## ДІАГНОСТУВАННЯ ПОШКОДЖЕНОСТІ ГУСЕНИЧНИХ ТРАКІВ ПРИ МЕХАНІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИМІРЮВАННЯ КОЕРЦИТИВНОЇ СИЛИ

#### О.П. Гопкало<sup>1</sup>, М.П. Земцов<sup>1</sup>, О.Є. Гопкало<sup>1</sup>, В.Є. Бодунов<sup>1</sup>, Г.Я. Безлюдько<sup>2</sup>, Р.М. Соломаха<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ, вул. Тимірязєвська, 2. E-mail: ips@ipp.kiev.ua <sup>2</sup>TOB «Спеціальні наукові розробки». 61184, м. Харків, а/с 12036

Отримані експериментальні результати випробувань гусеничних траків із аустенітної сталі типу Гадфільда на 4-х точковий згин підтвердили можливість застосування неруйнівного коерцитиметричного контролю для оцінки рівня навантаженості металу, який характеризує ступінь отриманих при цьому пошкоджень, за результатами вимірювання коерцитивної сили ( $H_c$ ). Завдяки ефекту різкої зміни значень коерцитивної сили при перевищенні напружень умовної межі плинності, яким відповідають порогові значенням  $H_c$  переходу від пружного до пластичного деформування, зникає необхідність у визначенні механічних характеристик міцності та пластичності металу, оскільки діагностування відносної навантаженності проводиться відносно умовної межі плинності. Проведено орієнтовну оцінку рівня навантаженості металу траків з використанням відомої залежності значень коерцитивної сили від напружень для аустенітної сталі AISI 304 та аналогічної гіпотетичної залежності для дослідженої сталі. Встановлено, що кожному етапу навантаження на 4-х точковий згин відповідає визначений рівень відносних напружень, які характеризують ступінь пошкоджень яметалу. Максимальний рівень отриманих пошкоджень приблизно відповідає напруженням межі міцності металу. Отримані результати добре узгоджуються з даними металографічних досліджень. Бібліогр. 6, табл. 1, рис. 10.

#### Ключові слова: гусеничні траки, структуроскоп, коерцитивна сила, пошкодження, напруження

У опублікованих статтях [1-6] були розглянуті особливості діагностування рівня отриманих пошкоджень за результатами вимірювання коерцитивної сили при механічному навантаженні у парамагнітній аустенітній сталі AISI 304 та у декількох феромагнітних сталях, які відрізняються фізичною природою реагування Н<sub>а</sub> на дані навантаження. Проведеними раніше експериментальними дослідженнями [6] були встановлені суттєві відмінності реагування коерцитивної сили на механічні навантаження феромагнітних та парамагнітних сталей. Так для феромагнітних сталей зміни значень коерцитивної сили при статичному та циклічному деформуванні пов'язані з упорядкуванням орієнтації доменної структури металу (від хаотичної до направленої). Для аустенітних парамагнітних сталей поява та зміни значень коерцитивної сили при статичному та циклічному деформуванні пов'язані з іншим фізичним явищем, а саме незворотними структурними перетвореннями вихідного аустеніту в деформаційний мартенсит, що викликає зміну магнітних властивостей металу від парамагнітного до феромагнітного. Внаслідок незворотних структурних перетворень, викликаних деформуванням, значення коерцитивної сили зберігаються у розвантаженому стані.

У даній роботі розглянуті питання діагностування рівня отриманих пошкоджень у конструктивних елементах (гусеничних траках) із аустенітної сталі типу Гадфільда (за ГОСТ 21357-87 вони маркуються як 110Г13Л) при їх навантаженні на 4-х точковий згин. Оскільки сталі даного типу є унікальними за механічними властивостями і суттєво відрізняються від інших, застосування коерцитиметричного контролю для оцінки отриманих пошкоджень при механічному навантаженні виробів є достатньо актуальним. Ця високопластична сталь з високим вмістом марганцю винайдена металургом Робертом Гадфільдом у 1882 р. Масова доля елеменів цієї високомарганцевої сталі наступна, %: Fe – 82, Mn – 11,5...15, C – 0,9...1,6, Si – 0,3...1, інші складові – до 5. Такий хімічний склад та аустенітна структура сталі обумовлюють як підвищену схильність до зміцнення, так і високу пластичність при деформуванні. Механічні властивості сталі:  $\sigma_{0,2} = 400$  МПа,  $\sigma_{b} = 800$  МПа,  $\delta_{\epsilon} = 25 \%, \Psi = 35 \%.$ 

