

МАГНЕТОАКУСТИЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ ВОДНЕВОГО ПОШКОДЖЕННЯ ФЕРОМАГНЕТИКІВ

З. Т. НАЗАРЧУК, В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ

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

E-mail: pminasu@ipm.lviv.ua

Проведено експериментальні дослідження для кількісного встановлення зміни параметрів сигналів магнетопружної акустичної емісії під впливом структурних перетворень та ступеня наводнювання феромагнетних матеріалів. Показано, що застосування явища магнетопружної акустичної емісії може складати основу для створення нових високочутливих неруйнівних технологій виявлення водню, отриманого матеріалом за час тривалого експлуатування конструкцій. Бібліогр. 7, рис. 9.

Ключові слова: неруйнівні технології контролю, металеві конструкції, воденьвмісні середовища, магнетопружна емісія, параметри сигналів, підвищення чутливості

У переважній більшості галузей промисловості, зокрема, в авіакосмічній, хімічній, енергетичній, нафтопереробній, у трубопровідному транспорті та машинобудуванні важливим є діагностування стану виробів і елементів конструкцій, а також обладнання, яке працює з воденьвмісними середовищами. Особливо важливо виявляти під час цього, окрім областей скупчення малих дефектів чи локальних пластичних деформацій, місця наводнювання матеріалу. Адже їх поширення може призвести до пришвидшеного зародження макротріщин, а відтак і до аварій та катастрофічних наслідків як для самого обладнання, так і для навколишнього середовища.

Сучасні методи неруйнівного контролю (НК), які застосовують для технічного діагностування таких об'єктів, зокрема ультразвукова та рентгенівська дефектоскопія, потребують відповідного оброблення поверхні об'єкта контролю, вони досить трудомісткі, і їх важко застосовувати в умовах експлуатування обладнання. Перспективним для вирішення цієї проблеми є метод акустичної емісії (АЕ) [1, 2]. Однак під час його реалізації необхідність прикладання до об'єкта контролю додаткового зовнішнього механічного навантаження, яке локально іноді може значно перевищувати допустимі оптимальні режими напружень у матеріалі, робить застосування АЕ-діагностування обмеженим. Для розширення цих меж, а також підвищення ефективності виявлення місць наводнення феромагнетних елементів конструкцій та виробів запропоновано використовувати явище генерування сигналів магнетопружної акустичної емісії (МАЕ) під впливом зовнішнього магнетного поля [3]. Останнє, як відомо, спричинює рух стінок магнетних доменів (ефект Баркгаузена). Найінтенсивніше ці процеси відбуваються в околі

окремих дефектів чи їх скупчень — там, де наявні значні градієнти механічних напружень. Крім того, на параметри сигналів МАЕ суттєво впливають зміни структури матеріалу, рівень його водневого деградування за час експлуатування тощо.

Мета цієї роботи — встановити кількісні показники зміни параметрів МАЕ під впливом структурно-механічних та інших фізичних чинників під час перемагнетнення феромагнетиків у зовнішньому квазістатичному магнетному полі, а особливо за наявності у них оклюдованого водню.

Оцінка впливу структурного чинника на генерування МАЕ. Для встановлення вмісту вуглецю у матеріалі перемагнетчували в соленоїді пластинчасті зразки розмірами 240×30×2 мм. Частота перемагнетчування становила 9 Гц. МАЕ відбирали первинним перетворювачем (ПАЕ) з робочою смугою частот 0,2...0,6 МГц і реєстрували системою МАЕ-1Л. Умови проведення експериментальних досліджень тут і далі для всіх зразків були однаковими. Структурну схему вимірювань приведено у праці [4].

На рис. 1 показано залежність суми амплітуд сигналів МАЕ від напруженості магнетного поля для сплавів із різним вмістом вуглецю. Видно, що найвища активність МАЕ спостерігається для сталі 08кп, оскільки її мікроструктура складається з крупних зерен фериту з незначними вкрапленнями перліту на границях зерен. Таким чином, під час перемагнетчування цього матеріалу ні границі зерен, ні наявність включень карбідів чи інших фаз не впливають на стрибкоподібне повертання доменів.

З дещо меншими амплітудами генеруються сигнали МАЕ під час перемагнетчування сталі 15. Це пояснюється незначним здрібненням структури сталі та наявністю границь зерен, вздовж яких розташовані включення перліту. Як відомо [3],

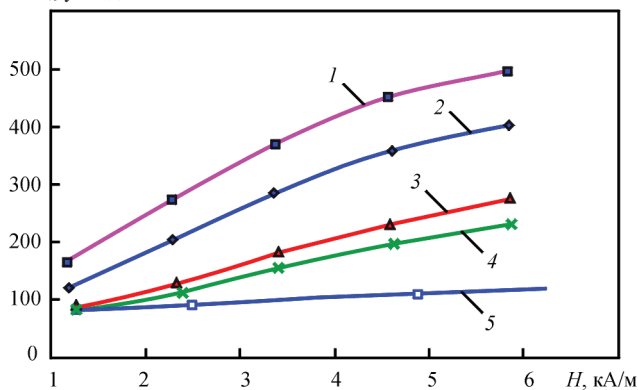
ΣA_i , ум. од.

Рис. 1. Залежність суми амплітуд сигналів МАЕ від амплітуди напруженості магнетного поля за перемагнечування сплавів із різним вмістом вуглецю: 1 — сталь 08кп; 2 — сталь 15; 3 — сталь 65Г; 4 — У8; 5 — сірий чавун СЧ10

дрібнодисперсність структури та наявність фаз на границях зерен утруднюють повертання доменів під час перемагнечування матеріалу, а отже знижується активність генерування пружних хвиль, викликаних їх стрибками.

