

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему:

**“Прогнозування ресурсу деталей сільськогосподарської техніки неруй-
нівним методом контролю”**

Виконав: студент VI курсу, групи Маш-61

Спеціальності 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва)

Богдан ЗАГВОЦЬКИЙ
(Ім'я та прізвище)

Керівник: д.т.н., проф. Віталій ВЛАСОВЕЦЬ
(Ім'я та прізвище)

Дубляни 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри _____
(підпис)

д.т.н., професор Власовець В.М.
“28” квітня 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту
Загвоцький Богдан Миколайович

1. Тема роботи: «Прогнозування ресурсу деталей сільськогосподарської техніки неруйнівним методом контролю»

Керівник роботи: Власовець Віталій Михайлович, д.т.н., проф.

Затверджена наказом по університету від 28.04.2023 року № 133/к-с

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 15.01.2024 року

3. Вихідні дані: Літературні джерела за тематикою кваліфікаційної роботи відомих технологічних процесів виробництва та розрахунків технологічного обладнання; Матеріали навчальної, методичної довідкової та наукової літератури; Методики визначення економічної ефективності впровадження нового технологічного рішення.

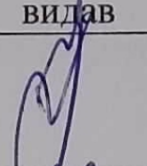
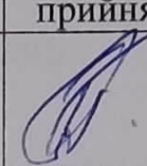
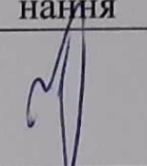
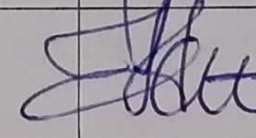

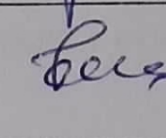
4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. Огляд інформаційних джерел та задачі досліджень;
2. Методологія і аналіз використаних методів і методик;
3. Охорона праці та безпека життєдіяльності;
4. Техніко-економічна ефективність розробок;
- Висновки і пропозиції;
- Бібліографічний список.

5. Перелік ілюстративного матеріалу:

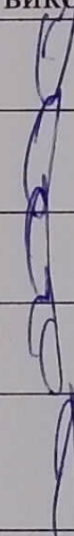
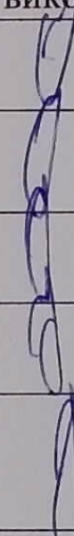
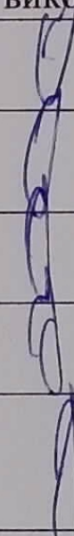
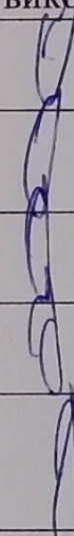
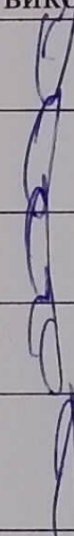
Ілюстративний матеріал представити у вигляді презентації у застосунку Microsoft PowerPoint: Залежність фізико-механічних властивостей доевтектоїдних сталей; Прилади магнітного контролю; Вплив факторів вимірювального процесу; оцінка впливу деформаційного навантаження на сталь 20; залежності магнітного параметру; зони релаксації напружень; моделі розрахунків; оцінка кінцевих елементів.

6. Консультанти розділів роботи

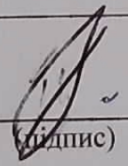
Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата		Відмітка про вико- нання
		завдання видав	завдання прийняв	
1, 2, 3, 5	Власовець В.В.. д.т.н., проф. кафедри машинобудування			
4.	Городецький І.М..кд.т.н., доц			

7. Дата видачі завдання: 28.04.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

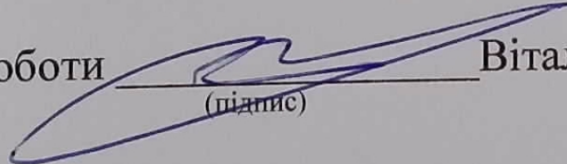
№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк вико- нання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	Виконання розділу: «Огляд інформаційних джерел та задачі досліджень»	28.04.23- 15.06.23	
2.	Виконання другого розділу: «Методологія і аналіз використаних методів і методик»	16.06.23- 15.08.23	
3.	Виконання розділу: «Охорона праці та безпека життєдіяльності»	16.08.23- 08.11.23	
4.	Виконання підрозділу: «Техніко-економічна ефективність розробок»	09.11.23- 11.12.23	
5.	Завершення оформлення розрахунково-пояснювальної записки. Завершення роботи в цілому	4.01.24- 15.01.24	

Студент _____


(підпис)

Богдан ЗАГВОЦЬКИЙ

Керівник роботи _____


(підпис)

Віталій ВЛАСОВЕЦЬ

УДК 631.332

Прогнозування ресурсу деталей сільськогосподарської техніки неруйнівним методом контролю

Загвоцький Б.М. Кваліфікаційна робота. – Дубляни, Львівський національний університет природокористування, 2024р.

51 с. текст. част., 15 рис., 5 табл., 28 джерел інформації.

Метою роботи є розробка методики прогнозування ресурсу деталей сільськогосподарської техніки неруйнівним методом контролю.

Відповідно до поставленої мети в роботі вирішені наступні задачі.

- Виконати аналіз інформаційних джерел;
- Використати сучасні методики досліджень;
- Розробити методику неруйнівного контролю ;
- Оцінити техніко-економічну ефективність

ЗМІСТ

	Стор.
Вступ	4
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ	6
1.1. Аналіз фізичної природи коерцитивної сили феромагнітних матеріалів	6
1.2. Пластична деформація	9
1.3. Температурна залежність коерцитивної сили	12
Висновки	15
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ І АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ МЕТОДІВ І МЕТОДИК	16
2.1. Методологія досліджень	16
2.2. Метод коерцитивної сили	16
2.3. Висновки	19
РОЗДІЛ 3. ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕННЯ	20
3.1. Аналіз залежності коерцитивної сили від напруженого стану	20
3.2. Аналіз отриманих результатів	20
3.3. Оцінка впливу деформаційного навантаження на матеріал, що використовується при виготовленні рам сільськогосподарської техніки	
3.4. Використання методу кінцевих елементів для аналізу напружено-деформованого стану деталей	
3.4.1. Основні етапи практичної реалізації методу кінцевих елементів	
3.4.2. Кінцеві елементи	
3.4.3. Побудова сітки кінцевих елементів	
3.4.4. Методика побудови моделі	

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

4.1. Охорона навколишнього середовища

4.2. Безпека життєдіяльності

4.3. Цивільна оборона. Підвищення стійкості роботи електронних систем до впливу іонізуючих випромінювань

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ

РОЗРОБОК

5.1. Економічна ефективність

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

СПИСОК ВИКОРИСТОВАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

На початку нашого сторіччя для діагностики рамних конструкцій тракторів неруйнівним методом з врахуванням структури, фазового складу і міцнісних характеристик почали використовувати магнітні характеристики. В даний час гостро стоїть проблема діагностики стану конструктивних елементів тракторів, вона актуальна перш за все через значну кількість об'єктів, які відпрацювали свій нормативний термін, а також через відсутність методик неруйнівного контролю для отримання достовірної інформації про фізико-механічні властивості металу і реальний режим роботи конструкції. Ця проблема ускладнюється економічними умовами на підприємствах, що експлуатують такі об'єкти. Значною мірою задача може бути вирішеною вже зараз за допомогою магнітного неруйнівного контролю. Робота спрямована для об'єднання фізичних основ магнітного методу неруйнівного контролю і неруйнвної діагностики, що допоможе в підвищенні якості ремонту і експлуатації рам тракторів і своєчасному попередженні руйнування відповідальних конструктивних елементів, при експлуатації машин, відпрацювавших свій нормативний термін служби.

Робота присвячена аналізу механізмів залежності від внутрішніх і зовнішніх пружних напружень тільки одного з вищевказаних магнітних параметрів – коерцитивної сили конструкційних сталей. Нормативною базою магнітного контролю металоконструкцій з феромагнітних сталей є Міжнародний стандарт ISO 4301. Технічне забезпечення - магнітні структуроскопи серії КРМ-Ц, що випускаються фірмою «Спеціальні наукові розробки (СНР)». В основу методики покладена кореляційна залежність між фізико-механічними властивостями феромагнітних матеріалів і параметром петлі магнітного гістерезису, контрольованим при статичних і втомних випробуваннях на всіх стадіях навантаження, аж до руйнування. Єдність природи намагнічення металу, пружньопластичної деформації, накопичення пошкоджень і зростання коерцитивної сили дозволяє моделювати на зразках процес навантаження металу при експлуатації в умовах навантаженого стану

В магнітних методах неруйнівного контролю (НК) звичайно використовують такі параметри, як коерцитивна сила H_c , залишкова намагніченість M_r , максимальна μ_{max} , початкова μ_a і оборотна μ_r магнітні проникності і т.д., які чутливі, з одного боку, до структурних змін в сталях, а з іншою, - до внутрішніх σ_0 , і зовнішньому діючим σ_0 пружним напруженням.

Коерцитивна сила H_c є напруженістю магнітного поля, необхідного для знищення залишкової намагніченості (H_{cM}) або індукції (H_{cB}) і є, таким чином, мірою опору феромагнітного матеріалу розмагнічуванню, що відбуваються в полях H_c звичайно шляхом зсуву міждоменних меж (МДГ) або обертання вектора намагніченості (в однодоменних частинках).

Фізичною причиною цього є магнітопружна взаємодія між намагніченням доменів і пружними деформаціями в кожному феромагнітному кристалі. В результаті вище перераховані магнітні параметри в тому чи іншому ступені залежать від рівня внутрішніх, величини і знака зовнішніх пружних напружень. Багато дослідників на основі цієї залежності пропонували особисті методики оцінки макро-; і мікронапружень, діючих в сталевих конструкціях. Проте для всіх цих робіт характерні одні і ті ж недоліки:

1) дослідження відносилися до конкретного випадку (наприклад, виріб з певної сталі, конкретний структурний і магнітний стан)

2) в цих роботах був відсутній в послідовний фізичний аналіз причин кореляційного зв'язку магнітного параметра з величиною напружень і меж її застосовності; іншими словами, вони не враховували всі основні чинники, які істотно впливали як на початкову величину того або іншого магнітного параметра, так і на характер його залежності від σ_0 .

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Аналіз фізичної природи коерцитивної сили феромагнітних матеріалів

Коерцитивна сила H_c є напруженістю магнітного поля, необхідного для знищення залишкової намагніченості (H_{cM}) або індукції (H_{cB}) і є, таким чином, мірою опору феромагнітного матеріалу розмагнічуванню, що відбуваються в полях H_c звичайно шляхом зсуву міждоменних меж (МДГ) або обертання вектора намагніченості (в однодомених частинках) [1, 2]. При цьому (внутрішня) $H_{cM} = H_c - H_e(1 + dB/dH)$ [3] є більш інформативною характеристикою [4]. В однофазному феромагнетикі структурно-чутлива характеристика залежить від таких чинників тонкої структури, як густина і розподіл дислокацій, пористість, величина і орієнтування зерна, а також від неоднорідності хімічного складу, напруженого стану, розміру і форми включень, їх взаємодії і т.д. [5]. Це пояснюється тим, що H_c тісно пов'язана з магнітною енергією і внутрішнім полем анізотропії в феромагнітній речовині, включаючи магнітокристалічну анізотропію, анізотропію форми, анізотропію напружень (магнітострикцію), обмінну і наведену анізотропію, оцінюваних відповідними константами K , N , λ і ін. В першому наближенні $H_c \sim NM_s + aK/M_s + b\lambda\sigma/M_s$, де M_s - намагніченість насичення; N - середній розмагнічуючий чинник частинок анізотропної форми; $a \approx b \approx 1$ - константи, не залежні від температури; σ - величина внутрішніх напружень (ВН). Різні феромагнітні метали і сплави мають різну структуру, яка, в свою чергу, визначає доменну структуру і параметри кривої намагнічення, а отже, і різну магнітну жорсткість, що характеризується рівнем H_c .

Свідоме регулювання H_c за допомогою обробки для потрібної структури має першорядне значення. Для цього, а також з метою подальшого уточнення можливостей неруйнівного коерцитиметричного контролю матеріалів в запропонованому огляді узагальнені багато відомих на сьогодні експериментальних і теоретичних даних щодо взаємозв'язку H_c з основними

параметрами тонкої структури однофазних феромагнетиків і деякими іншими факторами.

Основні дослідження впливу домішок на рівень H_c проведені на технічно чистому залізі і маловуглецевих сталях [7]. Коерцитивна сила сплавів звичайно перевищує H_c чистих феромагнітних матеріалів (за винятком деяких композицій на основі заліза з кремнієм і алюмінієм). Нижче за межу розчинності атоми упровадження створюють більші напруження, межі розчинності зростання не викликані утворенням другої фази. Мало впливають на H_c маловуглецевих сталей невеликі кількості As, В, Сг, Сі, Мп, Мо, Ні, Sn, W. Значно підвищують H_c заліза вже невеликі кількості таких елементів, як вуглець (коефіцієнт підвищення H_c на 1% легуючого елемента рівний ~ 2 кА/м %), кисень і сірка (по 0,48 кА/м %), фосфор (0,34 кА/м %), а також Al, Be, Hgf, IN, Pt і інші.

Згідно теорії Беккера-Дерінга [9, 10], потенційна магнітна енергія $H_c M_s$ елементарного об'єму феромагнетика в полі H_c пропорціональна густині магнітопружної енергії мікронапружень $\lambda\sigma$ в елементі: $H_c M_s \sim a \lambda\sigma$, де a - коефіцієнт, залежний від розподілу напружень. Коерцитивна сила залежить від величини і зміни напружень внаслідок залежності від цього параметра енергії МДГ і орієнтації доменів. В моделі Е.І. Кондорського [11], справедливої для малих значень H_c , враховується не абсолютна величина напружень, а його градієнт $d\sigma/dx$ або середнє значення його амплітуди Δx , а також ширина МДГ σ : $H_c \sim (\lambda\sigma/M_s)d\sigma/dx$. Керстен [14] додатково ввів в розрахунок залежності $H_c(\sigma)$ поняття довжини хвилі, або періоду флуктуації (дисперсності) напружень l : при $l \ll \sigma$ $H_c \sim (\lambda l/M_s \delta)d\sigma/dx$, при $l \gg \delta$ $H_c \sim (\lambda l/M_s \delta)d\sigma/dx$. Звідси максимальне значення H_c матиме місто при $l \approx \delta$, що істотно при визначенні типу ВН (другого або третього роду). Величина l , знайдена при магнітних вимірюваннях, приблизно відповідає відстані між дислокаціями [6]. Неєль [13] для однофазного напруженого феромагнетика вивів дещо іншу формулу: $H_c \sim (a\lambda\sigma/M_s) \lg(M_s^2/\lambda\sigma)^{1/2}$, де a - об'єм напружених (понад 300МПа) ділянок матеріалу (визначається по [15]). В

іншому випадку він запропонував одночасно з напруженнями враховувати вплив включень по наступному виразу: $H_c \sim Aa + Bv$, де v - об'єм немагнітних включень або пір; A і B - коефіцієнти пропорційності. Розрахунок показав, що для заліза $H_c \sim 2,1a + 360v$, а для нікелю $H_c \sim 330a + 97v$. В залізі через велику кристалічну анізотропію основний внесок в H_c дають включення, а в нікелі внаслідок переважання магнітострикційної енергії ведуча роль належить напруженням. Пружна енергія взаємодії МДГ з включеннями теоретично розглянута в роботі [15] з урахуванням пружної і магнітострикційної анізотропії при різних константах пружності матриці і виділення. Порівняння результатів коерцитиметричного визначення напружень в нікелі з даними рентгеноструктурного аналізу показало добру згоду лише при напруженнях до 100 МПа [16]. Оскільки найбільш надійні результати виходять для головних напрямів кристалу, рекомендується враховувати кутовий розподіл кристалографічних осей в окремих зернах. Зниження H_c за рахунок зняття ВН при відпалі сплавів; Fe-Ni підтверджено в роботі [19] і добре відповідає теоретичному розрахунку.