Головна властивість сталі була виявлена при холодній ковці – твердість значно зростала у місцях нанесення удару молотом. Причому, чим більша при ковці деформація, тим твердішим ставав метал. Так була отримана сталь з унікальною здатністю нагартування, значно вищою, ніж для звичайних сталей з такою ж твердістю. Нагартування сталі Гадфільда пов'язане з миттєвим переходом аустеніту у мартенсит, який створює при ударі значні зусилля та обумовлює значне підвищення температури. Оскільки застосування обробки механічним різанням для отримання ви-

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

О.П. Гопкало, М.П. Земцов, О.Є. Гопкало, В.Є. Бодунов, Г.Я. Безлюдько, Р.М. Соломаха

робів із сталі типу Гадфільда неможливе, деталі з цієї сталі виготовляють виключно методом лиття або електроерозійною обробкою. Щоб підвищити механічні властивості та покращити структуру сталі, її піддають спеціальній термічній обробці – «аустенізації», яка полягає в нагріві до температури 1050...1100 °С для того, щоб в аустеніті розчинити карбіди, сульфіди, нітриди заліза та марганцю. Потім цю структуру фіксують, охолоджуючи у холодній проточній воді, температура якої не перевищує 30 °С в процесі усієї термічної обробки.

Через свої незвичайні властивості зі сталі типу Гадфільда виготовляють частини механізмів, рейкові хрестовини, стрілочні переводи, сердечники для прокатки труб, гусеничні траки, броньові листи, деталі дробарок, козирки землечерпальних машин та всі пристрої, де потрібна особлива стійкість до зношування при високому тиску, ударних навантажень та стирання. У 20-х р. 20 ст. з неї почали виготовляти траки для танків, які піддаються найбільшому впливу стирання при пересуванні важких машин. Виготовлення з цієї сталі траків дозволили збільшити пробіг техніки без ремонту гусениць або їх заміни майже в 10 разів (з 500 км до 4800 км).

У зв'язку з відсутністю даних про реагування коерцитивної сили на механічні навантаження конструктивних елементів, виготовлених зі сталі типу Гадфільда із унікальними механічними властивостями, були проведені відповідні експериментальні дослідження.

Мета роботи полягає в експериментальній перевірці можливості діагностування отриманих пошкоджень в металі гусеничних траків, виготовлених із сталі типу Гадфільда (на далі типу Г13ЛА), в процесі випробувань на 4-х точковий згин шляхом використання одного із методів неруйнівного контролю – інструментального вимірювання змін значень коерцитивної сили при навантаженні. Дослідженню підлягали експериментальні зразки траків.

Методика експериментальних досліджень. Випробування траків у вихідному стані на 4-х точковий статичний згин проводили на розривній машині ZD-40 згідно стандарту 613.ТУЗ «Технические условия на изготовление отливок из стали марки Г13ЛА». Навантаження проводили як у площині траку, так і по дотичній до неї згідно схем на рис. 1. Перше навантаження зусиллям P1 = 300 кН проводили у площині траку (рис. 1, *a*). Якщо після такого навантаження ознак втрати суцільності металу (появи тріщин) не виявлено, незважаючи на наявність залишкових деформацій, то трак навантажували зусиллям P2 = -300 кН (у протилежному напрямку прикладання зусиль відносно першого навантаження (рис. 1,  $\delta$ )). Наступне навантаження на зріз при 4-х точковому прикладанні зусиль після попередніх навантажень проводили по дотичній до площини траку зусиллям P3 = 240 кН (рис. 1, *в*).

В умовах експлуатації на трак діють зусилля від катків, які урівноважуються тиском грунту. У даному випадку схема навантаження траку відповідає 4-х точковому згину. При експлуатації відбувається деформування та нагартування поверхневих шарів металу, у тому числі від контактних напружень, включаючи тяговий гребінь траку, на який передаються зусилля провідної шестерні приводу та бокові зусилля від катків підвіски. При випробуваннях на згин має місце неоднорідний напружено-деформований стан виробу і найбільш деформованими є поверхневі шари металу.

