

ЕКСПРЕСНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ГУСЕНИЧНИХ ТРАКІВ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ВИМІРЮВАННЯ КОЕРЦИТИВНОЇ СИЛИ

О.П. Гопкало¹, О.Є. Гопкало¹, М.П. Земцов¹, Є.В. Коваленко², В.Є. Бодунов¹

¹Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України. 01014, м. Київ, вул. Тимірязєвська, 2. E-mail: apg@ipp.kiev.ua
²ТОВ «АВП Авіаційні Системи України». 01015, м. Київ, вул. Редутна, 8. E-mail: spc.asu.LTD@gmail.com

Коерцитиметричним контролем встановлено суттєві відмінності структури металу в приповерхневому шарі експериментальних гусеничних траків. Отримані експериментальні результати випробувань на 4-х точковий згин експериментальних гусеничних траків зі сталей, що дещо відрізняються за своїм хімічного складом, підтвердили можливість застосування неруйнівного коерцитиметричного контролю для оцінки початкового структурного стану та рівня навантаженості металу, який характеризує ступінь отриманих пошкоджень після навантаження. Метал якісного траку зі сталі типу 110Г13Л у вихідному стані має нульові значення коерцитивної сили, що забезпечується оптимальним структурним станом металу. Дана обставина може стати обґрунтуванням запровадження коерцитиметричного контролю для експресної оцінки якості відливок та їх термічної обробки. Бібліогр. 7, табл. 4, рис. 10.

Ключові слова: гусеничні траки, структуроскоп, коерцитивна сила, структурний стан

Вступ. Механічні властивості металу виробів залежать від його хімічного складу та структурного стану. У даній роботі використовували неруйнівний магнітний метод оцінки якості структурного стану металу експериментальних гусеничних траків з аустенітної сталі типу Гадфільда (з певними відхиленнями хімічного складу) як у вихідному стані, так і після стандартного випробування на 4-х точковий згин за результатами вимірювання коерцитивної сили. Коерцитивна сила – це інтегральна характеристика структурного стану металу, яка залежить від вмісту та концентрації хімічних елементів у металі та фазових і структурних складових.

У табл. 1 наведено хімічний склад сталі типу Гадфільда (марка сталі 110Г13Л згідно з ДСТУ 8781:2018).

Сталь 110Г13Л має типові для аустенітних сталей високу в'язкість і пластичність при досить великій міцності. При низькій твердості сталь 110Г13Л має надзвичайно високу зносостійкість при терті з тиском і ударами. Це пояснюється зміцненням (наклепом) аустеніту при пластичній деформації в процесі роботи, тобто ця сталь має підвищену здатність до наклепу (значно більше, ніж у звичайних сталей з такою ж твердістю). Наявність значного запасу пластичності сталі 110Г13Л дозволяє здійснювати перерозподіл напружень найнавантажених ділянок траку, що забезпечує високу цілісність виробу.

У результаті наклепу збільшується опір до зношування, тому сталь 110Г13Л важко обробляється різальними інструментами та деталі з неї найчастіше виготовляють литвом без механічної обробки. В умовах чисто абразивного зношування (наприклад, при терті по піску) ефективного наклепу сталі 110Г13Л не відбувається, що призводить до підвищеного зношування деталей. У зв'язку з унікальними механічними властивостями сталь 110Г13Л знайшла широке застосування для виготовлення зносостійких деталей машин.

Мета роботи полягає в експериментальній перевірці можливості застосування коерцитиметричного контролю для експресної оцінки якості виготовлення гусеничних траків.

Вплив хімічного складу та структурного стану на механічні властивості сталі 110Г13Л. Незважаючи на те, що міцність, пластичність і зносостійкість високомарганцевих сталей у значній мірі визначаються ДСТУ та технічними умовами різних постачальників, допускаються досить широкі коливання вмісту в металі навіть таких основних легуючих елементів, як С, Mn, Si, S, P, що явно не виправдано [1]. Для підвищення зносостійкості відливок зі сталі 110Г13Л допускається її легування титаном (до 0,05 %), ванадієм (до 0,3 %), молібденом (до 0,2 %) [2]. Легування ванадієм підвищує до 30 % зносостійкість і знижує холодостійкість, але впливає на характеристики

Таблиця 1. Хімічний склад сталі 110Г13Л згідно з ДСТУ 8781:2018

Масова доля, %								
C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	S	P	Fe
0,9...1,4	0,3...1,0	11,5...15,0	до 1,0	до 1,0	до 0,3	до 0,05	до 0,12	~83

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

О.П. Гопкало, О.Є. Гопкало, М.П. Земцов, Є.В. Коваленко, В.Є. Бодунов, 2022

міцності. Встановлено, що додавання 2 % ванадію в сталь 110Г13Л призводить до п'ятикратного підвищення опору зносу при збереженні ударної в'язкості. Легування хромом (до 1,5 %) [2] підвищує властивості міцності та зносостійкість сталі. При цьому пластичність і в'язкість трохи знижуються, але залишаються на рівні, що перевищує ці характеристики для звичайної високомарганцевої сталі, та забезпечують нормальну експлуатацію виробів з підвищенням зносостійкості в середньому на 15...20 %. Тобто при легуванні сталі 110Г13Л хромом до 1,0 % (в межах вимог ДСТУ) бажані показники зносостійкості можна значно підвищити [3].

