріал зберігає певний стан намагніченості, який характеризують як залишкову намагніченість. У техніці іноді використовують термін «залишкова магнітна індукція», хоча за точнішого розгляду ці характеристики відрізняються на магнітну постійну. Залишкова намагніченість залежить як від магнітних властивостей матеріалу, так і від попереднього впливу на нього магнітного поля. Крім того, залишкова намагніченість виробів суттєво залежить від їх форми через дію розмагнічувального фактору, а також від дії механічних напружень і деформацій. Тому відповідні зміни залишкового магнітного поля на поверхні об'єкта контролю із феромагнітних сталей використовуються для їх діагностики [1].

Неприпустимо високий рівень залишкової намагніченості утворюється, зокрема, після про-

ведення магнітопорошкової дефектоскопії, що викликає необхідність проведення додаткових операцій розмагнічування [2, 3]. Необхідність розмагнічування є особливо актуальною для деталей і елементів конструкцій із легованих сталей, які характеризуються високим рівнем залишкової магнітної індукції. Через це усі інструкції з магнітопорошкового контролю передбачають проведення обов'язкових операцій розмагнічування деталей. Залишкова намагніченість локальної зони сталевих конструкцій може утворюватися також внаслідок циклічного перемагнічування до стану технічного насичення приставними магнітними перетворювачами (МП) у процесі проведення магнітного структурного аналізу на основі вимірювання параметрів петлі магнітного гістерезису (ПМГ) [4–8]. На це довгий час не звертали достатньої уваги та рівень залишкової намагніченості після магнітної структуроскопії не досліджували.

Високий рівень залишкової намагніченості негативно впливає, зокрема, на якість зварних конструкцій через порушення оптимальних умов

В.М. Учанін – <http://orcid.org/0000-0001-9664-2101>, С.М. Мінаков – <http://orcid.org/0000-0001-8607-4120>

© В.М. Учанін, С.М. Мінаков, Р.М. Соломаха, 2024

зварювання. Залишкова намагніченість сталевих конструкцій є причиною нестабільної зварювальної дуги та її відхилення, що може призвести до утворення пор і непроварів. Крім того, залишкова намагніченість сталевих виробів впливає на якість їх механічної обробки через налипання стружки. Відомо, що рівень магнітного поля на торцях труб після магнітної дефектоскопії досягає 25 мТл. Але цей рівень може суттєво (до 120 мТл) зростати після стикування торців труб для наступного зварювання. При цьому рівень залишкового магнітного поля у зварювальному зазорі, за якого можливе якісне зварювання, не може перевищувати 6...8 мТл. Але краще, коли магнітне поле на торцях труб не перевищує 1,5 мТл, що вимагає якісного та контрольованого розмагнічування [9]. Крім того, залишкова намагніченість впливає на якість механічної обробки через налипання стружки.

Залежно від форми та розмірів деталі, розмагнічування може здійснюватися такими найрозповсюдженішими способами: 1) шляхом просування деталі через соленоїд, що живиться змінним струмом, та віддалення її на відстань, що дорівнює п'яти діаметрам (діагоналям) соленоїда; 2) зменшенням до нуля змінного струму в соленоїді з введеним у нього виробом, що розмагнічується (довжина соленоїда при цьому повинна бути більше довжини деталі); 3) шляхом віддалення деталі від електромагніту, що живиться змінним струмом (або відводяться електромагніт від деталі); 4) зменшенням до нуля змінного струму в електромагніті, в міжполюсній зоні якого знаходиться ділянка деталі, що розмагнічується. Провідні компанії пропонують спеціальні пристрої для розмагнічування феромагнітних виробів. Зокрема, в пристрої розмагнічування прутків і труб типу EMAG M (виробник – Institut Dr. Foerster GmbH, Німеччина) використано прохідні котушки, які живляться змінним магнітним полем промислової частоти, що обмежує можливість розмагнічування виробів діаметром і товщиною стінки понад 30 і 5 мм відповідно [10]. Кращі характеристики має пристрій розмагнічування EMAG F, який забезпечує розмагнічування прутків діаметром понад 240 мм та труб з товщиною стінки понад 25 мм. У цьому пристрої використано соленоїд з двома котушками розмагнічування, частота змінного магнітного поля в яких регулюється у діапазоні 5...100 Гц [10]. Відома низка публікацій, що стосуються розробки вдосконалених методів розмагнічування феромагнітних вузлів і конструкцій [9, 11–14]. При цьому для контролю якості розмагнічування часто рекомендують малоінформативний спосіб з використанням дрібних феромагнітних деталей [3]. Достовірнішими є методики контролю якості розмагнічування, коли за допомогою приладів вимірювання магнітного поля проводять кількісний аналіз розподілу залишкового магнітного поля на поверхні конструкції [9, 11].