Вимірювання значень коерцитивної сили на поверхні траків у характерних точках проводили структуроскопом КРМ-Ц-К2М (розробник ТОВ «Спеціальні наукові розробки», м. Харків). Оскільки для зменшення ваги траки мають внутрішню порожнину (при товщині металу 4-5 мм), складну геометрію поверхні та можливість нагартування поверхневих шарів металу в умовах експлуатації, то для вимірювання значень коерцитивної сили використовували малогабаритний датчик (D12), який має базу вимірювання 12×12 мм та глибину намагнічування до 1 мм. Використання такого датчика дозволяє проводити вимірювання значень коерцитивної сили в дуже обмежених локальних ділянках траку, який має достатньо складну геометрію поверхні. Вимірювання значень коерцитивної сили полягає в попередньому намагнічуванні металу до насичення з наступним повним розмагнічуванням і подальшим намагнічуванням магнітним полем протилежної полярності для нейтралізації залишкового магнетизму та вимірювання значень Н. Тривалість циклу визначення значень коерцитивної сили складає 10 с. Слід зазначити, що при наявності анізотропії структури металу, у тому числі після пластичного



Рис. 1. Загальний вигляд траку та схема його навантаження



Рис. 2. Загальний вигляд траку, де зазначені номери точок для вимірювання значень коерцитивної сили: *а* – площина траку зі сторони гребня; *б* – площина траку з протилежної сторони від гребня

деформування, зміна орієнтації полюсів магнітів датчика відносно досліджуваної поверхні впливає на виміряну величину коерцитивної сили. Оскільки величина коерцитивної сили залежать від напрямку орієнтації полюсів магнітів датчика відносно поверхні металу, вимірювання значень  $H_c$  проводили у двох взаємно перпендикулярних напрямках:  $H_{cII}$  поперек траку (вздовж гусениці) та  $H_{cI}$  – вздовж траку (поперек гусениці).

Вимірювання значень коерцитивної сили структуроскопом не потребує будь-якої підготовки досліджуваної поверхні. Наприклад, при використання датчика D65 (база вимірювання 65 мм та глибина намагнічування до 30 мм) допускається загальна товщина лакофарбових та захисних покриттів до 6 мм.

Результати експериментальних досліджень та їх аналіз. Випробуванню на 4-х точковий згин підлягали два траки № 7 та № 8 однієї плавки. На рис. 2 приведено загальний вигляд траку до випробувань та зазначені номера точок для вимірювання значень коерцитивної сили.

На відміну від аустенітної сталі AISI 304, яка у вихідному стані не проявляє магнітних властивостей ( $H_c = 0$ ), проведені дослідження траків зі сталі типу Г13ЛА показали, що метал проявляє магнітні властивості у вихідному стані (без навантаження) і достатньо високі значення коерцитивної сили у різних точках поверхні. На рис. З приведені епюри в абсолютних значеннях коерцитивної сили в різних точках вимірювання  $H_c$  траків № 7 та № 8 у вихідному стані (у стані поставки, P = 0) та після випробувань (P1, P2 та P3) на 4-х точковий згин.

Суттєві відмінності розподілу значень коерцитивної сили по поверхні литого траку у вихідному стані у межах 16...60 та 14...40 А/см для траків № 7 та № 8 відповідно вказують на неоднорідність його структурного стану. Слід зазначити, що на розкид значень коерцитивної сили по поверхні литого траку при такому неоднорідному структурному стані впливає, в першу чергу, точність позиціювання датчика при кожному вимірюванні  $H_c$ , вплив геометрії поверхні литої структури металу, при даних габаритах датчика 12×12 мм з глибиною намагнічування до 1 мм. Для виробів, отриманих шляхом лиття, характерна суттєва неоднорідність його структурного стану, який покращують наступною термомеханічною обробкою. Найбільш гомогенними вважаються ковані вироби.

Для литої структури металу траків у вихідному стані максимальні відмінності значень коерцитивної сили в двох взаємно перпендикулярних напрямках складають 28 %. Значення коерцитивної сили в різних точках вимірювання на поверхні траків відрізняються у 3,75 рази. Дана обставина вказує на суттєві відмінності структурного стану металу як на різних ділянках траків, так і в двох взаємно перпендикулярних напрямках. Наприклад, для металу прокату максимальні відмінності значень коерцитивної сили в двох взаємно перпендикулярних напрямках можуть складати до 10 %. Деякі відмінності характеру розподілу значень коерцитивної сили по ширині порожнистого траку ймовірно пов'язані зі складною геометрією форми траку (можливо, різною товщиною стінки). При глибині намагнічування металу траку датчиком D12 в 1 мм наявність пошкоджень металу у вигляді слідів від наждачного каменю зачистки поверхні траку та нерівності литої структури металу теж впливають на значення коерцитивної сили. Отримані результати дають підстави застосовувати для подібних досліджень більш потужний датчик D27 з базою вимірювання 22×27 мм та глибиною намагнічування до 4 мм, що дозволить отримувати інтегральні значення коерцитивної сили із значно більшого об'єму деформованого металу, тим самим зменшуючи розкид значень вимірів коерцитивної сили та підвищуючи достовірність отриманих результатів. Слід зазначити, що використання для повторного вимірювання значень коерцитивної сили на поверхні траку № 8 структуроскопу з датчиком D27, який має базу 27 мм з глибиною намагнічування до 4-х мм, зменшує розкид даних при багаторазових вимірах, причому ці дані мало відрізняються від тих, що отримані при використанні датчика D12 з базою 12 мм та глибиною намагнічування до 1 мм.