Збільшення вмісту Cr, Si, Ni, Cu та зменшення концентрації Mn у металі викликає підвищення значень коерцитивної сили. Вміст у сталі вуглецю в межах 0,9...1,1 %, а фосфору – не більше 0,5...0,55 % мінімізує ударну в'язкість. Підвищення в сталі вмісту кремнію знижує ударну в'язкість. Максимальні показники ударної в'язкості сягають при вмісту кремнію до 0,5 % [3].

Основною проблемою отримання якісних відливок залишається вибір технології виплавляння та термічної обробки. Якісна термічна обробка є ключовим фактором отримання бажаних структур металу.

Термічна обробка сталі 110Г13Л регламентована ДСТУ 8781:2018 – аустенізація при температурі 1050...1100 °С з охолодженням у холодній воді (не вище 30 °С). Слід зазначити, що стовпчаста та дендритна лита структура повністю не усувається термічною обробкою і негативно позначається на ударній в'язкості, стійкості спротиву абразивному зносу та динамічним навантаженням. Підвищення твердості викликає підвищення значень коерцитивної сили [2].

У табл. 2 наведено дані [4] залежності механічних властивостей сталі 110Г13Л різних виробників від хімічного складу.

Приведені результати показують, що відмінності хімічного складу металу траків різних виробників викликають розкид механічних характеристик у середньому в межах: σ_b – 32,9 %; $\sigma_{0,2}$ – 26,1 %; δ – 66,7 %; Ψ – 75,6 %; KCU^{20} – 32,6 %; KCU^{-60} – 121,2 %; твердість, HB – 7,7 %. Концентрація Mn та Si, нижча від нормованих величин у відливках виробника № 2, викликає найбільше зниження характеристик міцності σ_b , відносного звуження при розтязі Ψ та ударної в'язкості KCU при –60 °С відносно аналогічних показників металу відливок інших виробників [4].

Залежність показника Mn/C для сталі 110Г13Л показує, що з його зростом збільшується ударна в'язкість. Оптимальним вважається відношення Mn/C не менше 10,0. Максимальні показники ударної в'язкості досягаються при відношенні Mn/C в інтервалі 12...13. Показник P + 0,4C характеризує вплив фосфору, який бажано мати не більше за 0,5 %. Підвищення даного показника для сталі 110Г13Л викликає зниження ударної в'язкості. При P + 0,4C більш ніж 0,5 % сталь схильна до утворення тріщин [1].

Для діагностування якості структурного стану металу виробів у вихідному стані та оцінки пошкоджуваності металу в процесі експлуатації конструкцій широке застосування знайшли неруйнівні методи контролю. У [5] наведено приклад діагностування ступеня пошкоджуваності металу гусеничних траків при їх стандартних випробуваннях на 4-х точковий згин. Для траків з оптимальним структурним станом металу (аустенітна структура) характерна відсутність магнітних властивос-

Таблиця 2. Залежність механічних властивостей сталі 110Г13Л різних виробників від хімічного складу (в дужках вказано нормовані величини)

Хімічний склад, %	Виробник						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
C (0,9...1,4)	0,98	0,94	1,05	1,15	0,95	0,97	1,05
Mn (11,5...15)	11,60	10,50	12,69	13,13	13,47	12,35	13,40
Si (0,8...1)	0,66	0,64	0,46	0,51	0,44	0,51	0,44
Cr (до 1,0)	0,10	0,59	0,15	0,39	0,14	0,13	0,11
Ni (до 1,0)	0,18	0,27	0,20	0,16	0,21	0,16	0,27
P (до 0,12)	0,025	0,057	0,029	0,048	0,025	0,028	0,027
S (до 0,05)	0,012	0,004	0,005	0,004	0,007	0,006	0,005
Cu (до 0,3)	0,18	0,17	–	–	0,17	0,12	0,19
Характеристики							
σ_b , МПа	790	610	710	660	850	790	690
$\sigma_{0,2}$, МПа	370	400	440	455	350	375	355
δ , %	38	21,5	24,5	21,5	43	37	27
ψ , %	29	18,5	41	29	39	37	31
KCU^{20} , Дж/см ²	242	265	325	234	261	258	262
KCU^{-60} , Дж/см ²	90,5	39	159	45	–	–	–
Твердість, HB	202	202	187	187	–	–	–
Бал зерна	3	1	1	0	–	–	–

тей металу у вихідному стані і, відповідно, нульові значення коерцитивної сили. При навантаженні з пружно-пластичним деформуванням відбувається підвищення значень коерцитивної сили, а характер епюр має вигляд, що наближається до кола.

Оскільки коерцитивна сила – це інтегральна характеристика структурного стану металу, яка залежить від вмісту та концентрації хімічних елементів, фазових і структурних складових, то застосування коерцитиметричного контролю дозволяє експресно оцінити якість металу траків.

Методика експериментальних досліджень. Експериментальні дослідження полягали у визначенні розподілу значень коерцитивної сили по поверхні 13-и експериментальних гусеничних траків зі сталі 110Г13Л (з певними відхиленнями хімічного складу від регламентованого) двох різних виробників у вихідному стані та після випробування на 4-х точковий згин.

На рис. 1 наведено загальний вигляд траків до випробувань з цифровими позначками точок для подальшого вимірювання коерцитивної сили.