Метою роботи є аналіз впливу намагнічування під час проведення магнітного структурного аналізу приставним МП на залишкову намагніченість зразків і точність вимірювання магнітних параметрів.

Методика експерименту, зразки та дослідницька апаратура. Залишкову намагніченість у локальній зоні зразків створювали за допомогою П-подібної системи намагнічування приставного МП з комплекту магнітного аналізатора КРМ-Ц-МА (рис. 1, а), розробленого НВФ «Спеціальні наукові розробки» (Харків) [4–7]. Приставний МП з узагальненою схемою магнітного аналізатора подано на рис. 1, б, де: 1 – П-подібне осердя; 2 – обмотки перемагнічування; 3 – давач Холла для вимірювання магнітного потоку в магнітному колі; 4 – об'єкт контролю; 5 – схема керування, вимірювання та індикації; 6 – схема формування струмів обмотки приставного МП; 7 – схема вимірювання магнітного потоку.

Дослідницькі зразки розмірами 460,0×60,0×4,0 мм (рис. 1, а) виготовлено у вигляді пластин з низьковуглецевої сталі типу 09Г2С (німецькі аналоги – 13Mn6 або 9MnSi5), хімічний склад якої відповідно до ДСТУ 8541:2015 (%): ≤ 0,12 С; 0,5...0,8 Si; 1,3...1,7 Mn; ≤ 0,3 Ni; ≤ 0,04 S; ≤ 0,035 P; ≤ 0,3 Cr; ≤ 0,12 N; ≤ 0,12 Cu. Досліджувана сталь широко використовується, зокрема, для виготовлення труб для транспортування нафти та газу.

Вимірювання вертикальної складової залишкового магнітного поля на поверхні зразків проводили за допомогою універсального мілітесламетра типу МТУ-1 (НВФ «Спеціальні наукові розробки») з магніточутливим перетворювачем на основі давача Холла (рис. 1, в), який на межі виміру 20 мТл забезпечує вимірювання магнітного поля з похибкою 3 %.

Для створення залишкової намагніченості МП магнітного аналізатора встановлювали на поверхню зразка, після чого проводили послідовно 15 циклів вимірювання параметрів ПМГ. Оцінювання залишкової намагніченості зразків проводили шляхом вимірювання залишкового магнітного поля H_r на поверхні зразка після 1, 3, 6, 8, 12 і 15 циклів вимірювання в 5-х зонах зразка відносно полюсів П-подібної системи намагнічування приставного МП (рис. 2, а), де: центр МП і центри полюсів позначено літерами А, В і С відповідно, а бокові зони позначено літерами Е і D. Вимірювання розподілу вертикальної складової залишкового магнітного поля H_r на поверхні зразків проводили за схемою на рис. 2, б. Пунктирними лініями на рис. 2 позначено місця установки полюсів МП. Після 15-ти циклів вимірювання параметрів ПМГ проведено розмагнічування зразка шляхом повільного введення його в котушку розмагнічування та наступного виведення. Котушку розмагнічування виконано у вигляді 560-ти витків емаль-проводу діаметром 0,95 мм, з зовнішнім і внутрішнім діаметром 200 і 170 мм відповідно, та заввишки 46 мм. Опір котушки