На рис. 4 приведені відносні значення коерцитивної сили в досліджених зонах після навантаження зусиллями Р1, Р2 та Р3 на 4-х точковий згин траків  $\mathbb{N}$  7 (*a*, *e*, *d*) та  $\mathbb{N}$  8 (*б*, *c*, *e*). Характер розподілу відносних значень коерцитивної сили по ширині траку нагадує епюру моментів при навантаженні на 4-х точковий («чистий») згин. На рис. 5 приведені епюри у відносних значеннях коерцитивної сили по поверхні траків № 7 (*a*) та № 8 ( $\delta$ ) при навантаженні на 4-х точковий згин зусиллям Р1, Р2 та Р3. Розподіл відносних значень коерцитивної сили по довжині траку знаходиться у повній відповідності з навантаженням на 4-х точковий згин (див. рис. 4). Точкам прикладання зусиль відповідають великі значення коерцитивної сили.

Окремо слід відзначити участь конструктивного елемента тягового гребня в точках вимірювання 5, 6, 7, 8 траків у сприйманні зусиль Р1, Р2 та Р3. На рис. 6 приведені епюри в абсолютних значеннях коерцитивної сили по поверхні тягового гребня в точках вимірювання траків  $\mathbb{N}$  7 (*a*, *e*, *d*, *ж*) та  $\mathbb{N}$  8 (*б*, *c*, *e*, *s*) у вихідному стані (*a*, *б*) та після навантаження зусиллями Р1 (*e*, *c*), Р2 (*d*, *e*) та Р3 (*ж*, *s*) на 4-х точковий згин.

На рис. 7 приведені закономірності реагування коерцитивної сили на навантаження зусиллям P1, P2, P3 металу тягового гребня в точках вимірювання траків  $\mathbb{N} 7(a)$  та  $\mathbb{N} 8(b)$ . Аналіз даних свідчить про те, що кожне наступне навантаження змінює значення  $H_c$ , яке відображає відносне навантаження металу в найбільш навантажених точках тягового гребня траків.

Аналіз результатів вимірювання значень коерцитивної сили в досліджених точках траків при розглянутих навантаженнях показав, що тяговий гребінь теж сприймає вагому частину навантажень. Про це свідчать високі значення коерцитивної сили, особливо в зоні точки 7, які сумірні з аналогічними величинами в інших розглянутих точках як у площині траку, так і в дотичній до неї. Так для траку № 7 в точці 7 тягового гребня максимальні значення коерцитивної сили на 17 % перевищують аналогічні величини у інших найбільш навантажених точках траку. А для траку № 8 у точці 7 тягового гребня максимальні значення коерцитивної сили складають тільки 85 % від аналогічних величин в інших точках траку.

Як зазначалось раніше [1, 2], для аустенітних сталей при будь-якому (статичному чи циклічному, у тому числі знакозмінному «м'якому», «жорсткому» та контактному) механічному навантаженні зростання значень коерцитивної сили пов'язане з перерозподілом співвідношення долі аустеніту та мартенситу в процесі деформування. Експериментально було встановлено, що трансформація аустеніту в деформаційний мартенсит при навантаженні починає відбуватися при перевищені напружень межі витривалості і подальше підвищення яких викликає досить суттєве зростання значень коерцитивної сили аж до настання руйнування. На рис. 8, а приведена залежність значень коерцитивної сили від рівня діючих відносних напружень у зразку із сталі AISI 304 при