Інформація про ступінь орієнтування доменів, а отже, і зерен, може бути отриманий з величини різниці між H_c анізотропних і ізотропних зразків, а також при вимірюваннях H_c у напрямі найважчого намагнічення. Залежність H_c від кута до найбільш раціонального напрямку (особливо при одноосній анізотропії) може бути використана для визначення типу процесу перемагнічування в дрібних частинках [6].

Залежність H_c від поверхневих (плоских) дефектів є подвійною. З одного боку, межі зерен можуть бути джерелами зародків перемагнічування [24, 25], розміри яких визначаються величиною зерна. З другого боку, ці межі є перешкодами зсуву МДГ внаслідок спотвореної будови і збільшеної концентрації домішок, аналогічно чужорідним включенням [22].

В багатьох роботах по теорії коерцитивної сили оцінюють залежність H_c феромагнетиків від густини ρ і розподілу дислокацій [17].

Основним типом дислокацій, руху яких обумовлено зміна H_c , є розщеплені гвинтові дислокації при значенні енергії ДУ $\sim 0,09$ Дж/м². Зростання H_c при відпалі деформованих сплавів на основі нікелю та кобальту пояснено появою пересичених другим компонентом кластерів і зон ближнього порядку, а також процесом полігонізації. В роботах [26, 27] проведений якісний теоретичний розрахунок H_c дислокаційних структур, типових для деформованих монокристалів крем'янистого заліза. Зміни в структурі дислокації, вивчені електронно-мікроскопічним методом, зіставлені зі зміною H_c і магнітострикції насичення. Показано, що температурна залежність H_c крем'янистого заліза істотно залежить від типу дислокацій, а також від пружної і магнітостатичної анізотропії обумовлена головним чином температурним ходом магнітострикційних і пружних констант.

Електронно-мікроскопічне і коерцетиметричне дослідження сталі типу 06X2НМБА після різних режимів термообробки також показало, що основними чинниками, що впливають на H_c є густина і розподіл дислокацій ($H_c \sim \rho^{1/2}$); вплив виділень був другорядним [26].

1.2. Пластична деформація

Вплив на H_c зміни напруженого стану і густини дислокацій внаслідок деформації розглянуто вище. В цьому розділі приведені емпіричні дані про кореляцію H_c з напруженнями на різних ділянках КДУ і ступенем пластичної деформації ϵ . Залежність $H_c(\epsilon)$ в монокристалах феромагнітних металів вивчалася в роботах [28, 29], згідно яким КДУ $\sigma(\epsilon)$ досліджених матеріалів, деформованих у напрямі орієнтації містять до трьох практично прямолінійних ділянок з різними кутами нахилу. На першій ділянці кривої зміцнюється густина дислокацій ρ пропорційна напруженню τ , і, оскільки $H_c \sim \rho^{1/2}$, теоретично повинне бути $H_c \sim \tau^{1/2}$. В другій і третій областях деформації $\rho \sim \tau^2$ і тому $H_c \sim \tau$. Перевірка відповідності між розрахунковими і експериментальними співвідношеннями $H_c(\tau)$ підтвердила ці висновки авторів і в цілому застосовність статистичної теорії Тройбле для трактування процесів, що обумовлюють зміну H_c . Як приклад вони розраховували частину кривої $H_c(\tau)$ для нікелю в другій області КДУ. Передбачалося, що рух

180-градусних МДГ стримується дислокаційними сегментами завдовжки ~ 1 мкм і в кожному з актів взаємодії виникає середня сила величиною $\pm 3bG\lambda$, знак якої визначається знаком дислокації. Тоді теорія дає величину $\partial H_c / \partial \tau \approx 4 \text{ А/м} \times \text{МПа}$, що близько до її експериментальних значень, що становлять $8-24 \text{ А/м} \times \text{МПа}$. Перегини що виходять на досвідчених кривих $H_c(\tau)$, чітко відображають межі між характерними областями КДУ. Запропонована модель дозволяє, знаючи залежність густини дислокацій від напружень зсуву, обчислити деформаційну залежність $H_c(\tau)$, або ж по зміряній залежності $H_c(\tau)$ визначити приріст при пластичній деформації. Перший шлях був використаний для монокристалів нікелю з відомим взаємозв'язком $\rho(\tau)$, де таким чином була підтверджена справедливність закону $H_c \sim \rho^{1/2}$. В монокристалах заліза кількісна залежність $\rho(\tau)$ ще не визначена, і автори [30] спробували вирішити зворотну задачу: по змінній залежності $H_c(\tau)$ отримати функцію $\rho(\tau)$. Для цього використано відоме співвідношення між напругою зсуву і густиною дислокацій; $\tau = \alpha G b \rho^{1/2}$, где $\alpha = 0,02 / (\partial H_c / \partial \tau)$. При зміряному збільшенні $\partial H_c / \partial \tau$ рівному $0,5872$ і $2,216 \text{ А/м} \times \text{МПа}$ в першій і другій областях КДУ відповідно, отримано $\alpha_1 = 0,30$ і $\alpha_2 = 0,08$, що узгоджується з електронно-мікроскопічними даними. Різний вид залежності $\rho(\tau)$ в першій і другій областях зміцнення пов'язаний з тим що запропонована модель дозволяє, знаючи залежність густини дислокацій від напруги зсуву, обчислити деформаційну залежність $H_c(\tau)$, або ж по зміряній залежності $H_c(\tau)$ визначити приріст ρ при пластичній деформації. Перший шлях був використаний для монокристалів нікелю з відомим взаємозв'язком $\rho(\tau)$, де таким чином була підтверджена справедливність закону $H_c \sim \rho^{1/2}$. В монокристалах заліза кількісна залежність $\rho(\tau)$ ще не визначена, і автори [26] спробували вирішити зворотну задачу: по виміряній залежності $H_c(\tau)$ отримати функцію $\rho(\tau)$. Для цього використано відоме співвідношення між напруженням зсуву і густиною дислокацій; $\tau = \alpha G b \rho^{1/2}$, где $\alpha = 0,02 / (\partial H_c / \partial \tau)$, де $\alpha = 0,02 / (\partial H_c / \partial \tau)$. При зміряному зростанні $\partial H_c / \partial \tau$, рівному $0,5872$ і $2,216 \text{ А/м} \times \text{МПа}$ в першій і другій областях КДУ відповідно, отримано $\alpha_1 = 0,30$ і $\alpha_2 = 0,08$, що узгоджується з електронно-мікроскопічними даними. Різний вид залежності $\rho(\tau)$ в першій і

другій областях зміцнення зв'язаний з тим, що в першій, більш пологій області кривої закінчуються процеси динамічного відпуску, що супроводжується меншим коефіцієнтом зміцнення. Але оскільки H_c визначається ефективною густиною дислокацій, пряма $H_c(\tau)$ росте в пологій області КДУ швидше, ніж в більш крутій області. На відміну від приведених результатів при великих деформаціях розтягуванням сплавів заліза з 51-72% Ni спостерігали залежність типу $H_c \sim \epsilon^{1/2}$. Результати коерцитиметричного дослідження пластичної деформації маловуглецевої сталі також показали залежність $H_c = A + B\sigma - H_{сисх} + k\epsilon^{1/2}$. При цьому експериментальні результати уклалися на три прямолінійні ділянки, відповідні трьом стадіям зміцнення.

Встановлена можливість визначення H_c по величині σ , навпаки, що може бути корисним, зокрема, при контролі рам тракторів з пластичним деформуванням в експлуатації. На початкових стадіях деформації загартованих сталей як розтяг, так і стиснення знижують H_c , тоді як будь-який вид деформації відпалених або високо-відпалених сталей підвищує її відповідно до теоретичної залежності $H_c \sim H_{сисх} + \epsilon^{1/2}$. Проте апроксимація експериментальних даних по $H_c(\tau)$ для сталей приводить до більш складної залежності: $H_c \sim H_{сисх} - 0,004H_{сисх} (\epsilon^2 + 100\epsilon)$ для загартованого і низько-відпаленого стану і $H_c \sim H_{сисх} + H_{сисх} (0,004\epsilon^2 + 0,4\epsilon)$, для високо-відпаленого стану [29]. На підставі отриманих в роботах [2] закономірностей зміни $H_c(\tau)$ сталей 45, 45X і 40X зроблено висновок, що неруйнуючий коерцитиметричний метод визначення ступеня деформації є можливий для загартованих, низько- і високо-відпалених станів сталей. Проте для структур середнього відпалу досліджених сталей цей метод не може служити параметром неруйнівного контролю у зв'язку із слабою і неоднозначною залежністю $H_c(\tau)$. Виміряли H_c при розтягуванні монокристалів трансформаторної сталі, що деформуються в напрямі [23]. При деформації до 5-8% H_c швидко зростала; при $\epsilon = 8-10\%$ вона мінялася слабо, не дивлячись на зростання густини дислокацій, що продовжується, при незначній зміні структури дислокації. При $\epsilon > 20\%$ з'являлись дислокації вторинної системи ковзання, що супроводжувалися більш різким зростанням H_c . Це пов'язано з появою значних ВН, виникаючих при взаємодії пересічних систем ковзання. Крім того, підтверджена залежність H_c від просторового

розташування дислокацій. Встановлено також, що зміни H_c при деформації розтягуванням у напрямі 15° до $\varepsilon = 15\%$ не пов'язане з розподілом магнітних фаз і визначаються насамперед густиною дислокацій. Різке збільшення H_c в інтервалі $\varepsilon = 15-20\%$ пов'язано з формуванням в процесі деформації кристалографічної текстури [20]. Далі вивчена залежність від σ коерцитивної сили, що вимірюється вздовж і поперек напрямку прикладання розтягуючих напружень, в сплаві Fe - 50% Co з додатковими константами магнітострикції λ_{100} и λ_{111} . Передбачається що на відміну від короткохвильових напружень в полі дії дислокацій [17].

1.3. Температурна залежність коерцитивної сили

Залежність $H_c(t)$ визначається температурною залежністю утворюючих її параметрів M_s і $\lambda\sigma$. Так, наприклад, при аналізі кривих $H_c(t)$ сплавів типу RFe_2 залежно від рівня магнітокристалічної анізотропії знайдено два типи поведінки H_c : відсутність температурної залежності H_c для з'єднань з $R=Gd$, $R=Gd, Y, La$ і Ce і сильна залежність для інших РЗМ [31]. Оскільки величина звичайно знижується з температурою набагато швидше, ніж M_s , H_c всього монотонно знижується при підвищенні температури. Виняток з цього правила становлять окремі ділянки кривих $H_c(t)$ для деформованих монокристалів чистого і крем'янистого заліза, деяких багатофазних магнітожорстких сплавів, сталей з пластинчатим цементитом і ін. При цьому екстремуми на кривих ${}_mH_c(f)$ і ${}_vH_c(t)$ можуть розташовуватись при різних температурах [4]. При дослідженні залежності $H_c(t)$ в залізі, нікелі і кобальті, дисперсійнозміцнених немагнітними частинками Al_2O_3 або ThO_2 (2-2,5%), отримана відповідність з розрахунками [32]. Вивчення такої залежності в сталях дозволяє зв'язати величину H_c з діаметром і кількістю частинок другої фази і неметалічних включень [20]. Максимум на кривих $H_c(t)$ сплавів типу альніко і Fe-Cr-Co при 820-830°C викликаний динамікою зміни фазового складу, M_s і θ_c третьої фази, що узгоджується з теоретичним розрахунком H_c для моделі багатофазних систем [11, 12].

Коерцитивна сила сплавів Fe-Cu і недеформованого сплаву Fe - 3,25% Si зменшується з підвищенням температури. Для деформованих сплавів вона

росте з підвищенням температури і досягає максимуму при $\sim 500^\circ\text{C}$, після чого різко знижується в районі θ_c . Це вказує на те, що до 500°C перемагнічування відбувається при переміщенні МДГ, а при більш високих температурах - шляхом обертання вектора намагніченості. Залежність $H_c(t)$ досліджених сплавів в недеформованому стані пояснюється взаємодією рухаючихся МДГ з немагнітними включеннями [26]. Результати дослідження $H_c(t)$ в сталях з 0,08-1,57% С показали, що у разі пластинчатого перліту при підвищенні температури до 100°C H_c знижується, потім до температури Кюрі цементиту ($\theta_{\text{цц}} = 210^\circ\text{C}$) росте до максимуму і далі зменшується до нуля при температурі Кюрі фериту ($\theta_{\text{сф}} = 768^\circ\text{C}$).

При зернистому перліті H_c з підвищенням температури безперервно знижується. Порівняння експериментальних результатів з обчисленими на основі моделі, що враховує магнітокристалічну магнітопружну енергію для обох морфологій перліту, показало добрий збіг. В роботі [28] рівень H_c при θ_c пластинчатого цементиту пояснюється, окрім зникнення його намагніченості, магнітостатичною взаємодією цієї фази з МДГ між включеннями цементиту, внаслідок чого відсутній внесок магнітостатичної енергії в H_c , і остання з підвищенням температури безперервно знижується.

Узагальнюючи вищесказане внесок механізмів гальмування дислокацій в загальну умовну межу текучості сталей може бути представлений як:

$$\sigma_{0,2} = \Delta\sigma_0 + \Delta\sigma_{\text{т.р.}} + \Delta\sigma_{\text{д.з.}} + \Delta\sigma_{\text{д}} + \Delta\sigma_{\text{з}}, \quad (1.1)$$

де $\Delta\sigma_0$ - опір ґратки металу руху вільних дислокацій (напруження Пайерлса-Набаро), МПа; $\Delta\sigma_{\text{т.р.}}$ - твердорозчинне зміцнення, МПа; $\Delta\sigma_{\text{д.з.}}$ - дисперсійне зміцнення, МПа; $\Delta\sigma_{\text{д}}$ - дислокаційне зміцнення, МПа; $\Delta\sigma_{\text{з}}$ - зернограничне зміцнення, МПа.