Різне зниження активності генерування МАЕ спостерігали за перемагнечування зразків із високовуглецевої сталі 65Г. У даному випадку рух доменних стінок блокується наявною в мікроструктурі великою кількістю перліту та дрібних карбідних включень, що присутні не тільки вздовж границь, але й у твердому розчині тіла зерна.

У випадку перемагнечування евтектоїдної сталі марки У8, структура якої після повного відпалу складалась з дрібнодисперсного перліту, спостерігали сигнали МАЕ з амплітудами, нижчими, ніж у згаданих доевтектоїдних сталей. Вочевидь такий ефект викликаний подрібненням структури та наявністю великої кількості границь перлітних зерен, які є перешкодою для повороту доменних стінок. Найнижчою активністю генерування МАЕ характеризується сірий чавун, мікроструктура якого складається, в основному, з перліту, включень графіту та незначної кількості фериту.

Вплив відпалу на генерування МАЕ. В соленоїді перемагнечували зразки з маловуглецевої сталі 15, які нагрівали до температур 900...910 °С з наступним охолодженням разом із піччю. Внаслідок такої термічної обробки відбувається ріст феритних зерен, потоншуються їх границі, а частки перлітної фази коагулюють, об'єднуючись у поодинокі включення. Така термічна обробка також сприяє зниженню залишкових напружень, спричинених пластичним деформуванням під час вальцювання листів сталі. Такі умови покращують рухливість доменних стінок під час перемагнечування сталі, а отже підвищують активність генерування МАЕ. На рис. 2 показано залежність суми амплітуд сигналів МАЕ від напруженості магнетного поля для

сталі 15, підданій термічній обробці. Бачимо, що крива за повного відпалу сталі характеризується вищою активністю МАЕ.

Особливості генерування МАЕ в структурах гартування досліджували, перемагнечуючи в соленоїді зразки з високовуглецевої сталі 65Г. Зразки гартували в маслі, після чого піддавали низькому, середньому та високому відпуску. На рис. 3 показано залежність суми амплітуд сигналів МАЕ від напруженості магнетного поля для зразків, підданих різній термічній обробці. Бачимо, що зі зростанням температури відпуску сталі зростає активність генерування МАЕ. Це пов'язано перш за все з релаксацією залишкових напружень, які виникають у нагартованій структурі внаслідок збільшення об'єму під час переходу гратки з кубічної гранецентрованої в кубічну об'ємноцентровану.

Низька рухливість доменних стінок у гартованому металі (рис. 3, крива 1) пов'язана також з наявністю у структурі пакетів голчастих включень мартенситу та залишкового аустеніту [5].

Нагрівання гартованої сталі до $T = 80...200$ °С призводить до розпаду мартенситу. Під час цього відбувається перехід з тетрагональної гратки у кубічну. Окрім того, розпадається залишковий аустеніт; відбувається карбідне перетворення і коагуляція карбідів; згладжуються недосконалості

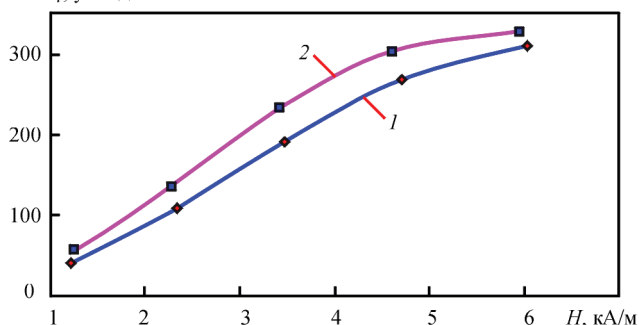
 ΣA_i , ум. од.

Рис. 2. Залежність суми амплітуд сигналів МАЕ від напруженості магнетного поля за перемагнечування зразків зі сталі 15: 1 — вихідний матеріал; 2 — відпалений 900...910 °С

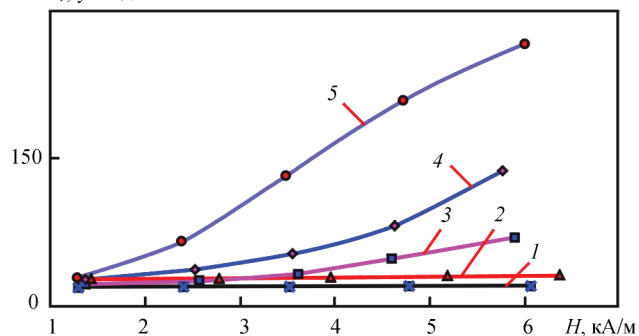
 ΣA_i , ум. од.

Рис. 3. Залежність суми амплітуд сигналів МАЕ від напруженості магнетного поля за перемагнечування зразків зі сталі 65Г: 1 — гартований метал; 2 — відпуск 180 °С; 3 — відпуск 350 °С; 4 — відпуск 580 °С; 5 — вихідний метал

кристалічної будови α -твердого розчину; знижуються залишкові напруження. Ці процеси частково покращують рухливість стінок доменної структури, що в свою чергу підвищує активність генерування МАЕ (рис. 3, крива 2).