циклічному розтязі. Найбільш інтенсивне зростання значень коерцитивної сили відбувається при напруженнях, які перевищують умовну межу плинності. З отриманих даних випливає, що напруженням умовної межі плинності відповідають значення коерцитивної сили приблизно в 1 А/см. Тобто пружне деформування аустенітних сталей відбувається у діапазоні зміни значень коерцитивної сили 0...1 А/см. Подальше інтенсивне зростання значень коерцитивної сили пов'язане з суттєвим зростанням долі мартенситу в аустенітній сталі при пластичному деформуванні. Таким чином, при моніторингу коерцитиметричним контролем поверхні виробів із аустенітних сталей перевищення значень коерцитивної сили в 1 А/см відносно попередніх вимірів вказує на наявність ознак пластичного деформування. Слід звернути увагу, що для аустенітної сталі AISI 304 на ділянці зміцнення ( $\sigma_b = 1,44\sigma_{0,2}$ ) відповідає певна траєкторія змін значень коерцитивної сили. Для сталі типу Г13ЛА на ділянці зміцнення ( $\sigma_b = 2,0\sigma_{0,2}$ ) буде відповідати інша траєкторія змін значень коерцитивної сили, але порогові значення Н<sub>с</sub> переходу від пружного до пластичного деформування можуть відрізнятись не суттєво. Але оскільки співвідношення значень коерцитивної сили при пружному та пластичному деформуванні досить значні, то для приблизної оцінки технічного стану металу конструкцій із аустенітних сталей можна з певною похибкою приймати за порогові значення переходу від пружного до пластичного деформування значення  $H_c = 1$  А/см. При оцінці технічного стану конструкцій із аустенітних сталей з використанням коерцитиметричного контролю завдяки ефекту різкої зміни значень коерцитивної сили при перевищенні напружень умовної межі плинності, яким відповідають порогові значенням Н<sub>2</sub>, зникає необхідність у визначенні механічних характеристик міцності та пластичності металу, оскільки діагностування відносної навантаженності проводиться відносно умовної межі плинності.

Для діапазону малоциклової втоми, включаючи розтяг, для оцінки напружено-деформованого стану в розглянутих точках на поверхні траку необхідно мати діаграму розтягу із визначеними залежностями  $H_c$  від діючих напружень та отриманих при цьому деформацій. Оскільки для сталі типу Г13ЛА, з якої були виготовлені досліджувані траки, відсутні діаграми розтягу з залежностями  $H_c$  від напружень та відповідних деформацій, для прикладу в даній роботі для оцінки напружено-деформованого стану були використані діаграми розтягу для аустенітної сталі AISI 304 (див. рис. 8, *a*). Згідно з таким підходом для траку № 7 максимальні значення коерцитивної сили, наприклад, в точці 3 складали 14 А/см (див. рис. 4, *a*), що відповідає згідно з діаграмою на рис. 8, а відносним напруженням 1,18 <sub>б</sub> / <sub>б</sub> / <sub>д</sub>. Для траку № 8 максимальні значення коерцитивної сили в точці 20 складали 23,5 А/см (див. рис. 4, б), що відповідає згідно з діаграмою на рис. 8, а відносним напруженням 1,25  $\sigma_i / \sigma_{0,2}$ . Якщо для сталі типу Г13ЛА побудувати гіпоте-

тичну діаграму розтягу, базуючись на даних щодо



Рис. 4. Відносні значення коерцитивної сили у досліджених зонах після навантаження зусиллями Р1, Р2 та Р3 на 4-х точковий згин траків № 7 (*a*, *e*, *d*) та № 8 (*б*, *г*, *e*)





Рис. 3. Епюри в абсолютних значеннях коерцитивної сили в різних точках вимірювання траків № 7 (а, в, д, ж) та № 8 (б, г, е, з) у вихідному стані (у стані поставки,  $P = 0, a, \delta$ ) та після випробувань (P1, *в*, *г*; P2, *д*, *е* та P3, *ж*, *з*) на 4-х точковий згин



Рис. 5. Епюри у відносних значеннях коерцитивної сили по поверхні траків № 7 (*a*, *e*, *d*) та № 8 (*б*, *c*, *e*) після навантаження зусиллям Р1, Р2 та Р3 на 4-х точковий згин



механічних властивостей цієї сталі, відомих з літературних джерел, та при припущенні, що закономірності реагування коерцитивної сили на механічне навантаження аналогічні для аустенітної сталі AISI 304, то діаграма матиме вигляд, представлений на рис. 8, б. Тоді, при використанні цієї гіпотетичної залежності, максимальним значенням коерцитивної сили 14 А/см в точці 3 траку №



Рис. 7. Закономірності реагування коерцитивної сили на навантаження зусиллям Р1, Р2, Р3 в точках вимірювання тягового гребня траків № 7 (*a*) та № 8 (б)

7 відповідатиме відносне напруження 1,45  $\sigma_i / \sigma_{0,2}$ . Для траку № 8 максимальні значення коерцитивної сили в точці 19 складали 23,5 А/см, що відповідає відносним напруженням 1,71  $\sigma_i / \sigma_{0,2}$ . Але для більш точного визначення рівня діючих відносних напружень та величини накопиченої при цьому деформації необхідно провести випробування на розтяг та отримати відповідні залежності коерцитивної сили від даного навантаження.