Взаємозв'язок між магнітними та механічними властивостями залізвуглецевих сплавів на основі відомих на сьогоднішній день теоретичних та експериментальних моделей узагальнено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Взаємозв'язок між магнітними та механічними властивостями залізвуглецевих сплавів

Теоретичні моделі механізмів гальмування дислокацій	Теоретичні моделі зв'язку H_c і структурного стану
<p>Напруження Пайерлса-Набарро:</p> $\Delta\sigma_0 = \frac{2G}{1-\nu} \exp\left(-\frac{2\pi d}{(1-\nu)b}\right), \quad (1.2)$ <p>де d - міжплощинна відстань; b - вектор Бюргерса; ν - коефіцієнт Пуассона; G - модуль зсуву.</p>	<p>Модель Малека:</p> $H_c = \frac{3 \Delta E b \lambda_s G}{8\mu_0 M_s L} \left(\frac{1+\nu}{1-\nu}\right) \left[(d_{дл} + \delta) \delta \ln\left(\frac{2L}{d_{дл} + \delta}\right) \right]^{1/2} \sqrt{\rho} \quad (1.3)$ <p>де $d_{дл}$ - розмір напруженої ділянки, який визначається як $d_{дл} = 1/\sqrt{\rho}$; ΔE - зміна потенційної енергії доменної межі при її зсуві в пружному полі лінійної дислокації на відстані Δx; L - середній розмір домену; λ_s - магнітострикція насичення; δ - ширина доменної стінки.</p>
<p>Зміцнення твердого розчину при легуванні:</p> $\Delta\sigma_{т.р.} = \sum_{i=1}^n K_i C_i, \quad (1.4)$ <p>де K_i - коефіцієнт зміцнення твердого розчину при легуванні елементом в кількості 1 мас.%; C_i - концентрація розчиненого елементу.</p>	<p>Модель Тройбле:</p> $H_c = \frac{4\Delta a}{\mu_0 M_s} \left(C \frac{\partial K}{\partial a} + \frac{3}{2} \sigma \frac{\partial \lambda_s}{\partial a} + \frac{cK + \frac{3}{2} \lambda_s \sigma}{T_c} \frac{\partial T_c}{\partial a} \right) P, \quad (1.5)$ <p>де $P = \delta/l$; Δa - усереднене значення амплітуди коливань концентрацій; C - чисельна константа порядку одиниці</p>
<p>Дисперсійне зміцнення по механізму Орована:</p> $\Delta\sigma_{д.з.} = 0,85M \frac{Gb}{2\pi(\lambda_1 - d_{вкл})} \Phi \ln \frac{(\lambda_1 - d_{вкл})}{2b}, \quad (1.6)$ <p>де Φ - коефіцієнт, що характеризує тип взаємодії з частинками дислокацій ($\Phi = 1/2[1 + 1/(1-\nu)]$); λ_1 - усереднена відстань між частинками; $d_{вкл}$ - усереднений розмір частинок; M - орієнтаційний множник.</p>	<p>Модель Керстена:</p> $H_c = p \frac{K_{эф}}{\mu_0 M_s} \nu^n \quad (1.7)$ <p>де $K_{эф}$ - ефективна константа магнітної анізотропії; n - показник ступеня, що залежить від виду включення; p - чинник, що залежить від ступеня дисперсності включень; ν - об'єм включень в сплаві, $n = 1/2 \dots 3/4$ та залежить від їх форми.</p>
<p>Зміцнення від щільності дислокацій:</p> $\sigma_d \approx \alpha_1 M G b \sqrt{\rho}, \quad (1.8)$ <p>де α_1 - коефіцієнт, залежний від характеру розподілу і взаємодії дислокацій; ρ - щільність дислокацій.</p>	<p>Модель Віцени:</p> $H_c = \frac{\sigma \Delta E }{2\mu_0 M_s L \Delta x} \left(\ln \frac{L}{\delta} \right)^{1/2} \sqrt{\rho}, \quad (1.9)$ <p>де σ - середнє значення амплітуди внутрішніх напружень; L - середній розмір домену.</p>
<p>Зернограничне зміцнення:</p> $\Delta\sigma_3 = K_{гр.з} / \sqrt{d_3}, \quad (1.10)$ <p>де $K_{гр.з}$ - коефіцієнт, що залежить від кута розорієнтації меж, ступеня зміцнення між частинками; d_3 - середній розмір зерна.</p>	<p>Модель Гудінафа і Магера:</p> $H_c = \frac{15}{16} \frac{\pi \gamma}{\mu_0 M_s} \frac{1}{d_3} \quad (1.11)$ <p>де γ - енергія доменної межі, що відокремлює зародок від решти частини кристала.</p>

Висновки.

1. Вимірювання коерцитивної сили в даний час з успіхом застосовуються при вивченні структурних і фазових перетворень в феромагнітних матеріалах, особливо для з'ясування їх кінетики і може бути використано для діагностування рам тракторів.

2. Коерцитивна сила має дуже високу структурну чутливість: на відміну від інших властивостей, змінних в процесі обробки матеріалу на один-два порядки, вона може змінюватися на п'ять порядків.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ І АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ МЕТОДІВ І МЕТОДИК

2.1 Методологія досліджень

Основні оцінюючі критерії, що дозволили розробити методику діагностики рам тракторів неруйнівним магнітним методом: коерцитивна сила, інтегрований показник механічних властивостей матеріалів твердість, сучасні методи статистичної обробки експериментальних даних.

Для отримання відомостей про можливість застосування запропонованої методики використовували апріорні дані і результати власних експериментальних досліджень.

Пошук найдостовірніших і оптимальних оцінюючих критеріїв властивостей, що забезпечують необхідні характеристики деталей з сталі, управління їх якістю, привів до розгляду відомих і нових залежностей.

Методологія досліджень і послідовність проведення експериментів, теоретичних оцінок для вирішення поставлених задач і досягнення мети роботи приведена на рис. 2.1.

2.2. Метод коерцитивної сили

Серед магнітних характеристик найбільш чутливі до змін структури залишкова індукція B_r , коерцитивна сила H_c і магнітна проникність μ . Ці характеристики найбільш часто використовували як параметр контролю. Коерцитивна сила, як діагностичний критерій, маючи високу чутливість до структурних змін і фазових перетворень, практично не залежить від геометричних розмірів виробу, що суттєво полегшує задачу контролю різних за формою виробів.

Коерцитиметри з приставними магнітними перетворювачами (рис. 2.2) достатньо широко застосовуються як сучасні магнітовимірювальні пристрої, а також як прилади неруйнуючого визначення фізико-механічних характеристик феромагнітних металів і сплавів.

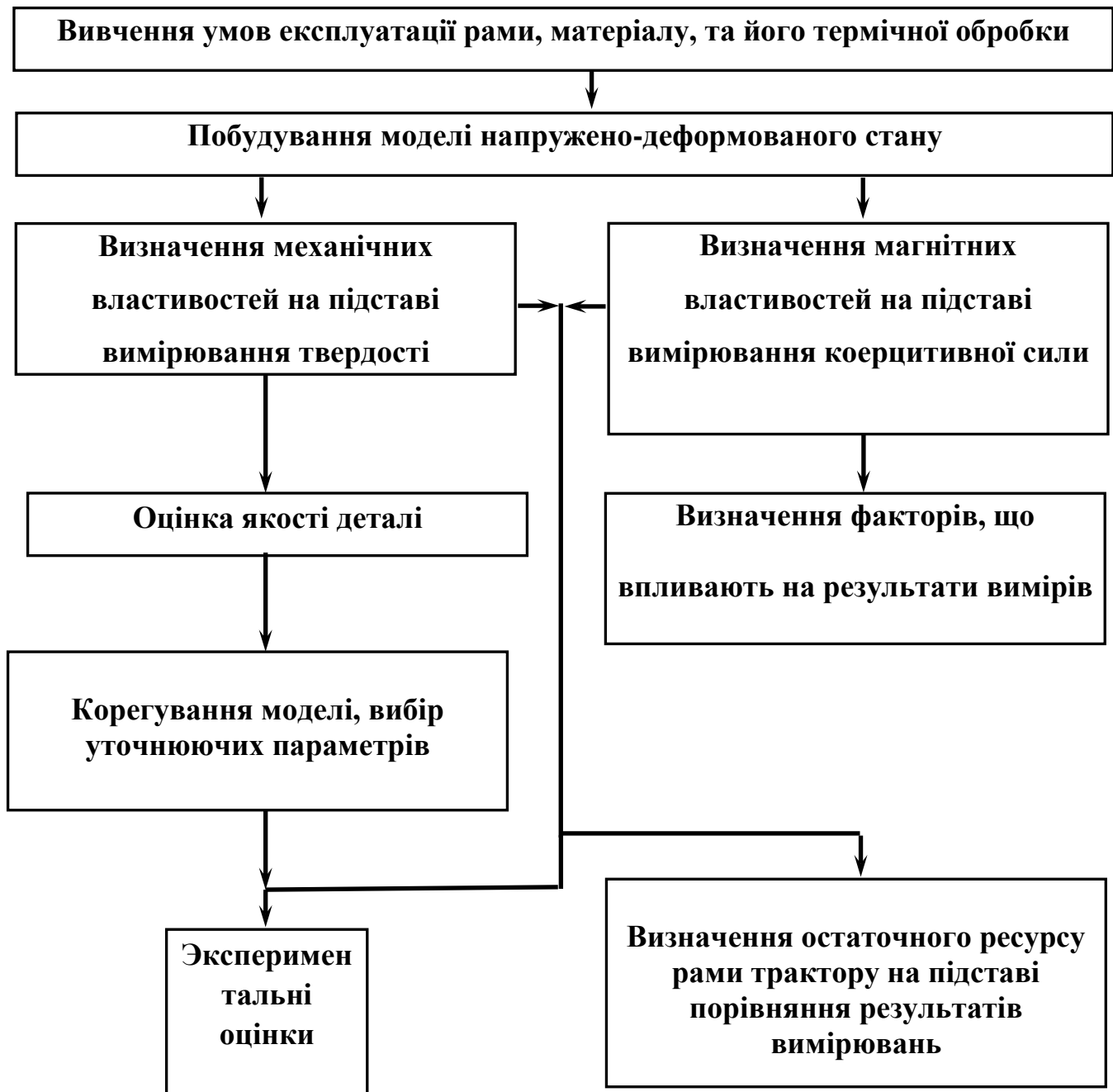


Рисунок 2.1 - Методологія досліджень



Рисунок 2.2 - Загальний вид накладного перетворювача зі змінним щупом коерцитиметра типу КРМ-Ц




На основі комплексних досліджень встановлені перехідні коефіцієнти для визначення впливу геометричних факторів поверхні деталей на рівень вимірюваних властивостей за коерцитивною силою.

Встановлено, що чутливість методу знижується для тонких виробів - до 40% (зменшення падіння магнітного потенціалу, збільшення магнітного опору потоку розсіювання); для масивних - до 12% (частковий магнітний гістерезис). На достовірність оцінки вирішальний вплив має хід кривої залежності H_c від максимального значення індукції при намагніченні конкретного матеріалу виробу.

Для встановлення залежностей між формою виробу та показниками накладного перетворювача використовували спеціально виготовлені полюсні наконечники (табл.2.1).

Таблиця 2.1

Типи полюсних наконечників, що використовувались для визначення впливу форми деталей на рівень магнітного показника

Умовне позначення	Тип полюсного наконечника	Умовне позначення	Тип полюсного наконечника
Б00 ¹		Б04	
Б01		Б05	
Б02		М00	
Б03 ²		М01	

Висновки.

1. Розроблено методологію проведення досліджень та для надійного визначення коерцитивної сили обґрунтовано використання коерцитиметру коерцитиметр КРМ-Ц.

РОЗДІЛ 3.

ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Аналіз залежності коерцитивної сили від напруженого стану

Залежність коерцитивної сили від розтягуючих і стискаючих напружень більшості конструкційних сталей, що використовуються для виготовлення рам тракторів є схожою - зі збільшенням рівня напруженого стану збільшується й рівень коерцитивної сили та твердості. Ця залежність справедлива для області, де ще не почалася пластична деформація. Якщо при випробуваннях чи експлуатації досягнута межа пластичності матеріалу, то рівень механічної “жорсткості” – твердості зменшується, а магнітної – коерцитивної сили дуже повільно зростає.

Окрім зазначених у другому розділі факторів на показники коерцитивної сили впливає також рівень остаточних напружень, що сформувався у матеріалі рами під час експлуатації, монтажні напруження, режими та правильність термічної обробки, хімічний склад використовуваної сталі, ліквідація елементів у межах припустимої згідно ДСТУ, наявність неметалевих включень та структурних перетворень. Тому для контролю конкретних деталей необхідно за будь яких умов підходити диференційовано і на підставі експериментальних досліджень.

3.2. Оцінка впливу деформаційного навантаження на матеріал, що використовується при виготовленні рам тракторів

Для оцінки впливу деформаційного навантаження на матеріал, що використовується при виготовленні рам тракторів, та встановлення взаємозв'язку між зміною структурного стану на коерцитивну силу проведено ряд досліджень. Крім того, після зняття навантажень в матеріалі відбуваються процеси перерозподілу залишкових напружень. Такі ж процеси відбуваються і після зварювання матеріалу рам тракторів. Тому важливим представляється встановлення закономірностей зміни властивостей матеріалу після зняття навантаження.

Зазвичай для виготовлення рам використовується матеріали, близькі за хімічним складом до гарячекатаної сталі 20. Хімічний склад сталі 20: 0,17–

0,24% С, 0,17–0,37% Si, 0,35–0,65% Mn. Вміст міді та нікелю допускається не більше 0,25%, миш'яку – не більше 0,08%, сірки – не більше 0,4%, фосфору – 0,035%.

Структура сталі ферито–перлітна. Термічна обробка дозволяє одержувати структуру рейкового (пакетного) мартенситу. При таких структурних перетвореннях міцність зростає, а пластичність зменшується.

Для досліджень були відібрані зразки у кількості 12 шт. розміром 6,2×20×270 мм. Зроблене випробування 3 шт. зразків на розтягання. Визначено навантаження для встановлення межі плинності зразків:

1 зразок $47180\text{H}=47,180\text{кН}=4,7\text{ т}$

2 зразок $50530\text{H}=50,530\text{кН}=5,0\text{ т}$

3 зразок $49060\text{H}=46,060\text{кН}=4,9\text{ т}$

Середнє значення ($X_{\text{ср}}$), знайдене за трьома зразками дорівнює 48923,66 Н (48,923 Кн). Ця величина навантаження відповідає початку пластичної деформації сталі ($\sigma_{0,2}=280\text{ МПа}$). Визначено нижню межу навантаження – для даного зразка 47,180 Кн

Розтягування зразків проводили за схемою, приведеною в таблиці 3.1.

Після розтягування зразків та зняття навантаження вимірювали коерцитивну силу на кожному із установлених зразків (табл. 3.2).

Вимірювання коерцитивної сили на зразках представимо у таблиці 3.2.

Оцінкою отриманих даних встановлено, що для кривої H_c – навантаження при розтягуванні сталі 20 характерними є три зони (рис. 3.1).

При навантаженні від початкового стану до 0,5–0,6 $\sigma_{0,2}$ відбувається рівномірне підвищення коерцитивної сили по залежності ($R=0,89$):

$$H_c = 3,55 + 0,54 N_{\sigma_{0,2}}, \quad (3.1)$$

де $N_{\sigma_{0,2}}$ – величина навантаження відносно $\sigma_{0,2}$ матеріалу. В цій залежності вільний член характеризує рівень коерцитивної сили (має розмірність [А/см]), що відповідає структурному стану гарячекатаної сталі без навантаження. Коефіцієнт 0,54 характеризує інтенсивність зміни коерцитивної сили від рівня навантажень у пружній області та має

розмірність [Н_c/МПа]. Для цієї зони характерним є переважний вплив на рівень Н_c пружних напружень при розтягуванні зразка.