За середнього та високого відпуску сталі 65Г ($T = 300 \dots 400 \text{ }^\circ\text{C}$) утворюються структури троститу, а за $500 \dots 650 \text{ }^\circ\text{C}$ — сорбіту. За цих температур протікають зміни структури, які не пов'язані з фазовими перетвореннями: змінюється форма і розмір карбідів і структура фериту. При цьому збільшуються кристали цементиту, а їх форма поступово наближається до сфероїдальної. Усуваються межі між пластинчастими кристалами фериту, розмір яких збільшується, а форма наближається до рівновісної. Це позитивно позначається на зростанні стрибків доменних стінок під час перемагнення таких матеріалів, а отже зростає активність МАЕ (рис. 3, криві 3, 4).

Отже, за результатами експериментальних досліджень встановлено, що стрибкоподібне зміщення доменних стінок під час перемагнення металу суттєво залежить від його мікроструктури, а відтак впливає на генеровану при цьому МАЕ. Факторами, що утруднюють рухливість доменів, є: дрібнодисперсність мікроструктури, наявність границь зерен, карбідів, структур гартування, неметалевих включень, залишкових напружень тощо. Таким чином, зростання концентрації вуглецю у сталі призводить до значних змін структури, які знижують активність МАЕ. Відпал малоуглецевої сталі сприяє зростанню амплітуд МАЕ за рахунок укрупнення феритних зерен та коагуляції включень перліту.

Показано, що за перемагнення гартованої сталі 65Г активність МАЕ є мінімальною. Це

пов'язано з наявністю у структурі сталі пакетів мартенситу та включень залишкового аустеніту. Встановлено, що з підвищенням температури відпуску сталі зростає активність МАЕ. Останнє викликано релаксацією залишкових напружень, збільшенням кристалів цементиту, злиттям границь між пластинчастими кристалами фериту, розмір яких збільшується і наближається за формою до рівновісної.

У праці [3] показано негативний вплив пластичних деформацій на генерування МАЕ: що вища пластична деформація, то менший показник параметра ΣA_i .

Вплив електролітичного водню. Випробування проводили у соленоїді-електролізері, зовнішній вигляд і будова якого зображені на рис. 4. Обмотка соленоїда намотана на поліхлорвінілову трубу діаметром 50 мм, яка слугувала корпусом електролізера. З обох сторін основу соленоїда закривали накривками з відповідними отворами для заливання-зливу електроліту, ущільнення для центруючої зразок шпильки, виходу зразка, входів електронного термометра та анода.

Досліджували циліндричні зразки діаметром 12 мм, довжиною 260 мм, виготовлені зі сталі 15 холодного вальцювання. Остання має високий вміст α -заліза, який забезпечує їй високі (порівняно з технічно чистим залізом) феромагнетні властивості. Нижня частина зразка повністю розташовувалась в об'ємі електролізера, у той час як інша незначна частина виступала над верхньою накривкою зразка для електричного підключення та для встановлення перетворювачів акустичної емісії.

Електролізер наповнювали розчином 0,1 н. NaOH, що є зручним електролітом, який забезпе-

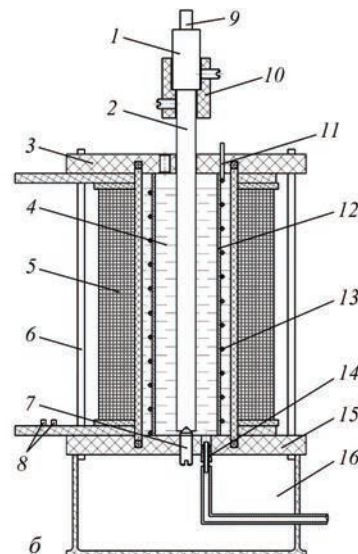
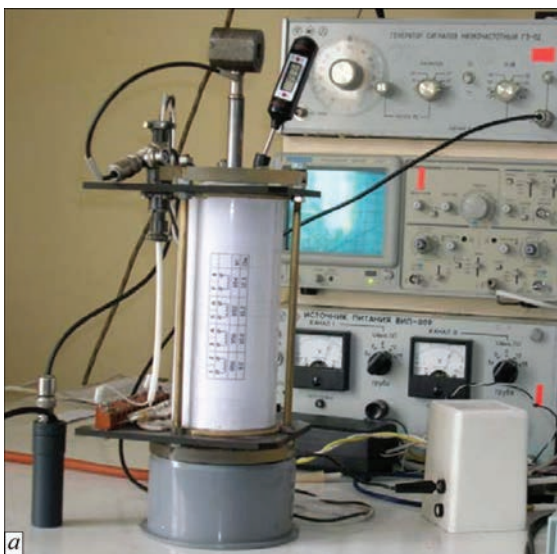


Рис. 4. Зовнішній вигляд (а) і будова (б) соленоїда-електролізера для дослідження впливу абсорбованого металом водню на параметри сигналів МАЕ: 1 — ПАЕ; 2 — зразок; 3 — верхня накривка; 4 — електроліт; 5 — обмотка соленоїда; 6 — стяжка; 7 — опора; 8 — клеми; 9 — високочастотний кабель; 10 — насадка; 11 — вивід анода; 12 — каркас; 13 — платиновий електрод; 14 — ізоляційна основа; 15 — нижня накривка; 16 — піддон

чує високу електропровідність, не сприяє виділенню побічних продуктів електролізу, крім водню і кисню, а також забезпечує поверхню сталевого зразка від надмірної корозії в періоди відключення катодного струму. Коаксіально з соленоїдом та зразком встановлювали платиновий анод, який разом із досліджуваним зразком (катод) через цифровий вимірювальний прилад UT101, що працював у режимі вимірювання струму електролізера, підключали до стабілізованого джерела струму Еталон ЕП.10010.1.3. За допомогою цих приладів забезпечували середню густину струму на поверхні робочого електрода в діапазоні 0...20 мА/см².