Для оцінки отриманих в процесі експлуатації пошкоджень металу в найбільш навантажених ділянках виробів із аустенітних сталей можна скористатись розробленим раніше підходом [1, 2], згідно з яким при моніторингу структурного стану металу виробів для оцінки ступеня їх пошкодження слід звертати увагу не на максимальні значення коерцитивної сили, а на кінетику процесу. По мірі статичного або циклічного напрацювання залежність коерцитивної сили від накопичених пошкоджень має висхідні і низхідні ділянки. Ділянці зростання значень коерцитивної сили відповідає стадія зародження тріщин, а ділянці зниження їх значень - стадія розвитку тріщин внаслідок втрати суцільності металу при утворенні несуцільностей (пор та тріщин). Таким чином, при моніторингу коерцитиметричним контролем кінетики процесу змін значень коерцитивної сили у найбільш навантажених ділянках конструкцій в умовах експлуатації можна визначати стадії накопичення пошкоджень з визначенням залишкового ресурсу.

Використання запропонованого підходу для умов малоциклового навантаження, включаючи статичний розтяг, дозволяє проводити оцінку рівня навантаженості та отриманих пошкоджень в будь-якій точці виробів шляхом вимірювання значень коерцитивної сили.

Для оцінки структурного стану металу двох гусеничних траків  $\mathbb{N}_{2}$  7 та  $\mathbb{N}_{2}$  8 після випробувань було проведено вирізку ідентичних фрагментів металу в найменш навантаженій зоні 13 (див. рис. 2, *a*) з подальшим металографічним дослідженням шліфів (надалі зразки  $\mathbb{N}_{2}$  7 та  $\mathbb{N}_{2}$  8).

Макро- та мікроструктурний аналіз поверхні досліджуваних зразків траків виявив як спільні, так і відмінні риси структури металу.

Для обох зразків навіть на макрорівні були виявлені різні за травимістю зони (зони А і Д на рис. 9), кожна з яких характеризується відповідною мікроструктурою з різним рівнем неоднорідності. Слід відмітити, що зональна неоднорідність зразків була виявлена спочатку травленням зразків в ніталі (4%-й розчин HNO<sub>3</sub> в етиловому спирті), коли протравилась тільки зона Д (на відміну від зони А), а після переполіровки зразків і травлення на структуру травником для аустенітних сталей («царська горілка» (HNO<sub>3</sub> (25 мл) : HCl (75 мл)) виявили структуру в обох зонах, але при цьому ступінь травимості зон значно відрізнялася (рис. 9).

Найбільш типові фрагменти мікроструктури зразків № 7 та № 8 представлені на рис. 10.

За результатами макро- та мікроструктурного аналізу можна відмітити головне – спільним для структури обох зразків є:

 наявність зональної неоднорідності, що виявляється хімічним травленням (зони А і Д) та характеризується різними мікроструктурами в відмічених зонах (рис. 9);

– наявність в приповерхневій зоні Д ознак мікропластичної деформації (рис. 10, в) та присутність (в початково аустенітних зернах) мартенситної фази (рис. 10, г–е), яка обумовлює виникнення феромагнітних властивостей в матеріалі траків;

 в цілому мікроструктура зразків представляє аустеніт, якщо не брати до уваги присутність в окремих аустенітних зернах мартенситу (в зоні Д).

Мікроструктура зразка №8 істотно відрізняється від мікроструктури зразка № 7 за такими параметрами:

– в зразку № 8, на відміну від зразка № 7, виявлено ділянки з мікропорами різної щільності (рис. 10, a,  $\delta$ ) ливарного походження;

– макро- та мікроструктура зразка № 8, як в зоні Д, так і в зоні А більш гомогенна, за виключенням локальних ділянок з підвищеною пористістю, яка ідентифікувалась на полірованій поверхні шліфа навіть без хімічного травлення (рис. 10, *a*);

 структура зразка № 8 характеризується, на відміну від зразка № 7, загально меншими розмірами аустенітних зерен (2-3 бал);  – в зразку № 8 лінії ковзання присутні і в окремих аустенітних зернах зони А на відміну від зразка № 7;

– в зразку № 8, як і в зразку № 7, присутні неметалеві включення, але, на відміну від зразка № 7, вони більші за розмірами і пріоритетно розміщені на границях аустенітних зерен;



Рис. 8. Залежність значень коерцитивної сили від рівня діючих відносних напружень у зразку зі сталі AISI 304 (*a*) та гіпотетична діаграма розтягу для сталі типу Г13ЛА (*б*)



Рис. 9. Макроструктура зразків (в зоні 13) траків № 7 (*a*) та № 8 (б) після травлення у травнику «царська горілка»