Таблиця 3.1 - Розрахункове навантаження зразків

№ з.п.	Схема навантажень	Розрахункове значення, кН	Подовження Δ l мм
1	Без навантаження	–	–
2	0,5 X _{ср}	24,462	0,004
3	0,6 X _{ср}	29,354	0,005
4	0,7 X _{ср}	34,138	0,001
5	0,8 X _{ср}	39,138	0,001
6	0,9 X _{ср}	44,031	0,002
7	0,95 X _{ср}	46,000	0,026
8	X _{ср}	48,923	0,028

Таблиця 3.2 - Результати вимірювання коерцитивної сили на зразках зі сталі 20 після зняття навантаження

№ з.п.	Коерцитивна сила зразків (А/см) після зняття навантаження упродовж часу, год							Середнє значення
	Після випробувань			70		100		
1	3,56	3,55	3,6	3,6	3,5	3,5	3,55	3,56
2	3,87	3,6	3,87	3,97	3,8	3,92	3,9	3,84
3	3,65	3,9	3,95	3,97	3,75	3,95	3,82	3,85
4	3,65	3,67	3,72	3,72	3,52	3,66	3,7	3,66
5	3,85	3,57	3,6	3,87	3,7	3,76	3,94	3,75
6	3,58	3,52	3,5	3,67	3,57	3,67	3,64	3,59
7	7,12	7,35	7,1	7,12	6,95	7,07	6,96	7,09
8	7,18	7,37	7,37	7,27	7,12	7,45	7,28	7,29

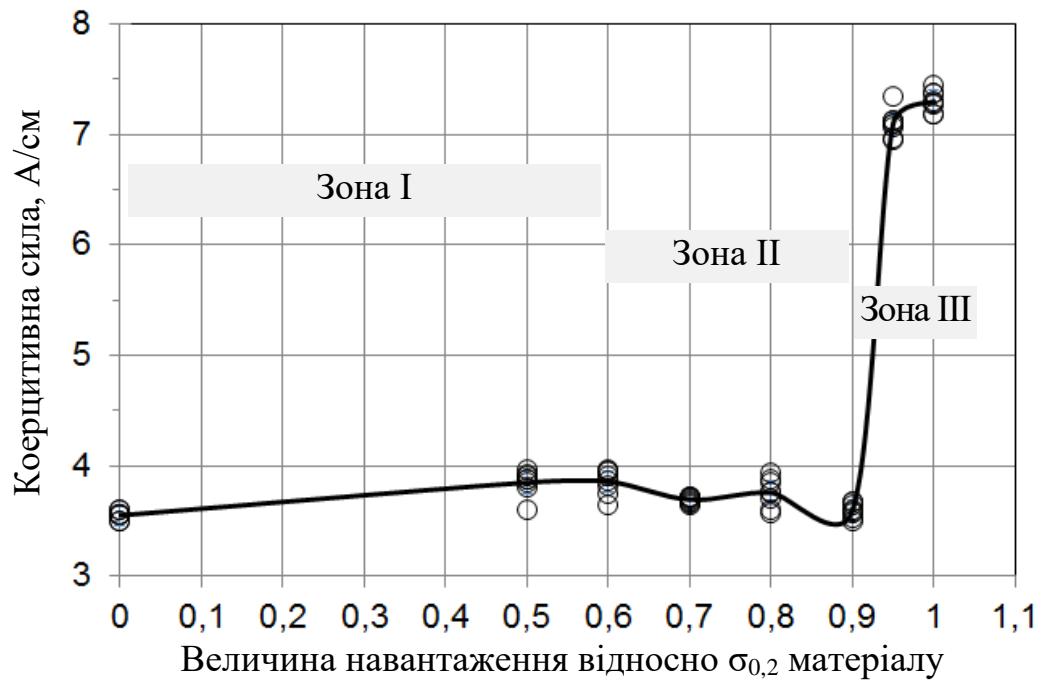


Рисунок 3.1 Залежність H_c сталі 20 від величини навантаження відносно межі її пластичності ($\sigma_{0,2}$) з зазначенням зон, де змінюється характер взаємозв'язку

Друга зона ($0,6-0,9 \sigma_{0,2}$) характеризується нерівномірністю розподілу магнітного показника. Зниження рівня H_c до $3,5-3,65$ А/см зумовлене деформацією металу в локальних мікрооб'ємах. Підтвердженням цього припущення є зниження розкиду значень магнітного параметру до 4 разів (середньоквадратичне відхилення зменшилось з $0,12$ А/см ($0,6 \sigma_{0,2}$) до $0,03$ А/см при $0,7 \sigma_{0,2}$) у зонах такої деформації.

У зоні навантажень, що є близькою до початку пластичної деформації ($0,95-1 \sigma_{0,2}$) відбувається значне підвищення рівня коерцитивної сили (в $1,5-2$ рази у порівнянні з похідним станом). Це відбувається внаслідок зміни структурного стану матеріалу та підвищення рівня його дефектності. Зміна рівня H_c для такої зони може бути описана таким рівнянням ($R=0,89$):

$$H_c = 4,14 + 37,1 N_{\sigma_{0,2}}, \quad (3.2)$$

де $N_{\sigma_{0,2}}$ – величина навантаження відносно $\sigma_{0,2}$ матеріалу. Вільний член характеризує рівень коерцитивної сили, що відповідає структурному стану в полі пружних напружень та локальних деформацій під навантаженням $4,7-4,9$ т. Коефіцієнт $37,1$ характеризує інтенсивність зміни коерцитивної сили від рівня

навантажень у області пружних та пластичних деформацій. Інтенсивність підвищення коефіцієнту зміни H_c для даної зони вища, ніж пружних деформацій (перша зона) один практично у 70 разів, що свідчить про інтенсивність протікання змін структурного стану матеріалу під дією навантажень.

Після зняття навантаження відбуваються процеси розподілу залишкових напружень у матеріалі. Це в свою чергу призводить до зміни рівня H_c через певний проміжок часу. Для визначення впливу таких процесів на магнітну характеристику вимірювали H_c одразу після зняття навантаження та через 70 та 100 годин (див. табл. 3.3). Результати вимірювань представлені на рис. 3.2 та 3.3.

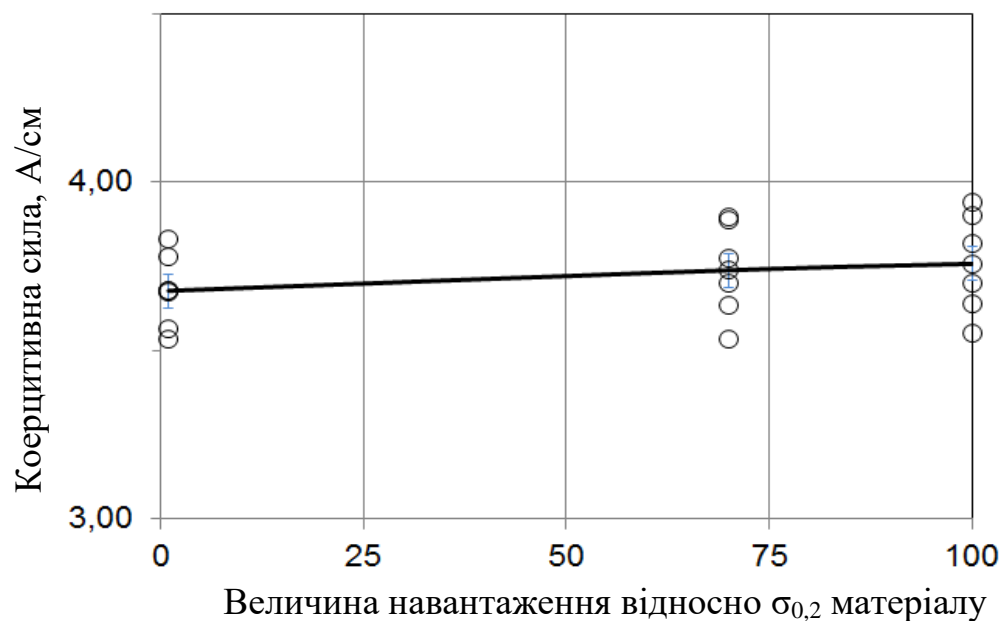


Рис. 3.2 Коерцитивна сила зразків (А/см) розтягнутих від похідного нормалізованого стану до $0,9 \sigma_{0,2}$ після зняття навантаження упродовж часу

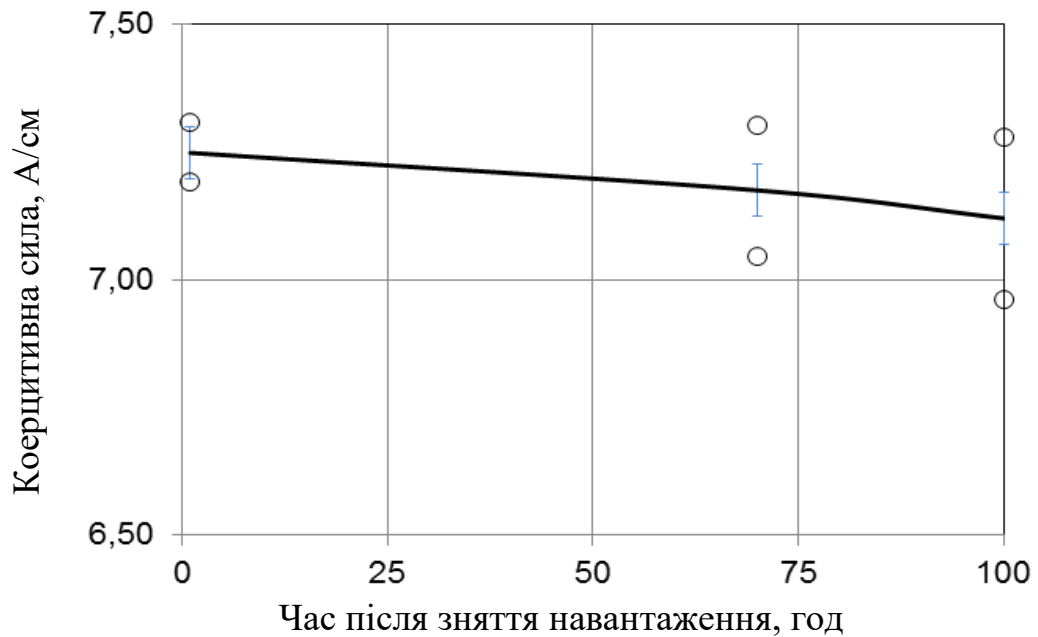


Рис. 3.3 Коерцитивна сила зразків (А/см) розтягнутих в області текучості сталі ($0,95-1 \sigma_{0,2}$) після зняття навантаження упродовж часу

Встановлено, що релаксація напружень у зразках зі сталі 20 після зняття навантаження (для I та II зон) на протязі 100 годин призводить до підвищення рівня коерцитивної сили і може бути описана рівнянням ($R=0,99$):

$$H_c = 3,68 + 0,001 t, \quad (3.3)$$

де t – час, що пройшов після зняття навантаження, год. Підвищення рівня магнітного параметру може бути свідченням того, що релаксація напружень відбувається за рахунок пластичної деформації мікрооб'ємів матеріалу. При збільшенні проміжку часу (понад 100 год) буде відбуватись релаксація за рахунок перерозподілу остаточних напружень та вирівнювання їх рівня, що призведе до зниження H_c .

В той же час для зони III, для якої характерний інтенсивний деформаційний вплив на структуру, зняття навантаження буде призводити тільки до монотонного зниження рівня H_c внаслідок перерозподілу залишкових напружень. Це й підтвердили експериментальні дані (рис. 3.3). Рівень коерцитивної сили для зразків розтягнутих в області текучості сталі ($0,95-1 \sigma_{0,2}$) після зняття навантаження має залежність від часу витримки ($R=0,98$):

$$H_c = 7,26 - 0,001 t, \quad (3.4)$$

Через певний проміжок часу процеси релаксації стабілізуються.

Таким чином, значення діагностичного критерію - коерцитивної сили понад 4 А/см є граничними. Перевищення цієї межі свідчить про перенавантаження рами трактора в процесі експлуатації (понад $0,95\sigma_{0,2}$) та необхідність її ремонту шляхом заміни деформованого матеріалу. При значеннях коерцитивної сили 3,5–4 А/см матеріал перебуває у області пружних деформацій.

Висновки

1. Визначений рівень коерцитивної сили – 3,5-4,0 А/см. При таких показниках конструкція буде працювати в допустимих межах. Чим більший рівень коерцитивної сили, тим менший ресурс роботи конструкції. При перевищенні 4,0 А/см потрібно виконати дефектацію деталі, визначити та усунути пошкодження.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз існуючих конструкцій приладів, що вимірюють коерцитивну силу як вітчизняного так і закордонного виробництва. Сформульовано принципи вибору розмірів електромагнітів.

Встановлено, що найбільш придатними для оцінки якості деталей сільськогосподарської техніки є коерцитиметри з накладними перетворювачами, де індикацію розмагніченого стану фіксують датчиками Хола (наприклад КРМ-Ц, що виготовляється Харківською науково-дослідною фірмою “Спеціальні наукові розробки”).

2. На підставі виконаних публікацій встановлена область застосування методу контролю якості за коерцитивною силою – структурного стану матеріалу.

3. У зв'язку з тим, що більшість існуючих публікацій зосереджена на розробці бракувальних норм для конкретних деталей і тому накопичений досвід може бути перенесений на інші деталі з дуже значними припущеннями, розробили методику діагностування неруйнівним методом для отримання достовірної інформації про фізико-механічні властивості металу і реальний режим роботи рами трактору на підставі аналізу рівня коерцитивної сили.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Механіка руйнування та міцність матеріалів [Текст] = Fracture Mechanics and Strength of Materials : довід. посіб. / за заг. ред. акад. НАН України В. В. Панасюка ; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка. - Львів : Каменяр, [198-] . - ISBN 5-12-000300-1. Т. 15 : Структура матеріалів і втомна довговічність елементів конструкцій / О. П. Остащ. - 2015. – 304.
2. Основи теорії коливань в інженерній справі та втомна міцність [Текст] : навч. посіб. / С. В. Кагадій [та ін.]. - Дніпропетровськ : Свідлер А. Л., 2015. - 204 с.
3. Втомна пошкоджуваність валопроводів турбоагрегатів при крутних коливаннях [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.09 / Башта Дмитро Анатолійович ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ун-т". - Київ, 2014. - 21 с.
4. Моделі і методи прогнозу локального руйнування у пластинчастих елементах конструкцій з тонкими включеннями та підкріпленнями при сталому й циклічному навантаженнях [Текст] : дис... д-ра техн. наук: 01.02.04 / Кундрат Микола Михайлович ; Львівський національний ун-т ім. Івана Франка, Національний ун-т водного господарства та природокористування. - Рівне, 2007. - 347 арк.
5. Випробування зварних з'єднань металевих матеріалів руйнівні. Випробування на твердість [Текст]. - Київ : УкрНДНЦ, [2010] . - (Національний стандарт України). Ч. 2 : ДСТУ ISO 9015-2:2009. Випробування на мікротвердість (ISO 9015-2:2003, IDT). - Чинний від 2012-01-01. - 2018. - IV, 8 с. : рис., табл. - Бібліогр.: с. 8.
6. Магнітні властивості структурно-невпорядкованих слабомагнітних твердих тіл [Текст] : автореф. дис... д-ра фіз.-мат. наук: 01.04.07 / Бродовий Олександр Володимирович ; Київський національний ун-т ім. Тараса Шевченка. - К., 2006. - 35 с.
7. Вплив лазерної імпульсної обробки на структуру та магнітні властивості приповерхневого шару Fe-Al-C сплавів [Текст] : автореф. дис... канд.