Електрохімічне наводнювання металу порівняно з наводнюванням із газової фази має ту перевагу, що метал не зазнає теплового впливу, який може викликати не тільки релаксацію внутрішніх залишкових напружень (до них чутливі магнетні властивості феромагнетиків), але і зміну мікроструктури матеріалу — фазові перетворення, сегрегацію вторинної фази, ріст зерна, рекристалізацію тощо. Крім того, в умовах електролітичного наводнювання активність відновленого водню на поверхні металу легко контролюється силою струму. У таких умовах не складно досягнути значної концентрації атомарного водню на поверхні металу, але й просто контролювати незначну активність відновленого атомарного водню. Це важливо, оскільки розчинність водню у α -залізі є дуже незначною, як невеликі і критичні концентрації водню, що спричиняють незворотні руйнування мікроструктури (десяті, чи навіть соті частки ppm для чистого заліза [6] і не більше 1 ppm для трубних сталей [7]).

Для збудження магнетного поля всередині зразка обмотку соленоїда через низькочастотний підсилювач та систему вимірювання струму приєднували до цифрового функціонального генератора змінної напруги PCG10/8016, який контролювався комп'ютером. Частоту генератора можна змінювати в межах 0,01 Гц...1,0 МГц. Контроль сигналу здійснювали за допомогою комп'ютерного осцилоскопного модуля PCS500. Під час досліджень перевіряли вплив різних форм змінної напруги живлення соленоїда: синусоїдну, меандр, пилкоподібну, трикутнікоподібну, імпульсну.

До верхнього кінця зразка за допомогою спеціального тримача приєднували широкосмуговий високочутливий (коефіцієнт перетворення пружних хвиль в електричні сигнали не менше $1,6 \cdot 10^9$ В/м) ПАЕ, який перетворював пружні коливання поверхні металу внаслідок поширення хвиль МАЕ в електричний сигнал. Нерівномірність коефіцієнта перетворення первинного перетворювача становила ± 7 дБ у смузі робочих частот 0,2...1,0 МГц.

Сигнал МАЕ з ПАЕ через попередній підсилювач САА–06 з коефіцієнтом підсилення 40 дБ надходив на вхід інформаційно-вимірювальної системи МАЕ–1L, яка здійснювала підсилення, опрацювання та реєстрування сигналу МАЕ. Розроблене в середовищі DELPHI системне програмне забезпечення системи МАЕ–1L дає змогу налаштовувати коефіцієнти підсилення сигналів, величини їх порогів дискримінації, швидкість оцифрування та об'єм вибірки. Через паралельний порт цей блок приєднаний до комп'ютера, який зберігає оцифровані дані та на якому аналізують сигнали МАЕ за допомогою програм MAESTAT, MS EXCEL, MATLAB тощо. Інформаційно-обчислювальний блок МАЕ–1L синхронізовано з сигналом функціонального генератора. Це означає, що початок реєстрування сигналу МАЕ відбувається за однієї і тієї ж фазової затримки першої чверті періоду, тобто на підйомі синусоїди.

Пружні хвилі МАЕ, що спричинювали переміщення поверхні металу, виникали внаслідок стрибкоподібного переміщення доменних стінок під час перемагнетчування сталі у змінному магнетному полі, причому динаміка переміщень доменних стінок може відображати з одного боку дефектність структури металу, а з іншого – енергетичний розподіл дефектів мікроструктури. Ці обидві характеристики металу залежать від кількості абсорбованого водню, яка, своєю чергою, залежить від струму і часу електролізу та інших фізико-хімічних параметрів. З урахуванням цього вивчали залежності параметрів сигналів МАЕ від величини катодного струму через поверхню зразка, напруженості магнетного поля та часу наводнювання.

Проведено дві серії експериментів. У першій сигналі МАЕ, зареєстровані вимірювальною системою, підлягали типовому пост-опрацюванню з використанням алгоритму порогових значень, який вилучав із розрахунків імпульси з нижчими від порогового рівня амплітудами. У другій серії експериментів зареєстровані сигнали МАЕ зазнавали іншої процедури опрацювання, під час якої тільки усували зміщення значень МАЕ-імпульсів, зумовлене принципом роботи вимірювальної системи і (зادля збереження повноти корисного МАЕ сигналу) не відфільтровували імпульси низької амплітуди.

Для першої серії експериментів на рис. 5 наведено залежність суми амплітуд сигналів магнетоакустичної емісії ΣA_i (у тисячах умовних одиниць) від часу електролітичного наводнювання зразка катодним струмом $I_c = 50$ мА. Як видно з рисунка, початкове ($t_n = 0$) значення ΣA_i становить близько 100, і цей рівень інтенсивності сигналу МАЕ триває більше, ніж 5 хв.

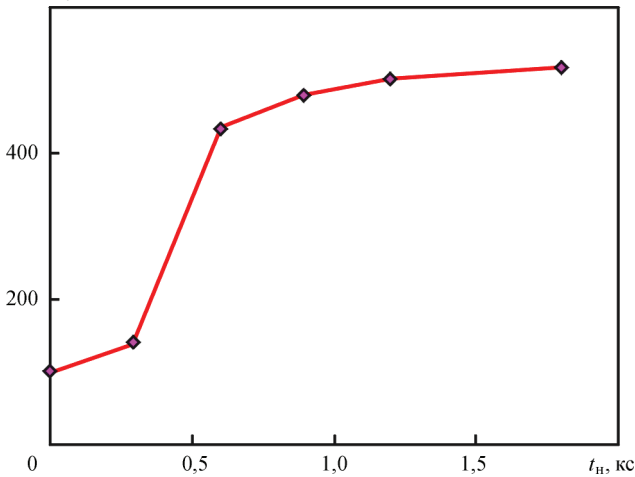
ΣA_i , ум. од.