Рис. 10. Фрагменти мікроструктури зразків № 7 (*e*) та №8 (*a*–*d*): мікропори виявлені на нетравленій (*a*) та травленій на мікроструктуру (*б*) поверхні; лінії ковзання та двійники в аустенітних зернах (зона Д) (*e*); мартенсит в початково аустенітних зернах (*c*, *e*) та в двійникових пластинах (*d*)

# Значення мікротвердості металу у досліджених зонах траків

Номер	Мікротвердість, HV <sub>0,1</sub> , кг/мм <sup>2</sup>	
зразка	зона А	зона Д
№ 7	200270	400550
№ 8	224262	445539

– в зразку № 8 аустеніт зеренної морфології та дендрити лиття відсутні на відміну від зразка № 7, де аустеніт характеризується зеренно-дендритною морфологією в зоні Д.

Проведені дюрометричні дослідження виявили суттєві відмінності значень мікротвердості у досліджених зонах А і Д металу обох траків, що опосередковано підтверджують появу феромагнітного мартенситу (див. таблицю) в зоні Д обох траків.

Таким чином, наявність магнітних властивостей металу обох траків обумовлена транформацією частини зерен парамагнітного аустеніту в феромагнітний мартенсит. Відмінності в максимальних значеннях коерцитивної сили трака № 8 (40 А/см) та трака № 7 (60 А/см) можна пояснити частковою втратою суцільності металу траку № 8 у вигляді пор ливарного походження, що суттєво знижує максимальні значення коерцитивної сили [1, 2] на відміну від металу траку № 7, де пори не виявлено.

Порівняння структурного стану металу, оціненого величиною коерцитивної сили, еталонного траку № 1 та досліджених № 7 та № 8 показали суттєві відмінності значень Н. Так у найменш навантажених зонах обох траків у вихідному стані мінімальні значення коерцитивної сили складали приблизно 17,0 А/см. Тоді як у еталонному траку навіть після випробувань значення коерцитивної сили у цих зонах знаходились в межах 1.0 А/см. Низьким значенням коерцитивної сили відповідає малий вміст мартенситу в аустенітній сталі. Дана обставина може стати обґрунтуванням запровадження коерцитиметричного контролю якості термічної обробки виробів в процесі їх «аустенізації» шляхом оцінки структурного стану металу за результатами вимірів коерцитивної сили. В умовах експлуатації застосування коерцитиметричного моніторингу поверхні таких виробів дозволить контролювати їх технічних стан та оцінювати залишковий ресурс.

#### Висновки

Приведено приклад діагностування неруйнівним методом контролю рівня навантаженності та отриманих пошкоджень за вимірами коерцитивної сили у розглянутих точках гусеничних траків із сталі типу Г13ЛА при їх випробуваннях на 4-х точковий згин.

Характер розподілу відносних значень коерцитивної сили по поверхні траків після навантаження знаходиться у повній відповідності з прикладеними зусиллями при випробуваннях та параметром відносного навантаження, який характеризує величини отриманих пошкоджень в досліджених точках.

Аналіз результатів вимірювання значень коерцитивної сили в досліджених точках траків при розглянутих навантаженнях показав, що тяговий гребінь теж сприймає вагому частину навантажень.

Для діапазону малоциклової втоми, включаючи статичний розтяг, для оцінки напружено-деформованого стану найбільш навантажених ділянок виробів шляхом вимірювання значень коерцитивної сили необхідно провести випробування на розтяг лабораторних зразків з визначенням інструментальним методом залежності  $H_c$  від діючих напружень та отриманих при цьому деформацій.

Оскільки вироби зі сталі типу Г13ЛА підлягають спеціальній термічній обробці («аустенізації») для розчинення в аустеніті карбідів, сульфідів, нітридів заліза та марганцю, використання дуже простого неруйнівного методу коерцитиметричного контролю дозволить проводити оцінку якості їх структурного стану. Тобто, запровадження коерцитиметричного контролю дозволить контролювати наявність мартенситу і пор у відливках та якість термічної обробки. Шляхом коерцитиметричного моніторингу поверхні виробів в умовах експлуатації з'являється можливість контролювати їх технічний стан та оцінювати залишковий ресурс.

Металографічними дослідженнями встановлено зв'язок особливостей структури металу досліджених траків як з виникненням феромагнітних властивостей, так і зі зміною абсолютних значень коерцитивної сили.