фіз.- мат. наук: 01.04.13 / Дзевін Євгеній Миколайович ; НАН України, Ін-т металофізики ім. Г. В. Курдюмова. - К., 1999. - 16 с.

8. Неруйнівний контроль зварювання [Текст] = Неразрушающий контроль сварки : підруч. : у 2 т. / Гавриш Павло, Чигарьов Валерій, Макаренко Наталія ; [ДВНЗ "Приазов. держ. техн. ун-т"]. - Маріуполь : ДВНЗ "ПДТУ", 2021. Т. 2. - 2021. - 288 с.

9. Неруйнівний контроль зварювання [Текст] = Неразрушающий контроль сварки : підруч. : у 2 т. / Гавриш Павло, Чигарьов Валерій, Макаренко Наталія ; [ДВНЗ "Приазов. держ. техн. ун-т"]. - Маріуполь : ДВНЗ "ПДТУ", 2021. Т. 1. - 2021. - 256 с.

10. ДСТУ EN ISO 22825:2017 (EN ISO 22825:2017, IDT; ISO 22825:2017, IDT) Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Контроль зварних швів в аустенітних сталях і сплавах на основі нікелю [Текст]. - Чинний від 2019-01-01. - Київ : УкрНДНЦ, 2021. - V, 20 с.

11. Неруйнівний контроль поковок зі сталі [Текст]. - Київ : УкрНДНЦ, 2019 . - (Національний стандарт України). Ч. 1 : ДСТУ EN 10228-1:2017 (EN 10228-1:2016, IDT). Магнітопорошковий контроль. - На заміну ДСТУ EN 10228-1:2005 ; Чинний від 2019-01-01. - 2019. - IV, 8 с.

12. Неруйнівний магнітний контроль структурно-механічних властивостей виливків зі сталей та чавунів [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.04 / Твердохвалов В'ячеслав Олексійович ; НАН України, Фіз.-технол. ін-т металів та сплавів. - Київ, 2018. - 28 с.

13. Акустико-емісійний неруйнівний контроль процесів деградації InGaN/GaN світловипромінювальних діодів [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.27.06 / Киселюк Максим Павлович ; Нац. акад. наук України, Ін-т фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова. - Київ, 2014. - 20 с.

14. Неруйнівний контроль виробів електронної техніки за рівнем низькочастотного шуму [Текст] : монографія / Д. В. Михалевський, В. М. Кичак ; Вінниц. нац. техн. ун-т. - Вінниця : ВНТУ, 2014. - 111 с.

15. Селективна вихрострумова дефектоскопія [Текст] / А. Я. Тетерко, З. Т. Назарчук ; НАН України, Фіз.-механ. ін-т ім. Г. В. Карпенка. - Л. : [б.в.], 2004. - 248 с.

16. Діагностика і дефектоскопія матеріалів та виробів [Текст] : методичні вказівки до виконання лаб. робіт для студ. напряму підгот. 0901 "Інженерне матеріалознавство" інж.-фіз. ф-ту / Національний технічний ун-т України "Київський політехнічний ін-т" ; уклад. Т. А. Роїк [та ін.]. - К. : Політехніка, 2006. - 68 с.

17. Діагностика і дефектоскопія матеріалів та виробів [Текст] : навч. посіб. / Н. Ю. Імбирович, В. І. Шваб'юк ; Луц. нац. техн. ун-т. - Луцьк : Вежа-Друк, 2015. - 339 с.

18. Міцність, тріщиностійкість і довговічність бетонних та залізобетонних конструкцій на засадах механіки руйнування [Текст] / Й. Й. Лучко [та ін] ; НАН України, Фіз.-механ. ін-т ім. Г. В. Карпенка. - Л. : Каменяр, 1999. - 348 с.

19. Довговічність елементів крила транспортного літака із зміцненими функціональними отворами [Текст] : [монографія] / Ясній П. В. [та ін.] ; Тернопіл. нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. - Тернопіль : ТНТУ, 2020. - 125 с.

20. Контактна довговічність і руйнування елементів конструкцій за циклічного навантаження [Текст] : [монографія] / О. П. Дацишин, В. В. Панасюк ; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка. - Київ : Наукова думка, 2018. – 286

21. Надійність і довговічність машин та апаратів хімічних виробництв з урахуванням еволюції їх руйнування [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.13 / Чемерис Андрій Олегович ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського". - Київ, 2018. - 23 с

22. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах [Текст] : [монографія] / О. Є. Андрейків, О. В. Гембара ; НАН України, Фіз.-механ. ін-т ім. Г. В. Карпенка. - К. : Наукова думка, 2008. - 344 с.

23. Механіка руйнування і міцність матеріалів [Текст] : довідник. посіб. / заг. ред. В. В. Панасюк ; НАН України, Фіз.-механ. ін-т ім. Г. В. Карпенка. - Л. : Сполом. - ISBN 978-966-665-493-2. Т. 9 : Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Осташ [та ін.] ; ред. О. П. Осташ, В. М. Федірко. - Л. : [б.в.], 2007. - 1066 с.

24. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно армованих композитів [Текст] : монографія / В. В. Божидарнік [та ін.] ; заг. ред. В. В. Божидарнік ; Луц. держ. техн. ун-т, Львів. нац. ун-т ім. І. Франка, Ін-т приклад. пробл. механіки та математики ім. Я. С. Підстригача НАН України. - Луцьк : Надстир'я, 2007. - ISBN 978-966-517-591-9 (загальний). Т. 1 : Основи механіки руйнування неперервно армованих композитів. - [Б. м.] : [б.в.], 2007. - 400 с.

25. Механіка руйнування та міцність матеріалів [Текст] = Fracture Mechanics and Strength of Materials : довід. посіб. / за заг. ред. акад. НАН України В. В. Панасюка ; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка. - Львів : Каменяр, [198-] . - ISBN 5-12-000300-1. Т. 9 : Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Осташ [та ін.] ; ред.: О. П. Осташ, В. М. Федірко. - 2007. - 1068 с.

26. Технологія машинобудування [Текст] : навч. посіб. / В. Б. Копей, З. М. Одосій, О. Р. Онисько ; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу, Каф. комп'ютериз. машинобуд. - Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2021. Ч. 1. - 2021. - 203с.

27. Ультразвукова ударна обробка конструкцій і споруд транспортного машинобудування [Текст] : монографія / [Б. М. Мордюк та ін.] ; за ред. д-ра техн. наук, проф. Г. І. Прокопенка . - Суми : Університетська книга, 2020. - 309 с.

ВСТУП

На початку нашого сторіччя для діагностики рамних конструкцій тракторів неруйнівним методом з врахуванням структури, фазового складу і міцнісних характеристик почали використовувати магнітні характеристики. В даний час гостро стоїть проблема діагностики стану конструктивних елементів тракторів, вона актуальна перш за все через значну кількість об'єктів, які відпрацювали свій нормативний термін, а також через відсутність методик неруйнівного контролю для отримання достовірної інформації про фізико-механічні властивості металу і реальний режим роботи конструкції. Ця проблема ускладнюється економічними умовами на підприємствах, що експлуатують такі об'єкти. Значною мірою задача може бути вирішеною вже зараз за допомогою магнітного неруйнівного контролю. Робота спрямована для об'єднання фізичних основ магнітного методу неруйнівного контролю і неруйнвної діагностики, що допоможе в підвищенні якості ремонту і експлуатації рам тракторів і своєчасному попередженні руйнування відповідальних конструктивних елементів, при експлуатації машин, відпрацювавших свій нормативний термін служби.

Робота присвячена аналізу механізмів залежності від внутрішніх і зовнішніх пружних напружень тільки одного з вищевказаних магнітних параметрів – коерцитивної сили конструкційних сталей. Нормативною базою магнітного контролю металоконструкцій з феромагнітних сталей є Міжнародний стандарт ISO 4301. Технічне забезпечення - магнітні структуроскопи серії КРМ-Ц, що випускаються фірмою «Спеціальні наукові розробки (СНР)». В основу методики покладена кореляційна залежність між фізико-механічними властивостями феромагнітних матеріалів і параметром петлі магнітного гістерезису, контрольованим при статичних і втомних випробуваннях на всіх стадіях навантаження, аж до руйнування. Єдність природи намагнічення металу, пружньопластичної деформації, накопичення пошкоджень і зростання коерцитивної сили дозволяє моделювати на зразках процес навантаження металу при експлуатації в умовах навантаженого стану

В магнітних методах неруйнівного контролю (НК) звичайно використовують такі параметри, як коерцитивна сила H_c , залишкова намагніченість M_r , максимальна μ_{\max} , початкова μ_a і оборотна μ_r магнітні проникності і т.д., які чутливі, з одного боку, до структурних змін в сталях, а з іншою, - до внутрішніх σ_0 , і зовнішньому діючим σ_0 пружним напруженням.

Коерцитивна сила H_c є напруженістю магнітного поля, необхідного для знищення залишкової намагніченості (H_{cM}) або індукції (H_{cB}) і є, таким чином, мірою опору феромагнітного матеріалу розмагнічуванню, що відбуваються в полях H_c звичайно шляхом зсуву міждоменних меж (МДГ) або обертання вектора намагніченості (в однодоменних частинках).

Фізичною причиною цього є магнітопружна взаємодія між намагніченням доменів і пружними деформаціями в кожному феромагнітному кристалі. В результаті вище перераховані магнітні параметри в тому чи іншому ступені залежать від рівня внутрішніх, величини і знака зовнішніх пружних напружень. Багато дослідників на основі цієї залежності пропонували особисті методики оцінки макро-; і мікронапружень, діючих в сталевих конструкціях. Проте для всіх цих робіт характерні одні і ті ж недоліки:

1) дослідження відносилися до конкретному випадку (наприклад, виріб з певної сталі, конкретний структурний і магнітний стан)

2) в цих роботах був відсутній в послідовний фізичний аналіз причин кореляційного зв'язку магнітного параметра з величиною напружень і меж її застосовності; іншими словами, вони не враховували всі основні чинники, які істотно впливали як на початкову величину того або іншого магнітного параметра, так і на характер його залежності від σ_0 .

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Аналіз фізичної природи коерцитивної сили феромагнітних матеріалів

Коерцитивна сила H_c є напруженістю магнітного поля, необхідного для знищення залишкової намагніченості (H_{cM}) або індукції (H_{cB}) і є, таким чином, мірою опору феромагнітного матеріалу розмагнічуванню, що відбуваються в полях H_c звичайно шляхом зсуву міждоменних меж (МДГ) або обертання вектора намагніченості (в однодоменних частинках) [1, 2]. При цьому (внутрішня) $H_{cM} = H_c(1 + dB/dH)$ [3] є більш інформативною характеристикою [4]. В однофазному феромагнетикі структурно-чутлива характеристика залежить від таких чинників тонкої структури, як густина і розподіл дислокацій, пористість, величина і орієнтування зерна, а також від неоднорідності хімічного складу, напруженого стану, розміру і форми включень, їх взаємодії і т.д. [5]. Це пояснюється тим, що H_c тісно пов'язана з магнітною енергією і внутрішнім полем анізотропії в феромагнітній речовині, включаючи магнітокристалічну анізотропію, анізотропію форми, анізотропію напружень (магніострикцію), обмінну і наведену анізотропію, оцінюваних відповідними константами K , N , λ і ін. В першому наближенні $H_c \sim NM_s + aK/M_s + b\lambda\sigma/M_s$, де M_s - намагніченість насичення; N - середній розмагнічуючий чинник частинок анізотропної форми; $a \approx b \approx 1$ -константи, не залежні від температури; σ - величина внутрішніх напружень (ВН). Різні феромагнітні метали і сплави мають різну структуру, яка, в свою чергу, визначає доменну структуру і параметри кривої намагнічення, а отже, і різну магнітну жорсткість, що характеризується рівнем H_c .

Свідоме регулювання H_c за допомогою обробки для потрібної структури має першорядне значення. Для цього, а також з метою подальшого уточнення можливостей неруйнівного коерцитиметричного контролю матеріалів в запропонованому огляді узагальнені багато відомих на сьогодні експериментальних і теоретичних даних щодо взаємозв'язку H_c з основними

параметрами тонкої структури однофазних феромагнетиків і деякими іншими факторами.

Основні дослідження впливу домішок на рівень H_c проведені на технічно чистому залізі і маловуглецевих сталях [7]. Коерцитивна сила сплавів звичайно перевищує H_c чистих феромагнітних матеріалів (за винятком деяких композицій на основі заліза з кремнієм і алюмінієм). Нижче за межу розчинності атоми упродовження створюють більші напруження, межі розчинності зростання не викликані утворенням другої фази. Мало впливають на H_c маловуглецевих сталей невеликі кількості As, V, Cr, Si, Mn, Mo, Ni, Sn, W. Значно підвищують H_c заліза вже невеликі кількості таких елементів, як вуглець (коефіцієнт підвищення H_c на 1% легуючого елемента рівний ~ 2 кА/м %), кисень і сірка (по 0,48 кА/м %), фосфор (0,34 кА/м %), а також Al, Be, Hg, In, Pt і інші.

Згідно теорії Беккера-Дерінга [9, 10], потенційна магнітна енергія $H_c M_s$ елементарного об'єму феромагнетика в полі H_c пропорціональна густині магнітопружної енергії мікронапружень $\lambda\sigma$ в елементі: $H_c M_s \sim a \lambda\sigma$, де a - коефіцієнт, залежний від розподілу напружень. Коерцитивна сила залежить від величини і зміни напружень внаслідок залежності від цього параметра енергії МДГ і орієнтації доменів. В моделі Е.І. Кондорського [11], справедливої для малих значень H_c , враховується не абсолютна величина напружень, а його градієнт $d\sigma/dx$ або середнє значення його амплітуди Δx , а також ширина МДГ σ : $H_c \sim (\lambda\sigma/M_s)d\sigma/dx$. Керстен [14] додатково ввів в розрахунок залежності $H_c(\sigma)$ поняття довжини хвилі, або періоду флуктуації (дисперсності) напружень l : при $l \ll \sigma$ $H_c \sim (\lambda l/M_s \delta)d\sigma/dx$, при $l \gg \delta$ $H_c \sim (\lambda l/M_s \delta)d\sigma/dx$. Звідси максимальне значення H_c матиме місто при $l \approx \delta$, що істотно при визначенні типу ВН (другого або третього роду). Величина l , знайдена при магнітних вимірюваннях, приблизно відповідає відстані між дислокаціями [6]. Несель [13] для однофазного напруженого феромагнетика вивів дещо іншу формулу: $H_c \sim (a\lambda\sigma/M_s) \lg(M_s^2 / \lambda\sigma)^{1/2}$, де a - об'єм напружених (понад 300МПа) ділянок матеріалу (визначається по [15]). В

іншому випадку він запропонував одночасно з напруженнями враховувати вплив включень по наступному виразу: $H_c \sim Aa + Bv$, де v - об'єм немагнітних включень або пір; A і B - коефіцієнти пропорційності. Розрахунок показав, що для заліза $H_c \sim 2,1a + 360v$, а для нікелю $H_c \sim 330a + 97v$. В залізі через велику кристалічну анізотропію основний внесок в H_c дають включення, а в нікелі внаслідок переважання магніострикційної енергії ведуча роль належить напруженням. Пружна енергія взаємодії МДГ з включеннями теоретично розглянута в роботі [15] з урахуванням пружної і магніострикційної анізотропії при різних константах пружності матриці і виділення. Порівняння результатів коерцитиметричного визначення напружень в нікелі з даними рентгеноструктурного аналізу показало добру згоду лише при напруженнях до 100 МПа [16]. Оскільки найбільш надійні результати виходять для головних напрямів кристалу, рекомендується враховувати кутовий розподіл кристалографічних осей в окремих зернах. Зниження H_c за рахунок зняття ВН при відпалі сплавів; Fe-Ni підтверджено в роботі [19] і добре відповідає теоретичному розрахунку.