Рис. 5. Залежність параметра ΣA_i від часу t_n електролітичного наводнювання зразка (катодний струм $I_c = 50$ мА, амплітуда напруженості магнітного поля $H_a = 8,7$ кА/м)

Пrawdopodobно, що такий час є необхідним для відновлення поверхневих окисно-гідроксидних плівок та для проникнення достатньої кількості атомарного водню на таку глибину, щоб вплинути на інтегральний параметр ΣA_i сигналів МАЕ. Через 600 с після початку катодного наводнювання сума амплітуд ΣA_i перевищує 400 і продовжує наростати, сягнувши значення $\Sigma A_i = 500$ через 72 хв дії катодного струму.

Оцінювали також зміну чутливості параметра ΣA_i сигналів МАЕ від амплітуди напруженості магнетного поля H_a внаслідок електролітичного наводнювання (рис. 6).

Бачимо суттєву різницю в потужностях сигналів МАЕ до та після наводнення зразків. Відносне зростання величини параметра ΣA_i внаслідок наводнювання металу, хоч і менше, ніж на рис. 5, все ж становить понад 100 %. Це свідчить про винятково високу чутливість методу МАЕ до електролітичного наводнювання та про перспективність досліджень у цьому напрямку.

Важливо оцінити, як змінюється інтенсивність сигналів МАЕ з підвищенням катодного струму,

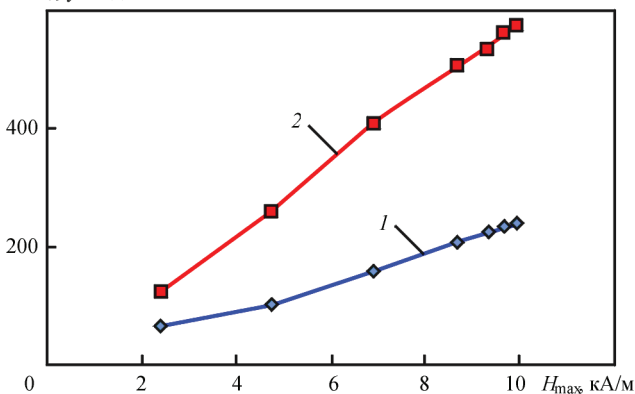
 ΣA_i , ум. од.

Рис. 6. Залежність параметра ΣA_i від напруженості магнетного поля H_a для зразка перед (1) і після (2) електролітичного наводнювання катодним струмом $I_c = 50$ мА впродовж 1800 с

прикладеного до зразка, а значить з тиском атомарного водню на поверхні металу. Реєстрували параметр ΣA_i від часу t_n електролітичного наводнювання для катодного струму $I_c = 150$ мА за тієї ж амплітуди напруженості магнетного поля $H_a = 8,7$ кА/м, що і на рис. 4. Бачимо, що для вищого катодного струму вистачило 300 с, щоб параметр ΣA_i набув свого майже максимального значення. Водночас для $I_c = 50$ мА через 300 с цей параметр залишався ще на рівні шумів. По-друге, у випадку меншого катодного струму параметр ΣA_i мав стійку тенденцію до незначного підвищення впродовж періоду наводнювання, тоді як для $I_c = 150$ мА цей параметр досягнув свого максимуму через 10 хв наводнювання, після чого поступово зменшувався приблизно на 8 % до кінця експерименту.

Після отримання наведених вище залежностей провели другу серію випробувань з аналогічними умовами перемагнетчування, однак з дещо нижчими рівнями катодних струмів та іншим опрацюванням результатів вимірювань. На рис. 6 наведено залежності параметра ΣA_i від амплітуди напруженості перемагнетчувального поля H_a та катодного струму наводнювання. Якщо апроксимувати отримані залежності ΣA_i від H_a параболічно (апроксимаційні криві не показано), то для методу найменших квадратів, отримуємо коефіцієнти детермінації в межах $R^2 = 0,9982 \dots 0,9999$, що вказує на функціональну залежність змінних. Параболічний характер цих залежностей означає, що під час проведення експериментів рівень індукції не досягав насичення феромагнетика. Отже, головним джерелом пружних хвиль МАЕ були стрибкоподібні переміщення 90° -х доменних стінок внаслідок зміни напрямів векторів намагнетченості від однієї осі об'ємноцентрованого кристалу заліза до іншої. Зауважимо, що вершини параболічних апроксимацій розташовані на рівнях зареєстрованих шумів $\Sigma A_i = 58 \pm 1$ (ум. од.) у межах розкиду експериментальних даних.