Вимірювання коерцитивної сили на поверхні траків у характерних точках проводили структуроскопом КРМ-Ц-К2М (розробник ТОВ «Спеціальні наукові розробки», м. Харків). Оскільки траки мають складну об'ємну конфігурацію з внутрішньою порожниною (при товщині стінок 4...5 мм), то для вимірювання коерцитивної сили з фіксацією можливого нагартування поверхневих шарів металу в умовах експлуатації 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 датчиком D12 показали наявність суттєвого розкиду H_c у різних точках поверхні експериментальних траків. У даній роботі для отримання більш

інтегральних значень коерцитивної сили у значно більших об'ємах металу (27×25×4 мм) використовували датчик D27 з базою вимірювання 27 мм та глибиною намагнічування до 4 мм, що дозволило значно зменшити розкид вимірних величин.

Вимірювання коерцитивної сили полягає у попередньому намагнічуванні металу до насичення з наступним повним розмагнічуванням і подальшим намагнічуванням магнітним полем протилежної полярності для нейтралізації залишкового магнетизму та вимірювання значень H_c . Тривалість циклу визначення коерцитивної сили складає 10 с. Слід зазначити, що при наявності анізотропії структури металу, у тому числі після пластичного деформування, значення коерцитивної сили в досліджуваних точках змінюються при зміні напрямків вимірювання (орієнтації полюсів магнітів датчика відносно досліджуваної поверхні). У зв'язку з цим вимірювання значень H_c проводили при повороті датчика через кожні 45° відносно попереднього вимірювання (всього 8 вимірів – при орієнтаціях: 0, 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315°), де вважали напрямком вимірювання значень коерцитивної сили $H_{c\parallel}$ (0, 180, 360°) поперек траку (вздовж гусениці) та $H_{c\perp}$ (90, 270°) – вздовж траку (поперек гусениці). Вимірювання значень коерцитивної сили у характерних точках поверхні траків проводили у вихідному стані та після стандартних випробувань на 4-х точковий згин.

Випробування траків у вихідному стані на 4-х точковий статичний згин проводили на розривній машині ZD-40. Навантаження проводили як перпендикулярно площині траку, так і по дотичній до неї згідно зі схемами на рис. 2. Перше навантаження зусиллям $P1 = 300$ кН проводили перпендикулярно до площини траку (рис. 2, а). 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

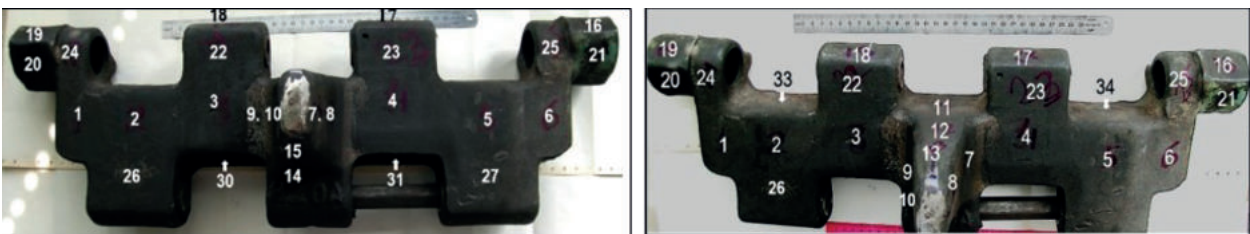


Рис. 1. Загальний вигляд траків до випробувань



Рис. 2. Схеми навантаження траку при випробуваннях на 4-х точковий статичний згин [5]

навантаження (рис. 2, б). Наступне навантаження на зріз при 4-х точковому прикладанні зусиль після попередніх навантажень проводили по дотичній до площини траку зусиллям $P_3 = 240$ кН (рис. 2, в).

В умовах експлуатації на трак діють зусилля від катків (P), які урівноважуються тиском ґрунту (R). 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 маневрах транспортного засобу. В умовах експлуатації та при випробуваннях на згин має місце неоднорідний напружено-деформований стан різних ділянок траку. Найбільш деформованими є поверхневі шари металу. Але завдяки високій пластичності металу у вихідному стані сталі внаслідок пластичного деформування при експлуатації у найнапруженіших ділянках відбувається перерозподіл напружень з сусідніми ділянками, що забезпечує цілісність конструкції.

Випробуванням на 4-х точковий згин підлягали еталонний гусеничний трак та експериментальні траки, виготовлені з металу з певними відхиленнями хімічного складу від нормованого (траки № 1–4 (2021), № 7–8 (2020), 1–5 (2021) та ЗП-1, ЗП-2 (2021)). У дужках вказано рік проведення випробувань.

Аналіз хімічного складу металу траків проведено на фотоелектричному спектрометрі Spectrovac-1000 (Baird). Хімічний склад металу досліджуваних гусеничних траків і сталі 110Г13Л наведено в табл. 3.

Як видно з табл. 3, досліджені експериментальні траки від різних виробників відрізняються за відсотком певних хімічних елементів (C, Si, Mn, Cr, P) як між собою, так і від регламентованих нормативними документами для сталі 110Г13Л.