Інформація про ступінь орієнтування доменів, а отже, і зерен, може бути отриманий з величини різниці між H_c анізотропних і ізотропних зразків, а також при вимірюваннях H_c у напрямі найважчого намагнічення. Залежність H_c від кута до найбільш раціонального напрямку (особливо при одноосній анізотропії) може бути використана для визначення типу процесу перемагнічування в дрібних частинках [6].

Залежність H_c від поверхневих (плоских) дефектів є подвійною. З одного боку, межі зерен можуть бути джерелами зародків перемагнічування [24, 25], розміри яких визначаються величиною зерна. З другого боку, ці межі є перешкодами зсуву МДГ внаслідок спотвореної будови і збільшеної концентрації домішок, аналогічно чужорідним включенням [22].

В багатьох роботах по теорії коерцитивної сили оцінюють залежність H_c феромагнетиків від густини ρ і розподілу дислокацій [17].

Основним типом дислокацій, руху яких обумовлено зміна H_c , є розщеплені гвинтові дислокації при значенні енергії ДУ $\sim 0,09$ Дж/м². Зростання H_c при відпалі деформованих сплавів на основі нікелю та кобальту пояснено появою пересичених другим компонентом кластерів і зон ближнього порядку, а також процесом полігонізації. В роботах [26, 27] проведений якісний теоретичний розрахунок H_c дислокаційних структур, типових для деформованих монокристалів крем'янистого заліза. Зміни в структурі дислокації, вивчені електронно-мікроскопічним методом, зіставлені зі зміною H_c і магнітострикції насичення. Показано, що температурна залежність H_c крем'янистого заліза істотно залежить від типу дислокацій, а також від пружної і магнітостатичної анізотропії обумовлена головним чином температурним ходом магнітострикційних і пружних констант.

Електронно-мікроскопічне і коерцетиметричне дослідження сталі типу 06X2НМБА після різних режимів термообробки також показало, що основними чинниками, що впливають на H_c є густина і розподіл дислокацій ($H_c \sim \rho^{1/2}$); вплив виділень був другорядним [26].

1.2. Пластична деформація

Вплив на H_c зміни напруженого стану і густини дислокацій внаслідок деформації розглянуто вище. В цьому розділі приведені емпіричні дані про кореляцію H_c з напруженнями на різних ділянках КДУ і ступенем пластичної деформації ε . Залежність $H_c(\varepsilon)$ в монокристалах феромагнітних металів вивчалася в роботах [28, 29], згідно яким КДУ $\sigma(\varepsilon)$ досліджених матеріалів, деформованих у напрямі орієнтації містять до трьох практично прямолінійних ділянок з різними кутами нахилу. На першій ділянці кривої зміцнюється густина дислокацій ρ пропорційна напруженню τ , і, оскільки $H_c \sim \rho^{1/2}$, теоретично повинне бути $H_c \sim \tau^{1/2}$. В другій і третій областях деформації $\rho \sim \tau^2$ і тому $H_c \sim \tau$. Перевірка відповідності між розрахунковими і експериментальними співвідношеннями $H_c(\tau)$ підтвердила ці висновки авторів і в цілому застосовність статистичної теорії Тройбле для трактування процесів, що обумовлюють зміну H_c . Як приклад вони розраховували частину кривої $H_c(\tau)$ для нікелю в другій області КДУ. Передбачалося, що рух

180-градусних МДГ стримується дислокаційними сегментами завдовжки ~ 1 мкм і в кожному з актів взаємодії виникає середня сила величиною $\pm 3bG\lambda$, знак якої визначається знаком дислокації. Тоді теорія дає величину $\partial H_c / \partial \tau \approx 4 \text{ А/м} \times \text{МПа}$, що близько до її експериментальних значень, що становлять 8-24 $\text{А/м} \times \text{МПа}$. Перегини що виходять на досвідчених кривих $H_c(\tau)$, чітко відображають межі між характерними областями КДУ. Запропонована модель дозволяє, знаючи залежність густини дислокацій від напружень зсуву, обчислити деформаційну залежність $H_c(\tau)$, або ж по зміряній залежності $H_c(\tau)$ визначити приріст при пластичній деформації. Перший шлях був використаний для монокристалів нікелю з відомим взаємозв'язком $\rho(\tau)$, де таким чином була підтверджена справедливність закону $H_c \sim \rho^{1/2}$. В монокристалах заліза кількісна залежність $\rho(\tau)$ ще не визначена, і автори [30] спробували вирішити зворотну задачу: по змінній залежності $H_c(\tau)$ отримати функцію $\rho(\tau)$. Для цього використано відоме співвідношення між напругою зсуву і густиною дислокацій; $\tau = \alpha G b \rho^{1/2}$, где $\alpha = 0,02 / (\partial H_c / \partial \tau)$. При зміряному збільшенні $\partial H_c / \partial \tau$ рівному 0,5872 і 2,216 $\text{А/м} \times \text{МПа}$ в першій і другій областях КДУ відповідно, отримано $\alpha_1 = 0,30$ и $\alpha_2 = 0,08$, що узгоджується з електронно-мікроскопічними даними. Різний вид залежності $\rho(\tau)$ в першій і другій областях зміцнення пов'язаний з тим що запропонована модель дозволяє, знаючи залежність густини дислокацій від напруги зсуву, обчислити деформаційну залежність $H_c(\tau)$, або ж по зміряній залежності $H_c(\tau)$ визначити приріст ρ при пластичній деформації. Перший шлях був використаний для монокристалів нікелю з відомим взаємозв'язком $\rho(\tau)$, де таким чином була підтверджена справедливність закону $H_c \sim \rho^{1/2}$. В монокристалах заліза кількісна залежність $\rho(\tau)$ ще не визначена, і автори [26] спробували вирішити зворотну задачу: по виміряній залежності $H_c(\tau)$ отримати функцію $\rho(\tau)$. Для цього використано відоме співвідношення між напруженням зсуву і густиною дислокацій; $\tau = \alpha G b \rho^{1/2}$, где $\alpha = 0,02 / (\partial H_c / \partial \tau)$, де $\alpha = 0,02 / (\partial H_c / \partial \tau)$. При зміряному зростанні $\partial H_c / \partial \tau$, рівному 0,5872 і 2,216 $\text{А/м} \times \text{МПа}$ в першій і другій областях КДУ відповідно, отримано $\alpha_1 = 0,30$ і $\alpha_2 = 0,08$, що узгоджується з електронно-мікроскопічними даними. Різний вид залежності $\rho(\tau)$ в першій і

другій областях зміцнення зв'язаний з тим, що в першій, більш пологій області кривої закінчуються процеси динамічного відпуску, що супроводжується меншим коефіцієнтом зміцнення. Але оскільки H_c визначається ефективною густиною дислокацій, пряма $H_c(\tau)$ росте в пологій області КДУ швидше, ніж в більш крутій області. На відміну від приведених результатів при великих деформаціях розтягуванням сплавів заліза з 51-72% Ni спостерігали залежність типу $H_c \sim \varepsilon^{1/2}$. Результати коерцитиметричного дослідження пластичної деформації маловуглецевої сталі також показали залежність $H_c = A + B\sigma - H_{сисх} + k\varepsilon^{1/2}$. При цьому експериментальні результати уклалися на три прямолінійні ділянки, відповідні трьом стадіям зміцнення.

Встановлена можливість визначення H_c по величині σ , навпаки, що може бути корисним, зокрема, при контролі рам тракторів з пластичним деформуванням в експлуатації. На початкових стадіях деформації загартованих сталей як розтяг, так і стиснення знижують H_c , тоді як будь-який вид деформації відпалених або високо-відпалених сталей підвищує її відповідно до теоретичної залежності $H_c \sim H_{сисх} + \varepsilon^{1/2}$. Проте апроксимація експериментальних даних по $H_c(\tau)$ для сталей приводить до більш складної залежності: $H_c \sim H_{сисх} - 0,004H_{сисх} (\varepsilon^2 + 100\varepsilon)$ для загартованого і низько-відпаленого стану і $H_c \sim H_{сисх} + H_{сисх} (0,004\varepsilon^2 + 0,4\varepsilon)$, для високо-відпаленого стану [29]. На підставі отриманих в роботах [2] закономірностей зміни $H_c(\tau)$ сталей 45, 45X і 40X зроблено висновок, що неруйнуючий коерцитиметричний метод визначення ступеня деформації є можливий для загартованих, низько- і високо-відпалених станів сталей. Проте для структур середнього відпалу досліджених сталей цей метод не може служити параметром неруйнівного контролю у зв'язку із слабою і неоднозначною залежністю $H_c(\tau)$. Виміряли H_c при розтягуванні монокристалів трансформаторної сталі, що деформуються в напрямі [23]. При деформації до 5-8% H_c швидко зростала; при $\varepsilon = 8-10\%$ вона мінялася слабо, не дивлячись на зростання густини дислокацій, що продовжується, при незначній зміні структури дислокації. При $\varepsilon > 20\%$ з'являлись дислокації вторинної системи ковзання, що супроводжувалися більш різким зростанням H_c . Це пов'язано з появою значних ВН, виникаючих при взаємодії пересічних систем ковзання. Крім того, підтверджена залежність H_c від просторового

розташування дислокацій. Встановлено також, що зміни H_c при деформації розтягуванням у напрямі 15° до $\varepsilon = 15\%$ не пов'язане з розподілом магнітних фаз і визначаються насамперед густиною дислокацій. Різке збільшення H_c в інтервалі $\varepsilon = 15-20\%$ пов'язано з формуванням в процесі деформації кристалографічної текстури [20]. Далі вивчена залежність від σ коерцитивної сили, що вимірюється вздовж і поперек напрямку прикладання розтягуючих напружень, в сплаві Fe - 50% Co з додатковими константами магнітострикції λ_{100} і λ_{111} . Передбачається що на відміну від короткохвильових напружень в полі дії дислокацій [17].

1.3. Температурна залежність коерцитивної сили

Залежність $H_c(t)$ визначається температурною залежністю утворюючих її параметрів M_s і $\lambda\sigma$. Так, наприклад, при аналізі кривих $H_c(t)$ сплавів типу RFe_2 залежно від рівня магнітокристалічної анізотропії знайдено два типи поведінки H_c : відсутність температурної залежності H_c для з'єднань з $R=Gd$, $R=Gd, Y, La$ і Ce і сильна залежність для інших РЗМ [31]. Оскільки величина звичайно знижується з температурою набагато швидше, ніж M_s , H_c всього монотонно знижується при підвищенні температури. Виняток з цього правила становлять окремі ділянки кривих $H_c(t)$ для деформованих монокристалів чистого і крем'янистого заліза, деяких багатофазних магнітожорстких сплавів, сталей з пластинчатим цементитом і ін. При цьому екстремуми на кривих ${}_mH_c(f)$ і ${}_bH_c(t)$ можуть розташовуватись при різних температурах [4]. При дослідженні залежності $H_c(t)$ в залізі, нікелі і кобальті, дисперсійнозміцнених немагнітними частинками Al_2O_3 або ThO_2 (2-2,5%), отримана відповідність з розрахунками [32]. Вивчення такої залежності в сталях дозволяє зв'язати величину H_c з діаметром і кількістю частинок другої фази і неметалічних включень [20]. Максимум на кривих $H_c(t)$ сплавів типу альніко і Fe-Cr-Co при 820-830°C викликаний динамікою зміни фазового складу, M_s і θ_c третьої фази, що узгоджується з теоретичним розрахунком H_c для моделі багатофазних систем [11, 12].

Коерцитивна сила сплавів Fe-Cu і недеформованого сплаву Fe - 3,25% Si зменшується з підвищенням температури. Для деформованих сплавів вона

росте з підвищенням температури і досягає максимуму при $\sim 500^\circ\text{C}$, після чого різко знижується в районі θ_c . Це вказує на те, що до 500°C перемагнічування відбувається при переміщенні МДГ, а при більш високих температурах - шляхом обертання вектора намагніченості. Залежність $H_c(t)$ досліджених сплавів в недеформованому стані пояснюється взаємодією рухаючихся МДГ з немагнітними включеннями [26]. Результати дослідження $H_c(t)$ в сталях з 0,08-1,57% С показали, що у разі пластинчатого перліту при підвищенні температури до 100°C H_c знижується, потім до температури Кюрі цементиту ($\theta_{\text{цц}} = 210^\circ\text{C}$) росте до максимуму і далі зменшується до нуля при температурі Кюрі фериту ($\theta_{\text{сф}} = 768^\circ\text{C}$).

При зернистому перліті H_c з підвищенням температури безперервно знижується. Порівняння експериментальних результатів з обчисленими на основі моделі, що враховує магнітокристалічну магнітопружну енергію для обох морфологій перліту, показало добрий збіг. В роботі [28] рівень H_c при θ_c пластинчатого цементиту пояснюється, окрім зникнення його намагніченості, магнітостатичною взаємодією цієї фази з МДГ між включеннями цементиту, внаслідок чого відсутній внесок магнітостатичної енергії в H_c , і остання з підвищенням температури безперервно знижується.

Узагальнюючи вищесказане внесок механізмів гальмування дислокацій в загальну умовну межу текучості сталей може бути представлений як:

$$\sigma_{0,2} = \Delta\sigma_0 + \Delta\sigma_{\text{т.р.}} + \Delta\sigma_{\text{д.з.}} + \Delta\sigma_{\text{д.}} + \Delta\sigma_{\text{з.}}, \quad (1.1)$$

де $\Delta\sigma_0$ - опір ґратки металу руху вільних дислокацій (напруження Пайерлса-Набаро), МПа; $\Delta\sigma_{\text{т.р.}}$ - твердорозчинне зміцнення, МПа; $\Delta\sigma_{\text{д.з.}}$ - дисперсійне зміцнення, МПа; $\Delta\sigma_{\text{д.}}$ - дислокаційне зміцнення, МПа; $\Delta\sigma_{\text{з.}}$ - зернограничне зміцнення, МПа.