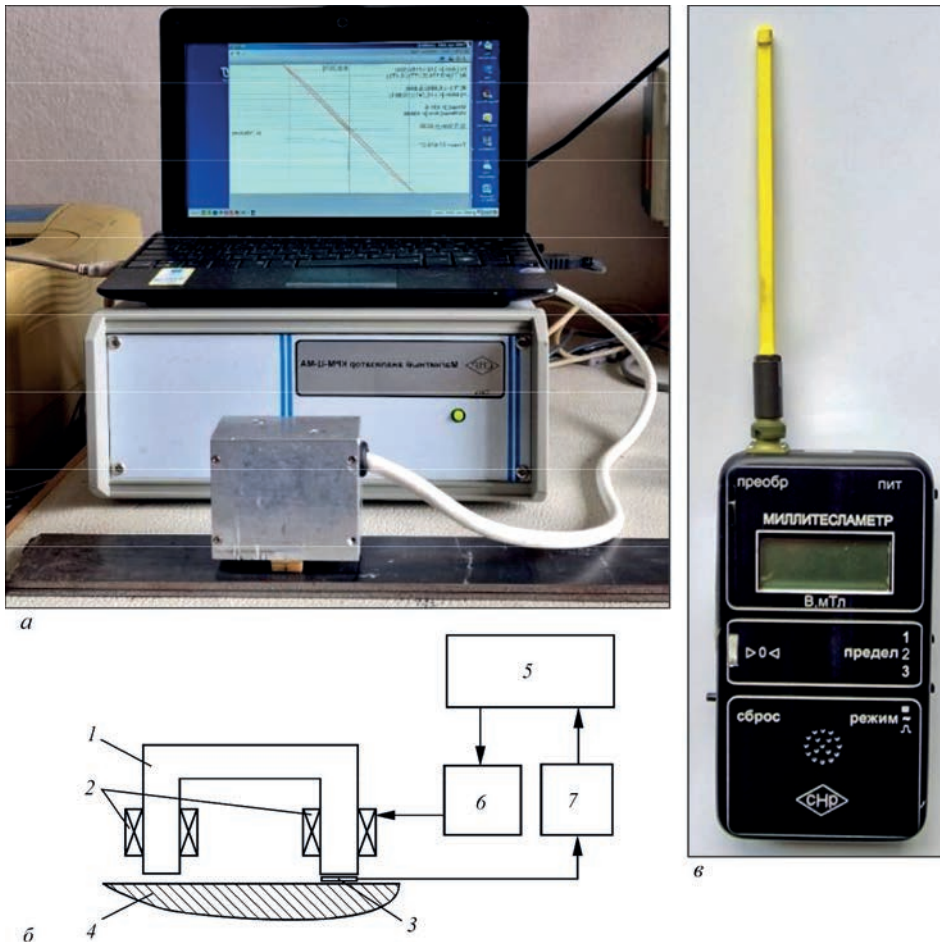


Рис. 1. Магнітний аналізатор типу КРМ-Ц-МА з приставним МП на досліджуваному зразку (а), конструкція приставного МП з узагальноною схемою магнітного аналізатора (б), універсальний мілітесламетр типу МТУ-1 (в)

розмагнічування на постійному струмі складає 9 Ом. Котушку розмагнічування підключали до стандартної мережі 220 В, що створювало в її центрі змінне електромагнітне поле розмагнічування величиною 34,5 мТл частотою 50 Гц.

Крім того, для визначення впливу залишкової намагніченості на точність вимірювання проводили також вимірювання параметрів ПМГ після циклів вимірювання без зміщення положення МП на зразку. Отримані значення порівнювали зі значеннями коерцитивної сили зразків у стані постачання та після розмагнічування.

Аналіз результатів. Залежність залишкового магнітного поля H_r на поверхні зразка у зонах А (×), В (●), С(○), D (▲) і E(▼) прикладання МП

(рис. 2, а) від кількості циклів вимірювання N наведено на рис. 3, а. Видно, що залишкове магнітне поле H_r на поверхні зразка в центральній і бічних зонах накладання МП близьке до нуля, що очікувалось, враховуючи нульове значення вертикальної складової первинного магнітного поля у цих зонах. Значення вертикальної складової залишкової магнітної індукції H_r зразка по центрам розташування полюсів МП (зони В і С) мають різний знак і поступово зростають зі збільшенням кількості циклів вимірювання N . Але вже після 6-ти циклів вимірювання залишкове магнітне поле H_r на поверхні зразка наближається до максимального значення і далі зі збільшенням кількості циклів вимірювання ($N > 9$) практично не змінюється.

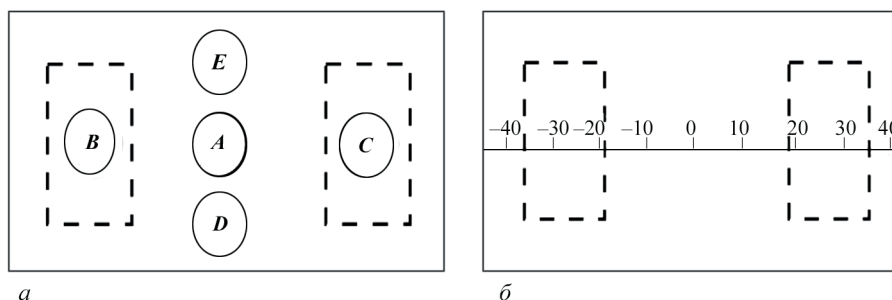


Рис. 2. Зони вимірювання залишкової магнітної індукції в зоні дії МП (а) та схема вимірювання розподілу залишкової магнітної індукції (б)