Результати експериментальних досліджень та їх аналіз. У даній роботі проведено порівняння структурного стану металу експериментальних гусеничних траків різних виробників з еталонним

за результатами вимірювання коерцитивної сили. На рис. 3 наведено характерні епюри коерцитивної сили, виміряної структуроскопом у різних точках поверхні еталонного траку у вихідному стані та після випробувань у різних площинах. Слід зазначити, що у переважній частині траку (наприклад точки 1–6, рис. 3, а) після трьох навантажень за схемами 1–3 (рис. 2) не відбувалось суттєвих змін структурного стану, де значення коерцитивної сили дорівнювали нулю. Найнавантаженішим виявився метал тягового гребеня (точки 8, 9, рис. 3, б) та точки 33 і 34 (рис. 3, в) в основній частині траку.

Мікроструктура фрагментів досліджуваного еталонного траку у вихідному стані в різних зонах характеризується аустенітом змішаної зеренно-дендритної морфології (ливарна структура) (рис. 4, а) та аустенітом зеренної морфології (рис. 4, б) без ознак мікропластичної деформації.

Для еталонного трака з оптимальним структурним станом металу (аустенітна структура, рис. 4) у вихідному стані характерна відсутність магнітних властивостей, що підтверджується вимірами коерцитивної сили ($H_c = 0$ А/см). На відміну від еталонного трака різні ділянки експериментальних траків 1–4 (2021) у вихідному стані мали достатньо високі значення коерцитивної сили, що пов'язано з появою феромагнітних фаз.

Щодо мікроструктури інших досліджуваних зразків, попри різнозеренність, крім аустеніту зеренної морфології травленням виявили приповерхневі шари (завтовшки 300...400 мкм) з ознаками мікропластичної деформації (рис. 5, а). В аустенітних зернах нагартованих шарів між лініями ковзання виявили мартенсит (α -фазу) у різній кількості відповідно для кожного з досліджуваних зразків, що пояснює появу феромагнітних властивостей в даних зразках аустенітної сталі. Виявлено, що значення коерцитивної сили збільшується зі збільшенням долі α -фази, відсоток якої було визначено за допомогою ферритометра локального типу Ferrit Gehalt-messer-1.053.

Таблиця 3. Хімічний склад металу досліджуваних гусеничних траків і сталі 110Г13Л

Номер траків	Масова доля, %										
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	Ti	V	S	P
Еталон	1,09	0,91	13,3	0,90	0,96	0,21	0,19	0,015	0,068	0,014	0,035
1-4 (2021)	1,04	1,25	2,30	1,52	0,33	0,16	<0,1	<0,05	0,036	0,02	0,15
1-5 (2021)	0,44	0,75	15,8	0,71	0,72	0,11	0,056	0,017	0,006	0,015	0,019
7-8 (2020)	0,66	0,34	12,6	0,63	0,18	0,11	0,038	<0,01	0,017	0,016	0,070
ЗП-1, ЗП-2	0,35	0,42	16,8	1,10	0,080	0,045	0,055	<0,01	0,022	0,013	0,028
Сталь 110Г13Л (ДСТУ 8781:2018)	0,9...1,5	0,3...1,0	11,5...14,5	1,0 не більше	1,0 не більше	–	–	–	–	0,05	0,12
ГОСТ 2176-77	0,9...1,4	0,8...1,0	11,5...15,0	до 1	до 1	до 0,3	–	–	–	до 0,05	до 0,12

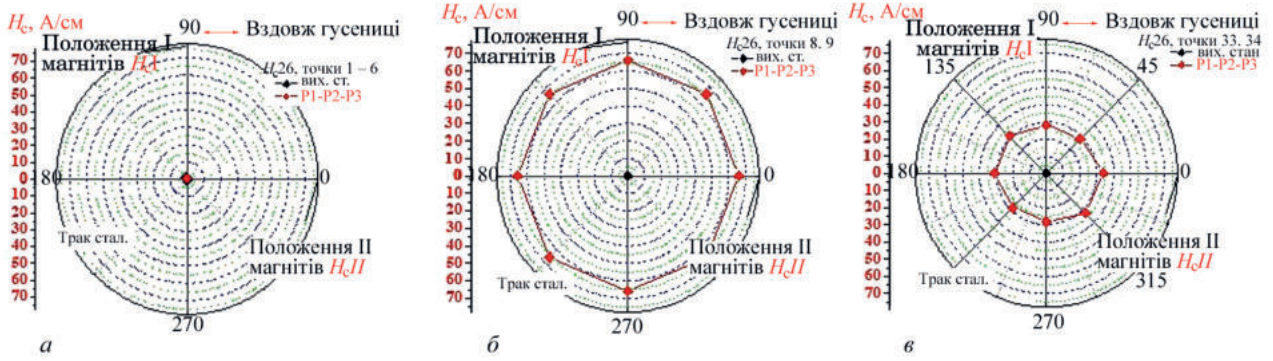


Рис. 3. Характерні епюри коерцитивної сили в різних точках поверхні еталонного траку у вихідному стані та після випробувань: а – точки 1–6; б – точки 8, 9; в – точки 33, 34. Значення H_c у вихідному стані відображено чорним, а після навантаження – червоним кольором. Номери точок відповідають рис. 1