Як видно з рис. 7, за умов електролітичного наводнювання зразка-феромагнетика інтенсивність сигналу МАЕ суттєво збільшується, особливо для катодних струмів наводнювання вище 50 мА. Однак, як і у попередній серії випробувань, у цих експериментах зростання інтенсивності сигналів МАЕ з катодним струмом відбувалось у послідовності 25 → 100 → 150 → 50 мА, тобто було несистематичним, відображаючи, мабуть, одночасний вплив кількох взаємно конкуруючих чинників. Застосування катодного струму наводнювання величиною 25 мА дає лише незначне зростання інтенсивності сигналу МАЕ над рівнем, що генерується перед включенням катодного струму, тобто перед процесом наводнювання. Тому з огляду

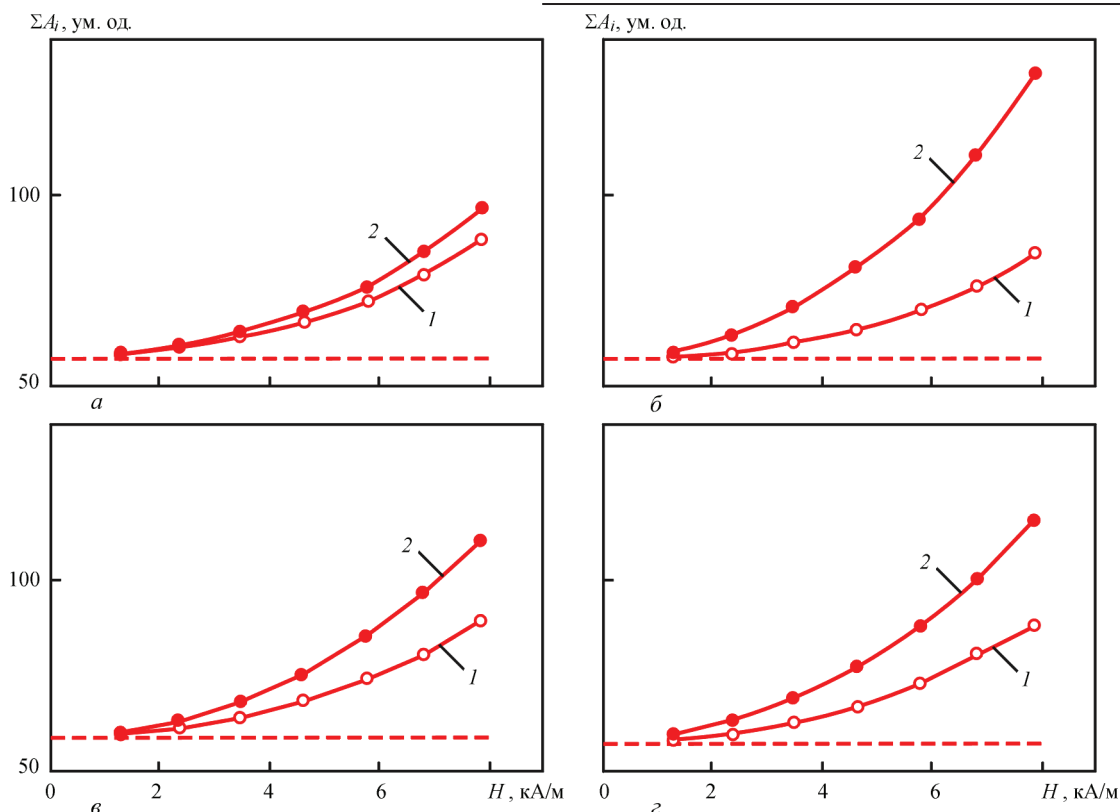


Рис. 7. Вплив напруженості перемагнечувального поля H_a на параметр ΣA_i для зразків до (крива 1) та після (крива 2) електролітичного наводнювання тривалістю 1,8 кс струмом, мА: а — 25; б — 50; в — 100; г — 150 (рівень шуму зображено пунктиром)

на досить високу відтворюваність сигналів МАЕ для вихідних зразків (перед початком наводнювання) цей струм можна вважати межею чутливості методу для катодного наводнювання металу.

В іншій серії дослідів, результати яких представлено на рис. 8, вивчали часову зміну параметра ΣA_i після включення струму наводнювання зразка для різних значень катодних струмів (ам-