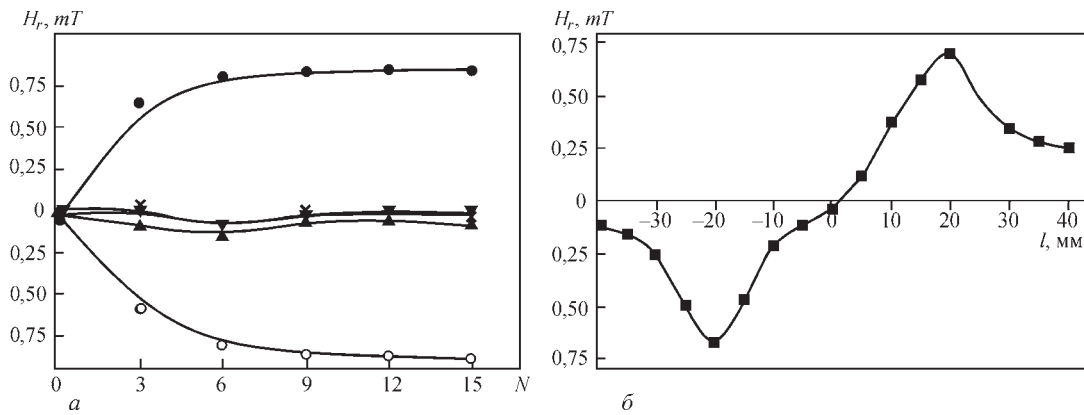


Рис. 3. Зміни вертикальної складової залишкової магнітного поля H_r в зоні дії МП від кількості циклів намагнічування зонах А (×), В (●), С (○), D (▲) і E (▼) (а) та її розподіл в зоні дії МП після 3-х циклів вимірювання (б)

Розподіл вертикальної складової залишкового магнітного поля H_r зразка після 3-х циклів вимірювання (рис. 3, б) показує наявність двох максимумів різного знаку, що відповідають центрам розташування магнітних полюсів МП. При цьому, навіть за багатократного намагнічування, рівень залишкового магнітного поля H_r у зразках зі сталі типу 09Г2С не перевищує 0,75 мТл, що дозволяє проведення зварювання конструкцій із цієї сталі без проведення додаткових операцій розмагнічування, коли оптимальним вважається рівень залишкового магнітного поля менше 1,5 мТл [9]. Але це не означає, що подібний висновок можна зробити щодо інших сталей, особливо тих, що характеризуються більшими значеннями коерцитивної сили. Крім того, це не означає, що навіть такий незначний рівень залишкового магнітного поля не буде впливати на подальшу роботу сталевих виробів, наприклад, через налипання металевої стружки, або не буде створювати суттєві завади, які часто обмежують можливість вихрострумової дефектоскопії феромагнітних сталей без стабілізаційного підмагнічування [15]. Тож додаткові дослідження у цих напрямках також доречні.

Результати повторних вимірювань параметрів ПМГ зразків з різною залишковою намагніченістю показали, що вона не впливала на точність вимірювання, що підтвердило стійкість процедури вимірювань магнітним аналізатором типу КРМ-Ц-МА. У той же час слід зазначити, що створений рівень залишкової намагніченості може суттєвіше впливати на покази вимірювань параметрів динамічної МПГ локальним МП, де використано суттєво менші значення первинного магнітного поля [16].

За необхідності зменшення залишкової намагніченості після проведення магнітного структурного аналізу нами запропоновано ввести в цикл вимірювання параметрів ПМГ додаткову операцію розмагнічування за допомогою серії імпульсів різнополярного змінного магнітного поля, амплітуда яких загасає до нульового значення (Учанін В.М., Соломаха Р.М. Спосіб визначення магнітних та механічних характеристик феромагнітних матеріалів та моніторингу технічного стану конструкцій. Патент

України № 154135. Опубл. 11.10.2023, Бюл. 41). Для зменшення похибки вимірювань параметрів ПМГ також пропонується на зону контролю діяти імпульсами змінного магнітного поля до проведення вимірювального циклу намагнічування. Імпульси різнополярного змінного магнітного поля, амплітуда якого загасає до нуля, можна створювати обмотками електромагніту П-подібного МП, якими реалізують цикл вимірювання параметрів ПМГ.