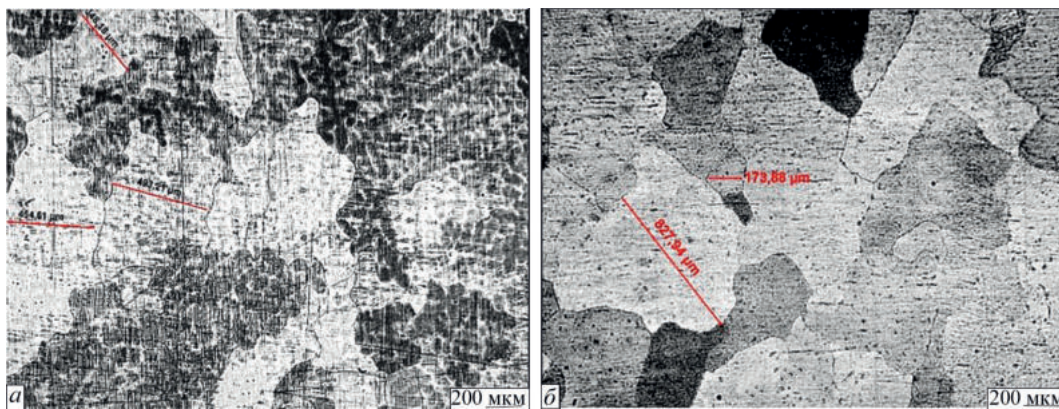


Рис. 4. Приклад мікроструктури фрагментів досліджуваного еталонного траку у вихідному стані в різних зонах (α -фаза $\sim 0\%$, $H_c = 0$ А/см)

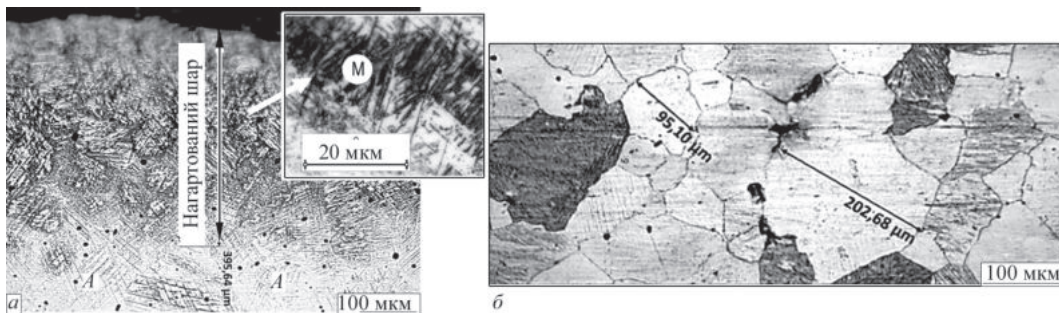


Рис. 5. Приклад типової мікроструктури досліджуваних експериментальних траків (у перерізі) у вихідному стані в різних зонах: а – приповерхневий (нагартований) шар, α -фаза $\sim 0,3\text{--}0,6\%$, $H_c = 35$ А/см; б – основа аустеніт, α -фаза $\sim 0\%$, $H_c = 0$ А/см; М – мартенсит (α -фаза)



Рис. 6. Характерні епюри коерцитивної сили в різних точках поверхні експериментальних траків 1–4 (2021) у вихідному стані та після випробувань за схемою 1 (рис. 2, а): а – точка 4; б – точка 9; в – точка 26



Рис. 7. Загальний вигляд втрати суцільності (утворення тріщини) металу траків 1–4 (2021) після випробувань на 4-х точковий згин

Відсутність підвищення коерцитивної сили при нормованих навантаженнях за схемою 1 (рис. 2, а) відносно вихідного стану свідчить про незмінність структурного стану металу при деформуванні (рис. 6). Слід також зазначити суттєвий розкид абсолютних значень коерцитивної сили в приповерхневих шарах різних траків, що є відображенням структурного стану металу. Так, у межах партії траків 1–4 (2021): для металу траку № 1 абсолютні значення коерцитивної сили різних ділянок знаходились у межах 21,1...70,5 А/см; траку № 2 – 29,7...77,6 А/см; траку № 3 – 4,6...68,1 А/см; траку № 4 – 14,2...62,7 А/см.

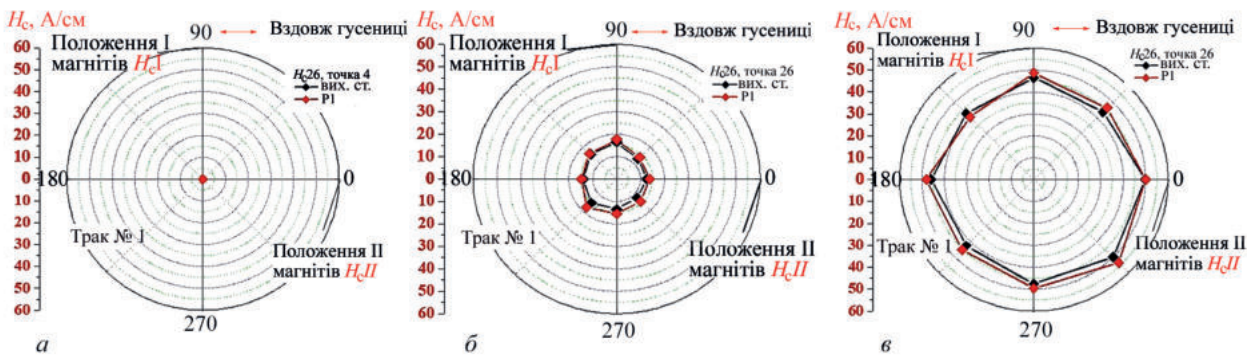


Рис. 8. Характерні епюри коерцитивної сили в різних точках поверхні експериментальних траків 1–5 (2021) у вихідному стані та після випробувань: а – трак № 1 точка 4; б – трак № 2 точка 6; в – трак № 1 точка 26. Значення H_c у вихідному стані відображено чорним, а після навантаження – червоним кольором