#### Список літератури

- Гопкало О.П, Нехотящий В.О., Безлюдько Г.Я., Кураш Ю.П. (2019) Діагностування пошкодженості аустенітної сталі AISI 304 при механічному навантаженні по вимірах коерцитивної сили. Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 4, 12–24.
- 2. Gopkalo, O., Bezlyudko, G., Nekhotiashchiy, V. et al. (2020) Damage evaluation for AISI 304 steel under cyclic loading based on coerciveforce measurements. *Int. J. Fatigue*, 139.
- 3. 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.П., Безлюдько Г.Я., Котляренко А.А. та ін. (2020) Діагностування пошкодженості феромагнітних сталей при механічному навантаженні за результатами вимірювання коерцитивної сили. Технічна діагностика і неруйнівний контроль, 2, 13–21.
- Юхимець П.С., Гопкало О.П., Безлюдько Г.Я. та ін. (2020) Із досвіду використання неруйнівних методів контролю для оцінки технічного стану аварійної ділянки трубопроводу. Там само, 3.
- 6. 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 Journal of TNTU. Tern., TNTU*, 89, 1, 19–32. (Mechanics and materials science).

#### НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

#### References

- Gopkalo, O.P., Nekhotiashchiy, V.O., Bezlyudko, G.Ya., Kurash, Yu.P. (2019) Diagnosis of damage in austenitic steel AISI 304 at mechanical loading by measurements of coercive force. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 12–24 [in Ukrainian].
- Gopkalo, O., Bezlyudko, G., Nekhotiashchiy, V., Gopkalo, O.Ye., Kurash, Yu. (2020) Damage evaluation for AISI 304 steel under cyclic loading based on coercive force measurements. *Int. J. Fatigue*, Vol. 139.
- Gopkalo, A.P., Bezlyudko, G.Ya., Nekhotiashchiy, V.O. (2017) On expert evaluation of damage of steel AISI 304 at static and cyclic loading by measurements of coercive force. *V Mire Nerazrushayushchego Kontrolya*, St.-Petersburg, Vol. 20, 45–51 [in Russian].
- Gopkalo, O.P., Bezlyudko, G.Ya., Kotlyarenko, A.A., Kurash, Yu.P., Solomakha, R.M. (2020) Diagnosis of damage to ferromagnetic steels during mechanical loading by results of measurements of coercive force. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, 2, 13–21 [in Ukrainian].
- Gopkalo, O.P., Yukhymets, P.S., Bezlyudko, G.Ya., Solomakha, R.M., Nekhotiashchiy, V.O. (2020) From the experience of using non-destructive control methods to assess the technical condition of the pipeline emergency section. *Tekh. Diagnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **3**, 30–36 [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*. 89(1), 19–32. (Mechanics and materials science).

### DIAGNOSIS OF DAMAGE TO CATERPILLAR TRACKS UNDER MECHANICAL LOADING BASED ON THE RESULTS OF MEASUREMENTS OF THE COERCIVE FORCE

O.P. Gopkalo<sup>1</sup>, M.P. Zemtsov<sup>1</sup>, O.Ye. Gopkalo<sup>1</sup>, V.Ye. Bodunov<sup>1</sup>, G.Ya. Bezlyudko<sup>2</sup>, P.M. Solomacha<sup>2</sup>

<sup>1</sup>G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of NASU. 2 Timiryazevska Str., 01014, Kyiv, Ukraine. E-mail: ips@ipp.kiev.ua <sup>2</sup>LLC «Special Scientific Developments», P.O. box 12036, 61184, Kharkiv, Ukraine

Obtained experimental results of 4-point bend tests of caterpillar tracks made of austenitic steel of Gadfield type confirmed the possibility of using non-destructive coercimetric testing to assess the level of metal loading, which characterizes the degree of damage, by measuring coercive force  $(H_c)$ . Due to the effect of a sharp change in the values of the coercive force when stresses of the conditional yield stress are exceeded, which correspond to threshold values of  $H_c$  for the transition from elastic to plastic deformation, there is no need to determine the mechanical characteristics of strength and plasticity of the metal, since diagnosis of the relative loading is carried out with respect to the conditional yield stress. An approximate estimate of the level of loading of tracks metal was performed using the known dependence of the values of coercive force on stresses for austenitic steel AISI 304 and a similar hypothetical dependence for the studied steel. It is established that each stage of 4-point bend loading corresponds to a certain level of relative stresses that characterize the extent of metal damage. The maximum level of sustained damage roughly corresponds to the stress limit of the metal. The results obtained are in good agreement with the data of metal-lographic studies. 6 Ref., 1 Tabl., 10 Fig.

Keywords: caterpillar tracks, structuroscope, coercive force, load, damage, stress

Надійшла до редакції 23.11.2020