Висновки

1. Висвітлено загальну проблему залишкової намагніченості сталевих виробів і характерний випадок її утворення після циклічного перемагнічування приставним МП в процесі магнітного структурного аналізу за параметрами ПМГ. Наголошено важливість достовірного оцінювання залишкової намагніченості, у тому числі для контролю якості розмагнічування сталевих виробів. Представлено методику визначення залишкової намагніченості та оцінювання якості процедур розмагнічування сталевих виробів шляхом вимірювання залишкового магнітного поля.

2. Досліджено залишкову намагніченість зразків зі сталі типу 09Г2С після проведення вимірювань параметрів ПМГ за допомогою магнітного аналізатора типу КРМ-Ц-МА залежно від кількості циклів намагнічування та її розподіл у зоні прикладання приставного МП. Показано, що за багатократного перемагнічування, рівень залишкової індукції у виробках зі сталі типу 09Г2С не перевищує 0,75 мТл, що дозволяє проведення зварювальних робіт без проведення додаткових операцій розмагнічування.

3. Сформульовано задачі подальших досліджень щодо впливу залишкової намагніченості сталевих виробів із різних сталей на їх подальше використання та утворення додаткових завад під час проведення вихрострумового контролю.

4. Показано, що наявність залишкової намагніченості після багатократних вимірювань параметрів ПМГ не впливає на точність їх повторного вимірювання, що підтвердило стійкість процедури вимірювань магнітним аналізатором типу КРМ-Ц-МА щодо створеної ним залишкової намагніченості.

Список літератури/References

- Roskosz, M, Bieniek, M. (2012) Evaluation of residual stress in ferromagnetic steels based on residual magnetic field measurements. *NDT& E International*, 45(1), 55–62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2011.09.007>
- Осташ О.П., Федірко В.М. (2007) *Механіка руйнування і міцність матеріалів: довідниковий посібник*, Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій. Львів, Сполом.
- Ostash, O.P., Fedirko, V.M. (2007) *Fracture mechanics and strength of materials: Refer. Book*, Vol. 9: *Strength and service life of aircraft materials and structure elements*. Lviv, Spolom [in Ukrainian].
- Куп Ю., Протасов А., Шапенко В. та ін. (2012) *Магнітний неруйнівний контроль*. Київ, НТУУ «КПІ».
- Kuts, Yu., Protasov, A., Tsapenko, V. et al. (2012) *Magnetic non-destructive testing*. Kyiv, NTUU KhPI [in Ukrainian].
- Безлюдько Г. (2003) Эксплуатационный контроль установочного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом. *Техн. диагн. и неразр. контроль*, 2, 20–26.
- Bezlyudko, G. (2003) Operational control of fatigue condition and residual life of metal structures by nondestructive (coercimetric) method. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 2, 20–26 [in Russian].
- Лобанов Л.М., Бондаренко А.Ю., Бондаренко Ю.К. (2004) Оценка сварных соединений конструкций магнитным (коэрцитиметрическим) методом для прогнозирования индивидуального остаточного ресурса. *Техн. диагн. и неразруш. контроль*, 1, 3–8.
- Lobanov, L.M., Bondarenko, A.Yu., Bondarenko, Yu.K. (2004) Evaluation of welded joints of structures by magnetic (coercimetric) for forecasting individual residual life. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 3–8 [in Russian].
- Безлюдько Г.Я. (2004) Практика оценки состояния сварных швов по измерениям магнитной характеристики коэрцитивной силы металла. *Техн. диагн. и неразруш. контроль*, 1, 20–22.
- Bezlyudko, G.Ya. (2004) Practical evaluation of the condition of welds by measuring the magnetic characteristic – coercive force of the metal. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 1, 20–22 [in Russian].
- Uchanin, V., Ostash, O., Nardoni, G., Solomakha, R. (2020) *Coercive Force Measurements for Structural Health Monitoring. The Fundamentals of Structural Integrity and Failure* (Ed. R.M. Wilcox), Nova Science Publishers, New York, USA, 163–192.
- Рибачук В.Г., Учанін В.М. (2021) Коерцитивна сила двохшарових феромагнітних матеріалів. *Відбір і обробка інформації*, 49(125), 3–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2021.49.003>
- Rybachuk, V.G., Uchanin, V.M. (2021) Coercive force of two-layer ferromagnetic materials. *Vidbir i Obrobka Informatsii*, 49(125), 3–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2021.49.003> [in Ukrainian].
- Добродеев П.Н. (2014) Исследование методов размагничивания торцов труб при ремонтах магистральных трубопроводов. *Электротехника и электромеханика*, 3, 50–54.
- Dobrodeev, P.N. (2014) Study of methods of demagnetization of pipe ends in repair of main pipelines. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 3, 50–54 [in Russian].
- <https://www.foerstergroup.com/en/usa/products/emag/>
- Розов В., Пилюгина О., Лупиков В. и др. (2006) Введение в демагнетизацию технических объектов. *Электротехника и электромеханика*, 4, 55–59.
- Rozov, V., Pilyugina, O., Lupikov, V. et al. (2006) Introduction into demagnetization of technical objects. *Elektrotehnika i Elektromekhanika*, 4, 55–59 [in Russian].
- Волохов С.А., Добродеев П.Н., Мамин Г.И. (2012) Комплексная демагнетизация труб при электродуговой сварке. *Технічна електродинаміка*, 4, 19–24.
- Volokhov, S.A., Dobrodeyev, P.N., Mamin, G.I. (2012) Integrated demagnetization of pipes in electric arc welding. *Tekhnichna Elektrodynamika*, 4, 19–24 [in Russian].
- Oxley, P. (2009) Apparatus for magnetization and efficient demagnetization of soft magnetic materials. *IEEE Transactions on magnetics*, 45(9), 3274–3283.
- Shelikhov, G.S. (2010) Experience in the demagnetization of large objects. *Rus. J. of Nondestr. Testing*, 46(5), 315–323.
- Deng, Z., Yu, Z., Yuan, Z. et al. (2022) Mechanism of Magnetic Permeability Perturbation in Magnetizing-Based Eddy Current Nondestructive Testing. *Sensors*, 22, 2503. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22072503>
- Мінаков С.М., Учанін В.М., Мінаков А.М. та ін. (2023) Визначення параметрів динамічної петлі магнітного гістерезису конструкційних матеріалів приставними первинними перетворювачами. *Відбір і обробка інформації*, 51(127), 12–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2023.51.012>
- Minakov, S.M., Uchanin, V.M., Minakov, A.M. et al. (2023) Determining the parameters of the dynamic magnetic hysteresis loop of the structural materials by attachable primary transducers. *Vidbir i Obrobka Informatsii*, 51(127), 12–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/vidbir2023.51.012>