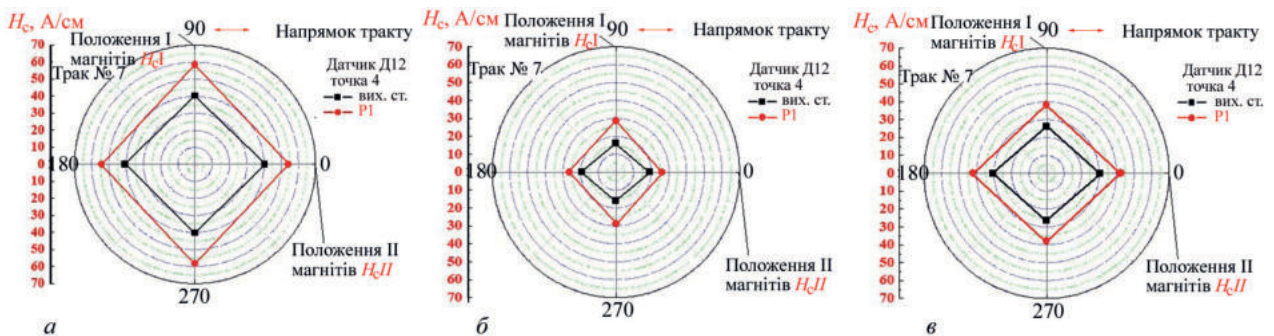


Рис. 9. Характерні епюри коерцитивної сили в різних точках поверхні експериментального траку 7–8 (2020) у вихідному стані та після випробувань: а – точка 4; б – точка 9; в – точка 26. Значення H_c у вихідному стані відображено чорним, а після навантаження – червоним кольором

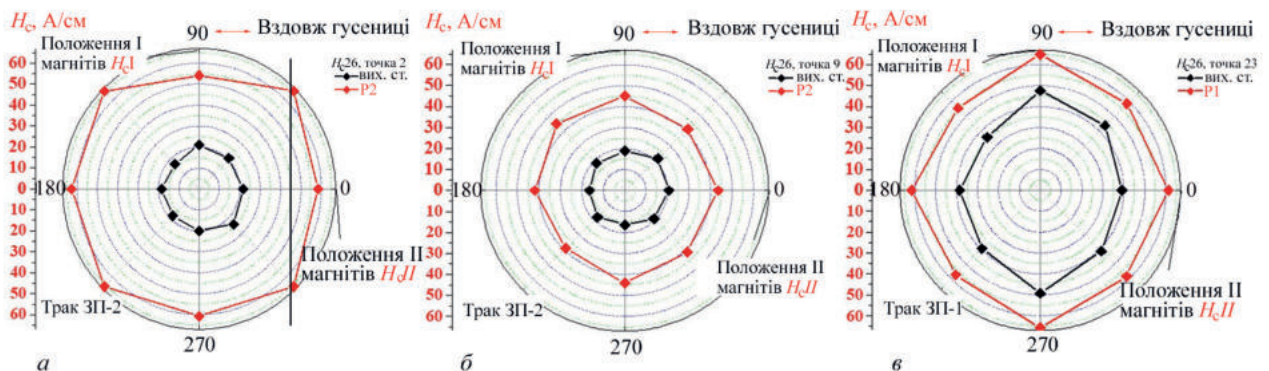


Рис. 10. Характерні епюри коерцитивної сили в різних точках поверхні експериментальних траків 3П-1 та 3П-2 у вихідному стані та після випробувань: а – трак 3П-2 точка 2; б – трак 3П-2 точка 9; в – трак 3П-1 точка 23. Значення H_c у вихідному стані відображено чорним, а після навантаження – червоним кольором

Випробування на 4-х точковий згин показали, що траки 1–4 (2021) витримали тільки 50 % нормованого навантаження, тобто метал мав дуже низький опір такому навантаженню. При цьому руйнування носило крихкий характер без ознак пластичного деформування (у тому числі наявності залишкового прогину (рис. 7)).

На відміну від досліджуваних траків 1–4 (2021) структурний стан експериментальних траків 1–5 (2021) (рис. 8) відрізняється наявністю зон з нульовими значеннями коерцитивної сили, що характерно для аустенітної структури. Для досліджуваних траків 1–5 (2021), як і для траків 1–4 (2021), характерною є відсутність підвищення значень коерцитивної сили при нормованих навантаженнях відносно вихідного стану, що свідчить про незмінність структурного стану металу при деформуванні. Крихкий характер руйнування підтверджує відсутність запасу пластичності металу. При цьому траки при навантаженні за схемами 1 і 3 (рис. 2, а, б) витримали нормоване навантаження. А при навантаженні за схемою 2 (рис. 2, б) трак витримав лише 17,7 т з 30 т нормованих.