Взаємозв'язок між магнітними та механічними властивостями залізовуглецевих сплавів на основі відомих на сьогоднішній день теоретичних та експериментальних моделей узагальнено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Взаємозв'язок між магнітними та механічними властивостями залізовуглецевих сплавів

Теоретичні моделі механізмів гальмування дислокацій	Теоретичні моделі зв'язку H_c і структурного стану
<p>Напруження Пайерлса-Набарро:</p> $\Delta\sigma_0 = \frac{2G}{1-\nu} \exp\left(-\frac{2\pi d}{(1-\nu)b}\right), \quad (1.2)$ <p>де d - міжплощинна відстань; b - вектор Бюргерса; ν - коефіцієнт Пуассона; G - модуль зсуву.</p>	<p>Модель Малека:</p> $H_c = \frac{3 \Delta E b \lambda_s G}{8\mu_0 M_s L} \left(\frac{1+\nu}{1-\nu}\right) \left[(d_{дл} + \delta) \delta \ln\left(\frac{2L}{d_{дл} + \delta}\right) \right]^{1/2} \sqrt{\rho} \quad (1.3)$ <p>де $d_{дл}$ - розмір напруженої ділянки, який визначається як $d_{дл} = 1/\sqrt{\rho}$; ΔE - зміна потенційної енергії доменної межі при її зсуві в пружному полі лінійної дислокації на відстані Δx; L - середній розмір домену; λ_s - магнітострикція насичення; δ - ширина доменної стінки.</p>
<p>Зміцнення твердого розчину при легуванні:</p> $\Delta\sigma_{т.р.} = \sum_{i=1}^n K_i C_i, \quad (1.4)$ <p>де K_i - коефіцієнт зміцнення твердого розчину при легуванні елементом в кількості 1 мас.%; C_i - концентрація розчиненого елементу.</p>	<p>Модель Тройбле:</p> $H_c = \frac{4\Delta a}{\mu_0 M_s} \left(C \frac{\partial K}{\partial a} + \frac{3}{2} \sigma \frac{\partial \lambda_s}{\partial a} + \frac{cK + \frac{3}{2} \lambda_s \sigma}{T_c} \frac{\partial T_c}{\partial a} \right) P, \quad (1.5)$ <p>де $P = \delta/l$; Δa - усереднене значення амплітуди коливань концентрацій; C - чисельна константа порядку одиниці</p>
<p>Дисперсійне зміцнення по механізму Орована:</p> $\Delta\sigma_{д.з.} = 0,85M \frac{Gb}{2\pi(\lambda_1 - d_{вкл})} \Phi \ln \frac{(\lambda_1 - d_{вкл})}{2b}, \quad (1.6)$ <p>де Φ - коефіцієнт, що характеризує тип взаємодії з частинками дислокацій ($\Phi = 1/2[1+1/(1-\nu)]$); λ_1 - усереднена відстань між частинками; $d_{вкл}$ - усереднений розмір частинок; M - орієнтаційний множник.</p>	<p>Модель Керстена:</p> $H_c = p \frac{K_{эф}}{\mu_0 M_s} v^n \quad (1.7)$ <p>де $K_{эф}$ - ефективна константа магнітної анізотропії; n - показник ступеня, що залежить від виду включення; p - чинник, що залежить від ступеня дисперсності включень; v - об'єм включень в сплаві, $n = 1/2 \dots 3/4$ та залежить від їх форми.</p>
<p>Зміцнення від щільності дислокацій:</p> $\sigma_d \approx \alpha_1 M G b \sqrt{\rho}, \quad (1.8)$ <p>де α_1 - коефіцієнт, залежний від характеру розподілу і взаємодії дислокацій; ρ - щільність дислокацій.</p>	<p>Модель Віцени:</p> $H_c = \frac{\sigma \Delta E }{2\mu_0 M_s L \Delta x} \left(\ln \frac{L}{\delta} \right)^{1/2} \sqrt{\rho}, \quad (1.9)$ <p>де σ - середнє значення амплітуди внутрішніх напружень; L - середній розмір домену.</p>
<p>Зернограничне зміцнення:</p> $\Delta\sigma_3 = K_{г.з.} / \sqrt{d_3}, \quad (1.10)$ <p>де $K_{г.з.}$ - коефіцієнт, що залежить від кута розорієнтації меж, ступеня зміцнення між частинками; d_3 - середній розмір зерна.</p>	<p>Модель Гудінафа і Магера:</p> $H_c = \frac{15}{16} \frac{\pi \gamma}{\mu_0 M_s} \frac{1}{d_3} \quad (1.11)$ <p>де γ - енергія доменної межі, що відокремлює зародок від решти частини кристала.</p>

Висновки.

1. Вимірювання коерцитивної сили в даний час з успіхом застосовуються при вивченні структурних і фазових перетворень в феромагнітних матеріалах, особливо для з'ясування їх кінетики і може бути використано для діагностування рам тракторів.

2. Коерцитивна сила має дуже високу структурну чутливість: на відміну від інших властивостей, змінних в процесі обробки матеріалу на один-два порядки, вона може змінюватися на п'ять порядків.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ І АНАЛІЗ ВИКОРИСТАНИХ МЕТОДІВ І МЕТОДИК

2.1 Методологія досліджень

Основні оцінюючі критерії, що дозволили розробити методику діагностики рам тракторів неруйнівним магнітним методом: коерцитивна сила, інтегрований показник механічних властивостей матеріалів твердість, сучасні методи статистичної обробки експериментальних даних.

Для отримання відомостей про можливість застосування запропонованої методики використовували апріорні дані і результати власних експериментальних досліджень.

Пошук найдостовірніших і оптимальних оцінюючих критеріїв властивостей, що забезпечують необхідні характеристики деталей з сталі, управління їх якістю, привів до розгляду відомих і нових залежностей.

Методологія досліджень і послідовність проведення експериментів, теоретичних оцінок для вирішення поставлених задач і досягнення мети роботи приведена на рис. 2.1.

2.2. Метод коерцитивної сили

Серед магнітних характеристик найбільш чутливі до змін структури залишкова індукція B_r , коерцитивна сила H_c і магнітна проникність μ . Ці характеристики найбільш часто використовували як параметр контролю. Коерцитивна сила, як діагностичний критерій, маючи високу чутливість до структурних змін і фазових перетворень, практично не залежить від геометричних розмірів виробу, що суттєво полегшує задачу контролю різних за формою виробів.

Коерцитиметри з приставними магнітними перетворювачами (рис. 2.2) достатньо широко застосовуються як сучасні магнітовимірювальні пристрої, а також як прилади неруйнуючого визначення фізико-механічних характеристик феромагнітних металів і сплавів.

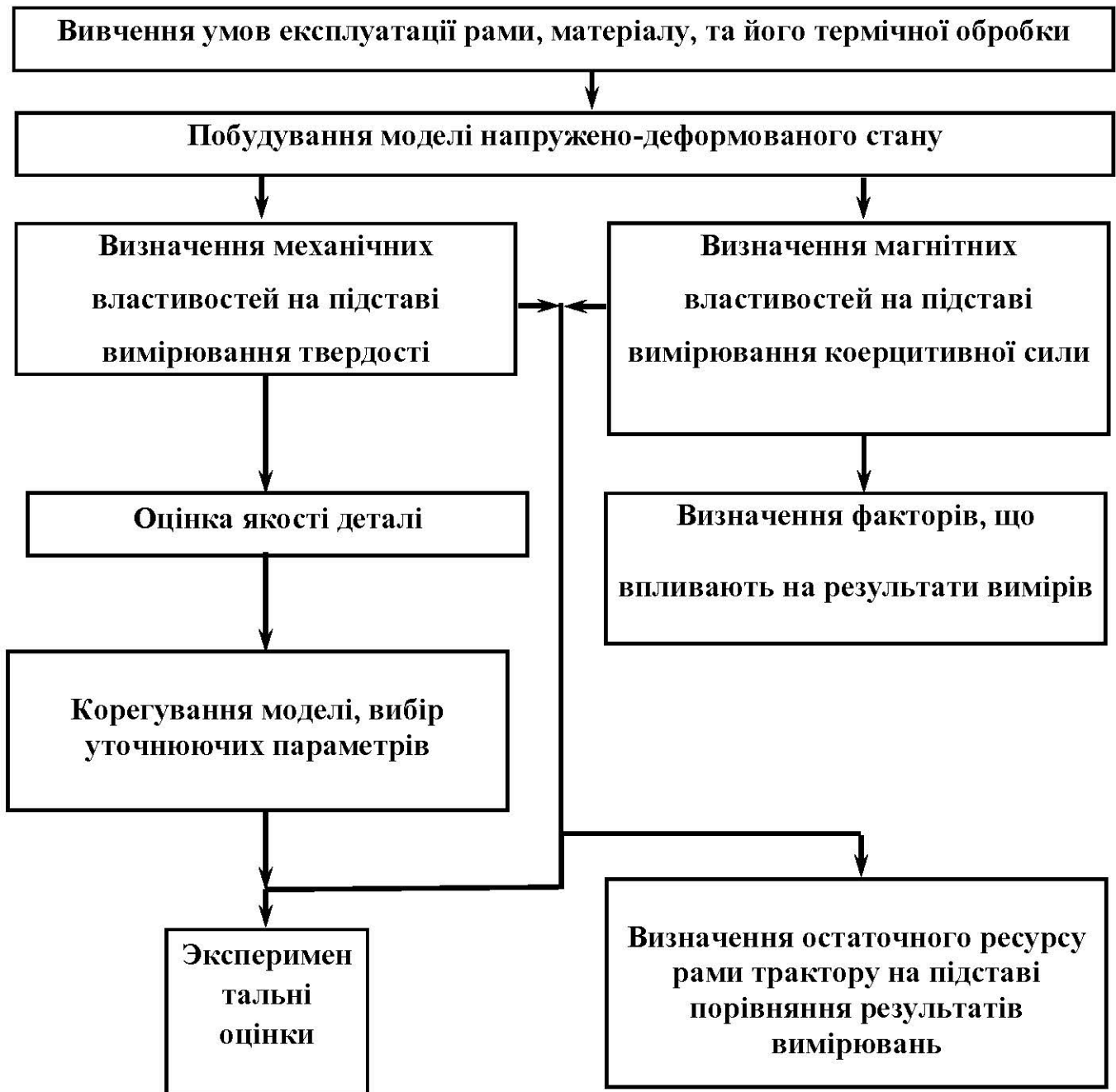


Рисунок 2.1 - Методологія досліджень



Рисунок 2.2 - Загальний вид накладного перетворювача зі змінним щупом коерцитиметра типу КРМ-Ц

На основі комплексних досліджень встановлені перехідні коефіцієнти для визначення впливу геометричних факторів поверхні деталей на рівень вимірюваних властивостей за коерцитивною силою.

Встановлено, що чутливість методу знижується для тонких виробів - до 40% (зменшення падіння магнітного потенціалу, збільшення магнітного опору потоку розсіювання); для масивних - до 12% (частковий магнітний гістерезис). На достовірність оцінки вирішальний вплив має хід кривої залежності H_c від максимального значення індукції при намагніченні конкретного матеріалу виробу.

Для встановлення залежностей між формою виробу та показниками накладного перетворювача використовували спеціально виготовлені полюсні наконечники (табл.2.1).

Таблиця 2.1

Типи полюсних наконечників, що використовувались для визначення впливу форми деталей на рівень магнітного показника

Умовне позначення	Тип полюсного наконечника	Умовне позначення	Тип полюсного наконечника
Б00 ¹		Б04	
Б01		Б05	
Б02		М00	
Б03 ²		М01	

Висновки.

1. Розроблено методологію проведення досліджень та для надійного визначення коерцитивної сили обґрунтовано використання коерцитиметру коерцитиметр КРМ-Ц.

РОЗДІЛ 3.

ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Аналіз залежності коерцитивної сили від напруженого стану

Залежність коерцитивної сили від розтягуючих і стискаючих напружень більшості конструкційних сталей, що використовуються для виготовлення рам тракторів є схожою - зі збільшенням рівня напруженого стану збільшується й рівень коерцитивної сили та твердості. Ця залежність справедлива для області, де ще не почалася пластична деформація. Якщо при випробуваннях чи експлуатації досягнута межа пластичності матеріалу, то рівень механічної “жорсткості” – твердості зменшується, а магнітної – коерцитивної сили дуже повільно зростає.

Окрім зазначених у другому розділі факторів на показники коерцитивної сили впливає також рівень остаточних напружень, що сформувався у матеріалі рами під час експлуатації, монтажні напруження, режими та правильність термічної обробки, хімічний склад використовуваної сталі, ліквідація елементів у межах припустимої згідно ДСТУ, наявність неметалевих включень та структурних перетворень. Тому для контролю конкретних деталей необхідно за будь яких умов підходити диференційовано і на підставі експериментальних досліджень.

3.2. Оцінка впливу деформаційного навантаження на матеріал, що використовується при виготовленні рам тракторів

Для оцінки впливу деформаційного навантаження на матеріал, що використовується при виготовленні рам тракторів, та встановлення взаємозв'язку між зміною структурного стану на коерцитивну силу проведено ряд досліджень. Крім того, після зняття навантажень в матеріалі відбуваються процеси перерозподілу залишкових напружень. Такі ж процеси відбуваються і після зварювання матеріалу рам тракторів. Тому важливим представляється встановлення закономірностей зміни властивостей матеріалу після зняття навантаження.

Зазвичай для виготовлення рам використовується матеріали, близькі за хімічним складом до гарячекатаної сталі 20. Хімічний склад сталі 20: 0,17–

0,24% С, 0,17–0,37% Si, 0,35–0,65% Mn. Вміст міді та нікелю допускається не більше 0,25%, мнш'яку – не більше 0,08%, сірки – не більше 0,4%, фосфору – 0,035%.

Структура сталі ферито–перлітна. Термічна обробка дозволяє одержувати структуру рейкового (пакетного) мартенситу. При таких структурних перетвореннях міцність зростає, а пластичність зменшується.

Для досліджень були відібрані зразки у кількості 12 шт. розміром 6,2×20×270 мм. Зроблене випробування 3 шт. зразків на розтягання. Визначено навантаження для встановлення межі плинності зразків:

1 зразок $47180\text{Н}=47,180\text{кН}=4,7\text{ т}$

2 зразок $50530\text{Н}=50,530\text{кН}=5,0\text{ т}$

3 зразок $49060\text{Н}=46,060\text{кН}=4,9\text{ т}$

Середнє значення ($X_{\text{ср}}$), знайдене за трьома зразками дорівнює 48923,66 Н (48,923 Кн). Ця величина навантаження відповідає початку пластичної деформації сталі ($\sigma_{0,2}=280\text{ МПа}$). Визначено нижню межу навантаження – для даного зразка 47,180 Кн

Розтягування зразків проводили за схемою, приведеною в таблиці 3.1.

Після розтягування зразків та зняття навантаження вимірювали коерцитивну силу на кожному із установлених зразків (табл. 3.2).

Вимірювання коерцитивної сили на зразках представимо у таблиці 3.2.

Оцінкою отриманих даних встановлено, що для кривої H_c – навантаження при розтягуванні сталі 20 характерними є три зони (рис. 3.1).