RESEARCH OF THE RESIDUAL MAGNETIZATION OF STEEL STRUCTURES AFTER LOCAL MAGNETIZATION WITH AN ATTACHABLE MAGNETIC TRANSDUCER

V.M. Uchanin¹, S.M. Minakov², R.M. Solomakha³

¹G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine. E-mail: vuchanin@gmail.com

²NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresteysky Ave., 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: minakovsergey61@gmail.com

³CM DIAGNOSTICS sp. z.o.o., ul. Przemiarcki 23, lokal 8, Krakow, Poland. E-mail: rsolomak@gmail.com

The general problem of residual magnetization of steel products and a typical case of its formation after cyclic magnetization by an attachable type magnetic transducer in the process of magnetic structural analysis by hysteresis loop parameters determination is highlighted. The importance of reliable assessment of residual magnetization, including for quality control of demagnetization of steel products, is emphasized. The method of determining the residual magnetization and evaluating the quality of the demagnetization procedures of steel products by measuring the residual magnetic field is presented. Residual magnetization of 09G2C type steel specimen after hysteresis loop parameters measuring using a magnetic analyzer of the KRM-Ts-MA type depending on the number of magnetization cycles and its distribution in the area of application of the attachable type magnetic transducer was investigated. It is shown that after multiple magnetization, the level of residual induction in 09G2C type steel products does not exceed 0,75 mT, which allows welding without additional demagnetization operations. The tasks of further research on the influence of residual magnetization of steel products made of different steels on their further use and the formation of additional noise during eddy current testing are formulated. It was shown that the presence of residual magnetization after multiple measurements of hysteresis loop parameters does not affect the accuracy of their repeated measurement, which confirmed the stability of the measurement procedure with a KRM-Ts-MA type magnetic analyzer with respect to the residual magnetization created by it. 16 Ref., 3 Fig.

Keywords: residual magnetization, magnetic structural analysis, attachable magnetic transducer, parameters of the magnetic hysteresis loop, demagnetization

Отримано 03.01.2024

Отримано у переглянутому вигляді 14.01.2024

Прийнято 12.03.2024