На відміну від вищерозглянутих траків 1–5 (2021) і 1–4 (2021) на поверхні траків 7–8 (2020) виявили незначне підвищення значень коерцитивної сили при навантаженні та появу ознак пластичної деформації (лінії ковзання). При цьому траки витримали нормативні навантаження з певними величинами залишкового прогину у відповідних площинах навантаження. На рис. 9 наведено характерні епюри коерцитивної сили в різних точках поверхні експериментальних траків 7–8 (2020) у вихідному стані та після випробувань на 4-х точковий згин.

Слід також зазначити розкид абсолютних значень коерцитивної сили, які у вихідному стані для експериментальних траків 7–8 (2020) знаходились у діапазоні 14,3...67,1 А/см. Але у найнавантажених точках траків після випробувань відбувалося підвищення значень коерцитивної сили, що дозволило оцінити ступінь пошкодження металу при деформуванні [5].

Для досліджуваних траків іншого виробника (траки ЗП-1 і ЗП-2) також характерною є наявність достатньо високих значень коерцитивної сили та їх нерівномірний розподіл у різних точках у вихідному стані (рис. 10). Для порівняння на рис. 10 показано також епюри коерцитивної сили після нормованих навантажень.

Структурний стан металу траків ЗП-1 і ЗП-2 у вихідному стані, оцінений величиною коерцитивної сили, приблизно відповідає тракам 1–5 (2021), 1–4 (2021) і 7–8 (2020). Але для металу траків

Таблиця 4. Показники Mn/C та P + 0,4C металу досліджуваних траків у порівнянні з оптимальними [1]

Показник	[1]	Еталон	1–4 (2021)	7–8 (2020)	1–5 (2021)	ЗП-1, ЗП-2
Mn/C	12...13	12,2	2,21	19,1	35,9	48,0
P+0,4C, %	≤0,5	0,471	0,566	0,334	0,195	0,164

ЗП-1 і ЗП-2 характерним є суттєве підвищення значень коерцитивної сили при нормованих навантаженнях відносно вихідного стану. При навантаженні на 4-х точковий згин мало місце суттєве деформування траків. Метал мав достатній запас пластичності для деформування, що призвело до перерозподілу напружень у найнавантаженишій зоні і підвищувало стійкість до руйнування. При навантаженні траків ЗП-1 і ЗП-2 за схемами 1 та 2 (рис. 2, а, б) пластичне деформування почалося при навантаженні 24,6 т, а руйнування – при 28,9 т.

Авторами [1] на основі системних досліджень запропоновано оптимальні показники співвідношення хімічних елементів для сталі 110Г13Л, а саме: $Mn/C \geq 10$ та $P + 0,4C \leq 0,5$ %, де з ростом показника Mn/C спостерігається збільшення ударної в'язкості, а оптимальні значення Mn/C знаходяться в діапазоні 12...13. З ростом показника P + 0,4C вище за значення 0,5 % зростає схильність сталі до тріщиноутворення.

Показники Mn/C та P + 0,4C металу досліджуваних нами траків у порівнянні з оптимальними [1] відображено в табл. 4.

Таким чином, метал усіх досліджуваних експериментальних траків не відповідає вимогам щодо хімічному складу сталі 110Г13Л згідно з нормативними документами (табл. 3) та щодо оптимальних діапазонів показників Mn/C та P + 0,4C (табл. 4), що знайшло відображення на епюрах коерцитивної сили експериментальних траків у вихідному стані.

Крім викладених вище можливостей застосування коерцитиметричного контролю для оцінки якості виробів з аустенітних сталей для визначення отриманих у процесі випробувань або експлуатації пошкоджень можна скористатись розробленим підходом [6, 7], згідно з яким при моніторингу структурного стану слід звертати увагу не на максимальні значення коерцитивної сили, а на кінетику процесу. У міру статичного або циклічного напруження залежність коерцитивної сили від накопичених пошкоджень має висхідні та низхідні ділянки. Ділянки зростання значень коерцитивної сили відповідає стадія зародження тріщин, а ділянки зниження їх значень – стадія розвитку тріщин внаслідок втрати суцільності металу при утворенні пор та тріщин.

Використання коерцитиметричного контролю дозволяє проводити оцінку якості металу у вихідному стані, а також рівня навантаженості та отриманих пошкоджень на кожній зі стадій у будь-якій точці виробів в умовах експлуатації шляхом вимірювання значень коерцитивної сили.

Висновки

Проведено діагностування неруйнівним методом контролю структурного стану (за вимірами коерцитивної сили) металу 13-и експериментальних гусеничних траків різних виробників у вихідному стані та після стандартних випробувань на 4-х точковий згин.

Структурний стан металу траків ЗП-1 та ЗП-2 у вихідному стані, оцінений за величиною коерцитивної сили, приблизно відповідає тракам 1–5 (2021), 1–4 (2021) та 7–8 (2020). Але для металу траків ЗП-1 та ЗП-2 характерним є суттєве підвищення значень коерцитивної сили при нормованих навантаженнях відносно вихідного стану. При навантаженні на 4-х точковий згин мало місце суттєве деформування траків. Метал мав достатній запас пластичності для деформування, що сприяло перерозподілу напружень у найнавантаженішій зоні та підвищувало стійкість до руйнування.