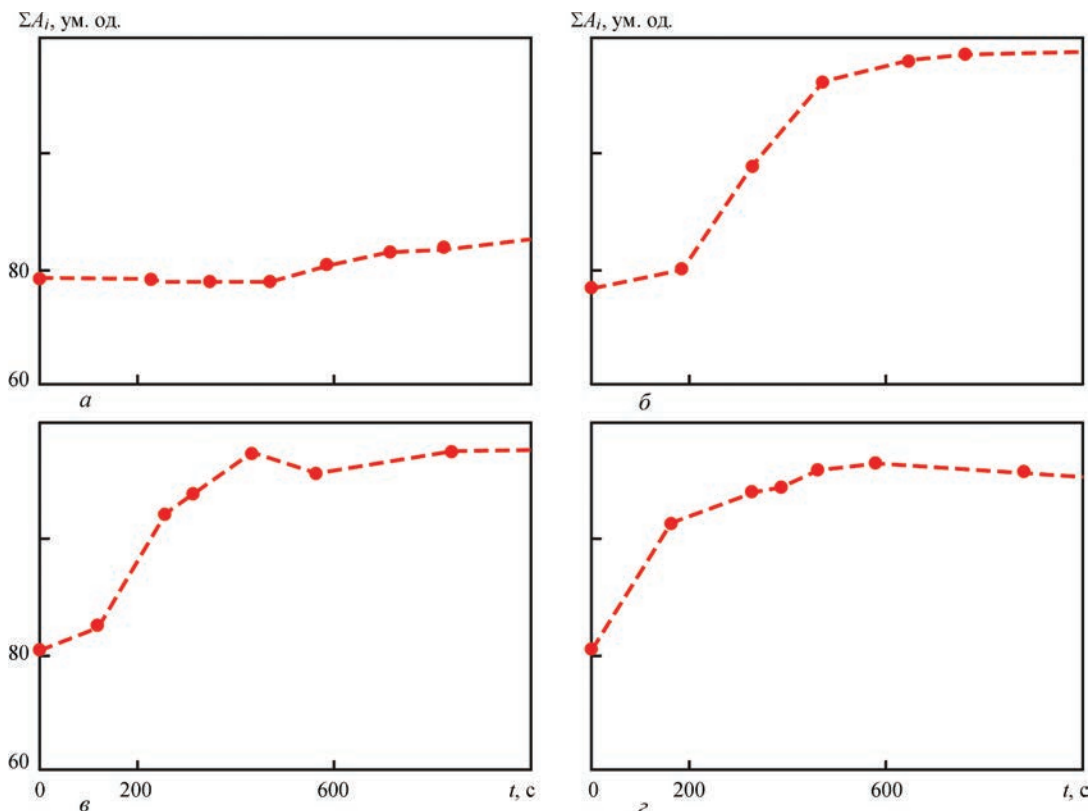


Рис. 8. Часова залежність параметра ΣA_i за електролітичного наводнювання струмом, мА: а — 25; б — 50; в — 100; г — 150

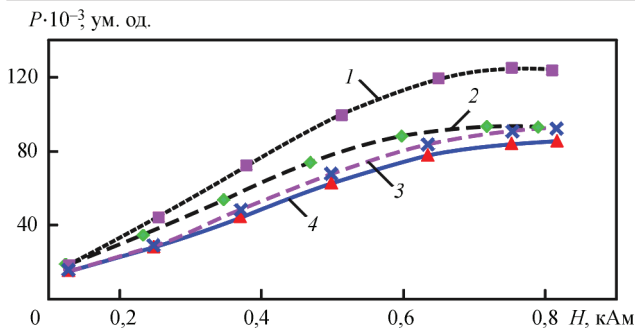


Рис. 9. Залежність потужності P сигналів МАЕ від зміни напруженості магнетного поля H соленоїда для зразків зі сталі 15 ($d = 2$ мм, $f = 9$ Гц) з різною концентрацією водню (наводнювання із газової фази): 1 — $C_H = 5,6$ ppm; 2 — 1,85; 3 — 1,1; 4 — 0,74 (вихідний матеріал)

плітуда перемагнечувального поля для всіх випадків була однаковою і складала $H_a = 6,8$ кА/м). У момент включення $t = 0$, параметр ΣA_i перебував у межах 76,6...80,6 (ум. од.), а вже через 0,4...0,8 кс досягав свого максимального значення.

На отриманих залежностях (рис. 8) тривалість перехідного процесу збільшується з величиною струму. Зауважимо, що для катодного струму 25 мА впродовж перших 0,47 кс рівень сигналу МАЕ є незмінним, аналогічно до сигналу, отриманого за відсутності катодного наводнювання. Відтак ΣA_i поступово наростає, досягаючи стаціонарного значення через приблизно 2,0 кс після включення струму. З наростанням струму прямування параметра ΣA_i до стаціонарного рівня пришвидшується. При цьому слід зазначити, що відтворюваність рівня сигналу МАЕ для стаціонарного наводнювання погіршується, що збігається з результатами, наведеними вище. Більше того, для струму $I_c = 150$ мА рівень сигналу МАЕ дещо зменшується після того, як досягне свого максимального значення (у момент $t = 0,58$ кс), знову ж підтверджуючи результати, отримані раніше.

Затримка процесу наростання ΣA_i після включення катодного струму, очевидно, зумовлена відновленням поверхневих оксигідроксидних плівок та створенням умов високої активності атомарного водню на поверхні металу. Час, необхідний для досягнення стаціонарного рівня сигналу МАЕ, є суттєво коротшим від того, який потрібний для наводнювання об'єму зразка діаметром 12 мм. Це може означати, наприклад, що лише приповерхневі шари металу є відповідальними за наростання сигналу МАЕ, або ж вступає в дію інше явище, яке пригнічує рівень сигналу з наводнюванням об'єму металу. Як і раніше, сигнал МАЕ суттєво знижується за умов пружного деформування заліза через магнетокристалічну анізотропію та під час пластичного деформування внаслідок збільшення дефектності його структури.

Для порівняння на рис. 9 показано результати перемагнечення зразків, які наводнювали з газової фази [3].

Порівнюючи отримані результати для електролітичного наводнювання з даними після наводнювання з газової фази, можна відзначити суттєво вищу чутливість параметрів МАЕ під час катодного наводнювання. Це можна пояснити роллю дифузійно рухливого водню в умовах електролізу та її відсутністю в експериментах із газоподібним наводнюванням. Об'єднуючи ці два методи, можна відокремити вплив рухливого та нерухливого водню на параметри сигналів МАЕ, але такі питання потребують подальшого вивчення.

Висновки

Застосування явища магнетоакустичної емісії може стати основою для нового високочутливого неруйнівного методу виявлення водню у конструкційних матеріалах. При цьому йдеться як про нерухливий водень, що утримується у пастках мікроструктури, так і про дифузійно-рухливий. Це явище дозволяє виявляти такі рівні наводнювання, котрі не викликають загрози короткотривалого впливу, але можуть бути суттєвим чинником деградування конструкційних матеріалів під час довготривалого експлуатування. Порівняно з вихідним станом металу зростання інтенсивності МАЕ залежить від концентрації абсорбованого металом водню — як електролітично, так і з газової фази.