На відміну від еталонного трака різні ділянки експериментальних траків 1–4 (2021) та 1–5 (2021) у вихідному стані мали достатньо високі значення коерцитивної сили, що пов'язано з невідповідністю хімічного складу та термічної обробки нормованим вимогам. Метал названих траків мав занижену пластичність, що не сприяло перерозподілу максимальних напружень у найнавантаженіших ділянках і призвело до крихкого руйнування після стандартних випробуваннях на 4-х точковий згин.

Слід також зазначити розкид абсолютних значень коерцитивної сили, які у вихідному стані для експериментальних траків 7–8 (2020) знаходились у діапазоні 14,3...67,1 А/см. Але у найнавантаженіших точках траків після випробувань відбувалось підвищення значень коерцитивної сили, що дозволяє оцінити ступінь пошкодження металу при деформуванні [5].

Отримані експериментальні результати випробувань на 4-х точковий згин експериментальних гусеничних траків з аустенітної сталі типу Гадфільда з певними відхиленнями хімічного складу від регламентованого підтвердили можливість застосування неруйнівного коерцитиметричного контролю для оцінки початкового структурного стану та рівня навантаженості металу, який характеризує ступінь отриманих пошкоджень після навантаження, за результатами вимірювання коерцитивної сили.

Список літератури

1. Давыдов Н.Г. (1979) *Высокомарганцовистая сталь*. Москва, Металлургия.
2. Солнцев Ю.П., Андреев А.К., Гречин Р.И. (1991) *Литейные хладостойкие стали*. Москва, Металлургия.
3. Зимокос Г.Н., Адаменко Л.А., Иванова Л.Х. (2011) Влияние химического состава на свойства высокомарганцовистой стали в отливках броней конусных дробилок стали. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, **4**, 140.
4. Шаров Н.В., Платонов А.В., Чумаков В.А. (2012) Изготовление и оценка качества отливок быстро изнашиваемых деталей из высокомарганцовистых сталей. *Горная промышленность*, **3**, 18–28.
5. Гопкало О.П., Земцов М.П., Гопкало О.С. та ін. (2021) Діагностування пошкодженості гусеничних траків при механічному навантаженні за результатами вимірювання коерцитивної сили. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **1**, 11–17. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.01.03>
6. Гопкало О.П., Нехотящий В.О., Безлюдько Г.Я. та ін. (2019) Діагностування пошкодженості аустенітної сталі AISI 304 при механічному навантаженні по вимірах коерцитивної сили. *Там само*, **4**, 12–24. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2019.04.01>
7. Gopkalo, O., Bezlyudko, G., Nekhotiashchiy, V. et al. (2020) Damage evaluation for AISI 304 steel under cyclic loading based on coercive force measurements. *Int. J. Fatigue*, Vol. **139**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105752>

References

1. Davydov, N.G. (1979) *High-manganese steel*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Solntsev, Yu.P., Andreev, A.K., Grechin, R.I. (1991) *Cast cold-resistant steels*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Zimokos, G.N., Adamenko, L.A., Ivanova, L.Kh. (2011) Influence of chemical composition on the properties of high-manganese steel in armored steel castings of cone crushers. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*, **4**, 140 [in Russian].
4. Sharov, N.V., Platonov, A.V., Chumakov, V.A. (2012) Production and quality assessment of castings of rapidly-wearing parts from high-manganese steels. *Gornaya Promyshlennost*, **3**, 18–28 [in Russian].
5. Gopkalo, O.P., Zemtsov, M.P., Gopkalo, O.Ye., et al. (2021) Diagnosis of damage to caterpillar tracks under mechanical loading based on the results of measurement of the coercive force. *Tekh. Diahnost. ta Neruiniv. Kontrol*, **1**, 17–26 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.01.03>
6. Gopkalo, O.P., Nekhotiashchiy, V.O., Bezlyudko, G.Ya. et al. (2019) Giagnosis of damage in austenitic steel AISI 304 at mechanical loading by measurements of coercive force. *Ibid.*, **4**, 12–24 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2019.04.01>
7. 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**. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105752>

EXPRESS EVALUATION OF THE QUALITY OF PRODUCING CATERPILLAR TRACKS BY THE RESULTS OF COERCIVE FORCE MEASUREMENT

O.P. Gopkalo¹, O.E. Gopkalo¹, M.P. Zemtsov¹, E.V. Kovalenko², V.E. Bodunov¹

¹G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of NASU. 2 Timiryazevska Str., 01014, Kyiv, Ukraine. E-mail: ips@ipp.kiev.ua

²LLC «SPC Aviation Systems of Ukraine». 8 Redutna, 01015, Kyiv, Ukraine. E-mail: spc.asu.LTD@gmail.com

Coercimetric testing revealed essential differences in metal structure in the subsurface layer of experimental caterpillar tracks. Obtained experimental results of 4-point bend testing of experimental caterpillar tracks from steels which somewhat differ by their chemical composition, confirmed the possibility of application of nondestructive coercimetric testing for assessment of the initial structural state and level of loading of the metal, which characterizes the degree of sustained damage after loading. Metal of a sound track from steel of 110G13L type in the initial condition should have negative values of the coercive force that is ensured by its optimal structural state. This circumstance can provide substantiation for introducing coercimetric testing for express-evaluation of the quality of castings and their heat treatment. 7 Ref., 4 Tabl., 10 Fig.

Keywords: caterpillar tracks, structuroscope, coercive force, structural state

Надійшла до редакції 06.10.2022