Список літератури/References

1. Nazarchuk Z., Skalskyi V., Serhiyenko O. (2017) *Acoustic Emission. Methodology and Application*. Springer International Publishing AG, ISBN 978-3-319-49348-0.
2. Назарчук З. Т., Неклюдов І. М., Скальський В. Р. (2016) *Метод акустичної емісії в діагностуванні корпусів реакторів АЕС*. Київ, Наукова думка.
3. Nazarchuk, Z.T., Neklyudov, I.M., Skalskyi, V.R. (2016) *Method of acoustic emission in diagnostics of NPP reactor vessels*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
4. Назарчук З. Т., Андрейків О. С., Скальський В. Р. (2013) *Оцінювання водневої деградації ферромагнетиків у магнетному полі*. Київ, Наукова думка.
5. Nazarchuk, Z.T., Andrejkiv, O.E., Skalskyi, V.R. (2013) *Estimation of hydrogen degradation of ferromagnets in magnetic field*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
6. Skalskyi V., Stankevych O., DUBYTSKYI O. (2018) Estimation of effect of hydrogen on the parameters of magnetoacoustic emission signals. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 375–385.
7. Горкунов Э. С., Новиков В. Ф., Бахарев М. С., Яценко Т. А. (1997) Пьезомагнитный эффект остаточного намагниченного состояния сталей 45 и 60Г. *Новые материалы и технологии в машиностроении: Материалы региональной научно-технической конференции*. Тюмень, ТюмГНГУ, сс. 58–59.
8. Gorkunov, E.S., Novikov, V.F., Bakharev, M.S., Yatsenko, T.A. (1997) Piezomagnetic effect of residually-magnetized state of steels 45 and 60G. In: *Proc. of Regional Sci.-Tekhn. Conf. on New Materials and Technologies in Mechanical Engineering*. Tyumen, TyumGNGU, 58-59 [in Russian].
9. Beck W., Bockris J. O'M., McBeen J., Nanis L. (1966) Hydrogen permeation in metals as a function of stress,

- temperature and dissolved hydrogen concentration. *Proceedings of the Royal Society London A*, **290**, pp. 220–235.
7. Maccagno T. M., Ikeda–Cameron K., Jack T. et al. (1998) Hydrogen effects in gas transmission pipeline steels.

Proceedings of the International Pipeline Conference. New York, NY, ASME International, **1**, pp. 479–484.

Maccagno, T.M., Ikeda–Cameron, K., Jack, T. et al. (1998) Hydrogen effects in gas transmission pipeline steels. *In: Proc. of the Int. Pipeline Conf.* New York, ASME Intern., **1**, 479–484.

МАГНИТОАКУСТИЧЕСКОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ВОДОРОДНОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКОВ

З. Т. НАЗАРЧУК, В. Р. СКАЛЬСКИЙ

Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5.

E-mail: pminasu@ipm.lviv.ua

Проведены экспериментальные исследования для количественного установления изменения параметров сигналов магнитоупругой акустической эмиссии под влиянием структурных преобразований и степени наводороживания ферромагнитных материалов. Показано, что применение явления магнитоупругой акустической эмиссии может составлять основу для создания новых высокочувствительных неразрушающих технологий обнаружения водорода, полученного материалом за время длительной эксплуатации конструкций. Библиогр. 7, рис. 9.

Ключевые слова: неразрушающие технологии контроля, металлические конструкции, водородсодержащие среды, магнитоупругая эмиссия, параметры сигналов, повышение чувствительности

MAGNETOACOUSTIC DIAGNOSTICS OF HYDROGEN DAMAGE OF FERROMAGNETIC MATERIALS

Z.T. NAZARCHUK, V.R. SKALSKIY

H.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine. 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: pminasu@ipm.lviv.ua

The experimental investigations were carried out in order to quantitatively determine a change of parameters of signals of magnetoelastic acoustic emission under effect of structural transformations and level of hydrogenation of ferromagnetic materials. It is shown that application of a phenomenon of magnetoelastic acoustic emission can make a basis for development of the new high-sensitive non-destructive technologies for detection of hydrogen taken by material during long-term operation of structures. 7 Ref., 9 Fig.

Keywords: non-destructive testing technologies, metallic structures, hydrogen-containing media, magnetoelastic emission, parameters of signals, increase of sensitivity

Надійшла до редакції 18.06.2018

11-й Международный симпозиум «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы, сварка»

10–12 апреля 2019 г.

Минск, Беларусь

Организаторы:

Национальная академия наук Беларуси
Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии
Институт порошковой металлургии им. академика О. В. Романа
Государственный комитет по науке и технологиям Республики Беларусь
European Powder Metallurgy Association

Тематика симпозиума:

- Секция 1 «Порошковая металлургия: материалы, технологии, оборудование»
- Секция 2 «Новые композиционные материалы: проблемы получения и применение»
- Секция 3 «Инженерия поверхности»
- Секция 4 «Функциональные защитные покрытия: материалы, технологии, оборудование»
- Секция 5 «Передовые сварочные технологии, материалы и оборудование. Совершенствование нормативной базы»
- Секция 6 «Нanomaterialы и нанотехнологии»

Контакты: 220005, Беларусь, г. Минск, ул. Платонова, 41, Институт порошковой металлургии.
Тел. (017) 290-99-93, 290-95-64; факс (017) 292-82-42; E-mail: info50@mail.ru