При навантаженні від початкового стану до 0,5–0,6 $\sigma_{0,2}$ відбувається рівномірне підвищення коерцитивної сили по залежності ($R=0,89$):

$$H_c = 3,55 + 0,54 N_{\sigma_{0,2}}, \quad (3.1)$$

де $N_{\sigma_{0,2}}$ – величина навантаження відносно $\sigma_{0,2}$ матеріалу. В цій залежності вільний член характеризує рівень коерцитивної сили (має розмірність [А/см]), що відповідає структурному стану гарячекатаної сталі без навантаження. Коефіцієнт 0,54 характеризує інтенсивність зміни коерцитивної сили від рівня навантажень у пружній області та має

розмірність [$H_c/M\text{Па}$]. Для цієї зони характерним є переважний вплив на рівень H_c пружних напружень при розтягуванні зразка.

Таблиця 3.1 - Розрахункове навантаження зразків

№ з.п.	Схема навантажень	Розрахункове значення, кН	Подовження Δl мм
1	Без навантаження	–	–
2	$0,5 X_{cp}$	24,462	0,004
3	$0,6 X_{cp}$	29,354	0,005
4	$0,7 X_{cp}$	34,138	0,001
5	$0,8 X_{cp}$	39,138	0,001
6	$0,9 X_{cp}$	44,031	0,002
7	$0,95 X_{cp}$	46,000	0,026
8	X_{cp}	48,923	0,028

Таблиця 3.2 - Результати вимірювання коерцитивної сили на зразках зі сталі 20 після зняття навантаження

№ з.п.	Коерцитивна сила зразків (А/см) після зняття навантаження упродовж часу, год							Середнє значення
	Після випробувань			70			100	
1	3,56	3,55	3,6	3,6	3,5	3,5	3,55	3,56
2	3,87	3,6	3,87	3,97	3,8	3,92	3,9	3,84
3	3,65	3,9	3,95	3,97	3,75	3,95	3,82	3,85
4	3,65	3,67	3,72	3,72	3,52	3,66	3,7	3,66
5	3,85	3,57	3,6	3,87	3,7	3,76	3,94	3,75
6	3,58	3,52	3,5	3,67	3,57	3,67	3,64	3,59
7	7,12	7,35	7,1	7,12	6,95	7,07	6,96	7,09
8	7,18	7,37	7,37	7,27	7,12	7,45	7,28	7,29

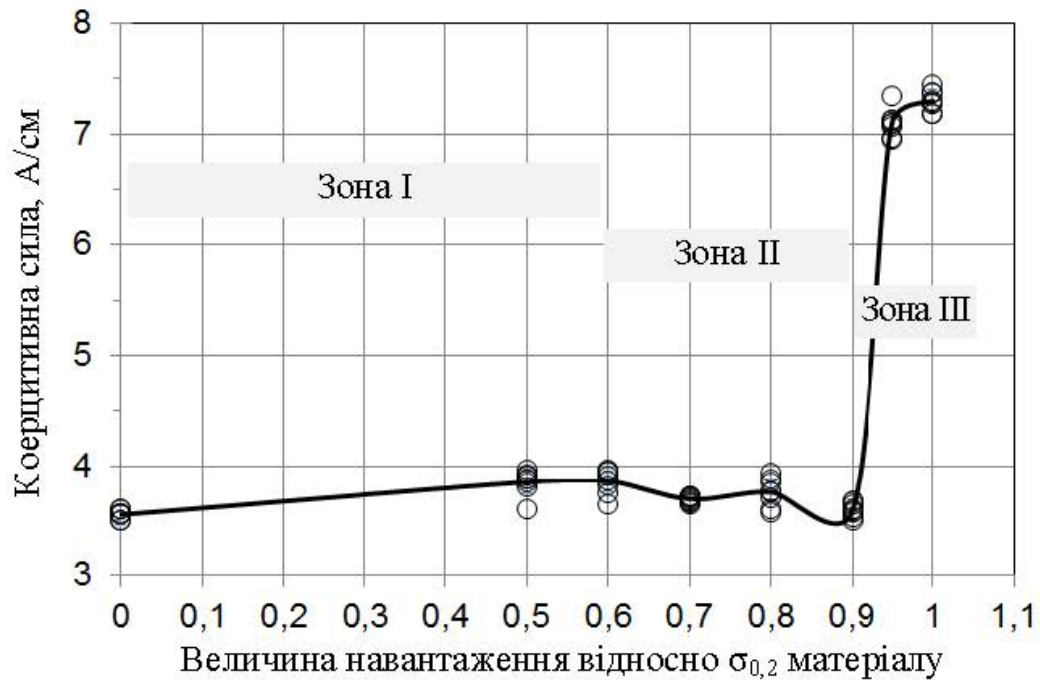


Рисунок 3.1 Залежність H_c сталі 20 від величини навантаження відносно межі її плинності ($\sigma_{0,2}$) з зазначенням зон, де змінюється характер взаємозв'язку

Друга зона ($0,6-0,9 \sigma_{0,2}$) характеризується нерівномірністю розподілу магнітного показника. Зниження рівня H_c до $3,5-3,65$ А/см зумовлене деформацією металу в локальних мікрооб'ємах. Підтвердженням цього припущення є зниження розкиду значень магнітного параметру до 4 разів (середньоквадратичне відхилення зменшилось з $0,12$ А/см ($0,6 \sigma_{0,2}$) до $0,03$ А/см при $0,7 \sigma_{0,2}$) у зонах такої деформації.

У зоні навантажень, що є близькою до початку пластичної деформації ($0,95-1 \sigma_{0,2}$) відбувається значне підвищення рівня коерцитивної сили (в $1,5-2$ рази у порівнянні з похідним станом). Це відбувається внаслідок зміни структурного стану матеріалу та підвищення рівня його дефектності. Зміна рівня H_c для такої зони може бути описана таким рівнянням ($R=0,89$):

$$H_c = 4,14 + 37,1 N_{\sigma_{0,2}}, \quad (3.2)$$

де $N_{\sigma_{0,2}}$ – величина навантаження відносно $\sigma_{0,2}$ матеріалу. Вільний член характеризує рівень коерцитивної сили, що відповідає структурному стану в полі пружних напружень та локальних деформацій під навантаженням $4,7-4,9$ т. Коефіцієнт $37,1$ характеризує інтенсивність зміни коерцитивної сили від рівня

навантажень у області пружних та пластичних деформацій. Інтенсивність підвищення коефіцієнту зміни H_c для даної зони вища, ніж пружних деформацій (перша зона) один практично у 70 разів, що свідчить про інтенсивність протікання змін структурного стану матеріалу під дією навантажень.

Після зняття навантаження відбуваються процеси розподілу залишкових напружень у матеріалі. Це в свою чергу призводить до зміни рівня H_c через певний проміжок часу. Для визначення впливу таких процесів на магнітну характеристику вимірювали H_c одразу після зняття навантаження та через 70 та 100 годин (див. табл. 3.3). Результати вимірювань представлені на рис. 3.2 та 3.3.

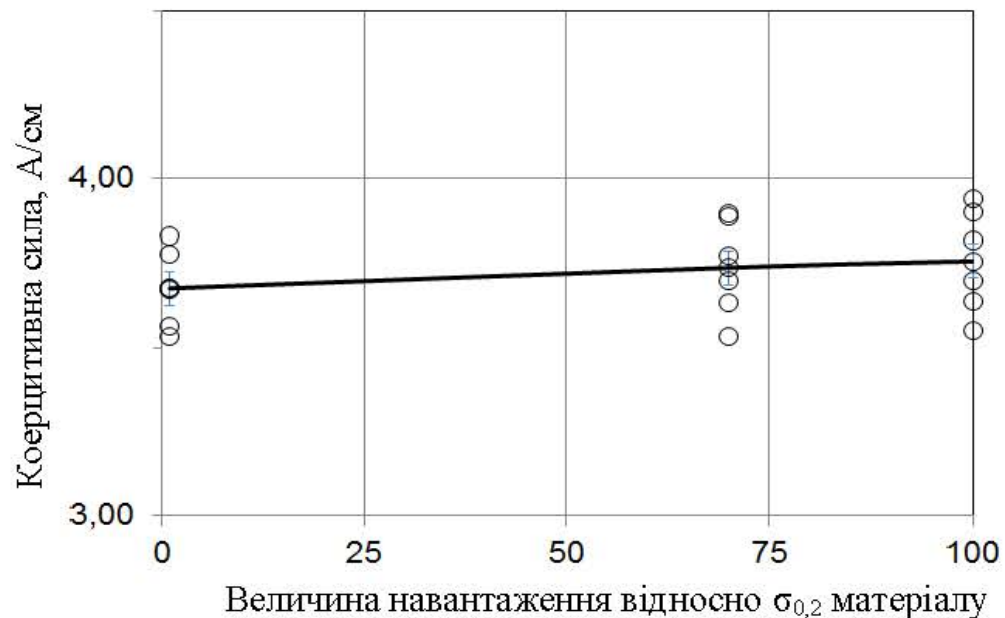


Рис. 3.2 Коерцитивна сила зразків (А/см) розтягнутих від похідного нормалізованого стану до $0,9 \sigma_{0,2}$ після зняття навантаження упродовж часу

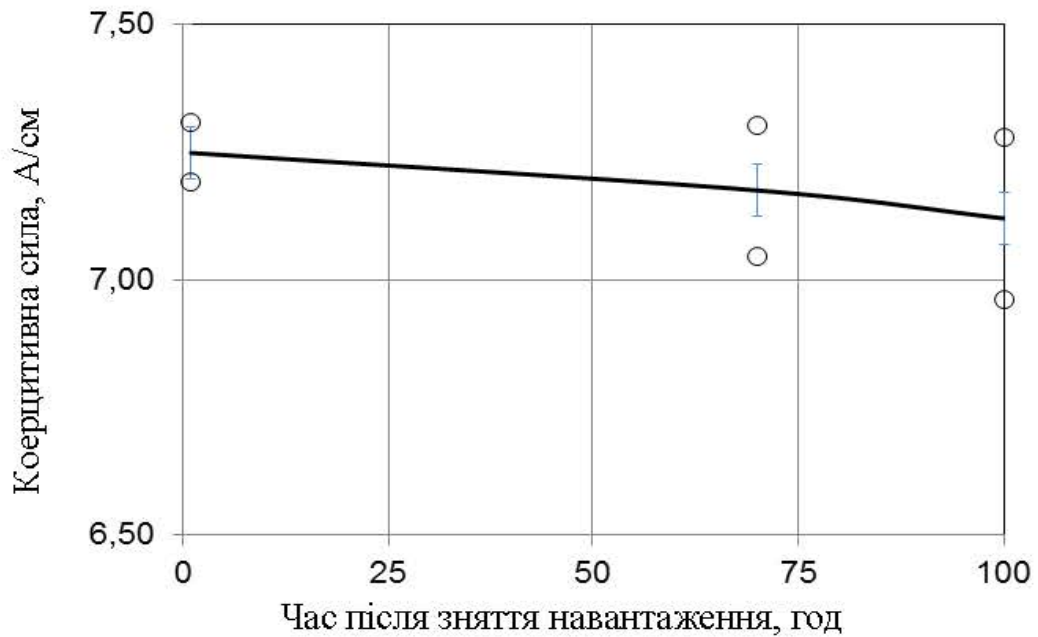


Рис. 3.3 Коерцитивна сила зразків (А/см) розтягнутих в області текучості сталі ($0,95-1 \sigma_{0,2}$) після зняття навантаження упродовж часу

Встановлено, що релаксація напружень у зразках зі сталі 20 після зняття навантаження (для I та II зон) на протязі 100 годин призводить до підвищення рівня коерцитивної сили і може бути описана рівнянням ($R=0,99$):

$$H_c = 3,68 + 0,001 t, \quad (3.3)$$

де t – час, що пройшов після зняття навантаження, год. Підвищення рівня магнітного параметру може бути свідченням того, що релаксація напружень відбувається за рахунок пластичної деформації мікрооб'ємів матеріалу. При збільшенні проміжку часу (понад 100 год) буде відбуватись релаксація за рахунок перерозподілу остаточних напружень та вирівнювання їх рівня, що призведе до зниження H_c .

В той же час для зони III, для якої характерний інтенсивний деформаційний вплив на структуру, зняття навантаження буде призводити тільки до монотонного зниження рівня H_c внаслідок перерозподілу залишкових напружень. Це й підтвердили експериментальні дані (рис. 3.3). Рівень коерцитивної сили для зразків розтягнутих в області текучості сталі ($0,95-1 \sigma_{0,2}$) після зняття навантаження має залежність від часу витримки ($R=0,98$):

$$H_c = 7,26 - 0,001 t, \quad (3.4)$$

Через певний проміжок часу процеси релаксації стабілізуються.

Таким чином, значення діагностичного критерію - коерцитивної сили понад 4 А/см є граничними. Перевищення цієї межі свідчить про перенавантаження рами трактора в процесі експлуатації (понад $0,95\sigma_{0,2}$) та необхідність її ремонту шляхом заміни деформованого матеріалу. При значеннях коерцитивної сили 3,5–4 А/см матеріал перебуває у області пружних деформацій.

Висновки

1. Визначений рівень коерцитивної сили – 3,5-4,0 А/см. При таких показниках конструкція буде працювати в допустимих межах. Чим більший рівень коерцитивної сили, тим менший ресурс роботи конструкції. При перевищенні 4,0 А/см потрібно виконати дефектацію деталі, визначити та усунути пошкодження.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз існуючих конструкцій приладів, що вимірюють коерцитивну силу як вітчизняного так і закордонного виробництва. Сформульовано принципи вибору розмірів електромагнітів.

Встановлено, що найбільш придатними для оцінки якості деталей сільськогосподарської техніки є коерцитиметри з накладними перетворювачами, де індикацію розмагніченого стану фіксують датчиками Хола (наприклад КРМ-Ц, що виготовляється Харківською науково-дослідною фірмою “Спеціальні наукові розробки”).

2. На підставі виконаних публікацій встановлена область застосування методу контролю якості за коерцитивною силою – структурного стану матеріалу.

3. У зв'язку з тим, що більшість існуючих публікацій зосереджена на розробці бракувальних норм для конкретних деталей і тому накопичений досвід може бути перенесений на інші деталі з дуже значними припущеннями, розробили методику діагностування неруйнівним методом для отримання достовірної інформації про фізико-механічні властивості металу і реальний режим роботи рами трактору на підставі аналізу рівня коерцитивної сили.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Механіка руйнування та міцність матеріалів [Текст] = Fracture Mechanics and Strength of Materials : довід. посіб. / за заг. ред. акад. НАН України В. В. Панасюка ; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка. - Львів : Каменяр, [198-] . - ISBN 5-12-000300-1. Т. 15 : Структура матеріалів і втомна довговічність елементів конструкцій / О. П. Остап. - 2015. – 304.
2. Основи теорії коливань в інженерній справі та втомна міцність [Текст] : навч. посіб. / С. В. Кагадій [та ін.]. - Дніпропетровськ : Свідлер А. Л., 2015. - 204 с.
3. Втомна пошкоджуваність валопроводів турбоагрегатів при крутних коливаннях [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.09 / Башта Дмитро Анатолійович ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ун-т". - Київ, 2014. - 21 с.
4. Моделі і методи прогнозу локального руйнування у пластинчастих елементах конструкцій з тонкими включеннями та підкріпленнями при сталому й циклічному навантаженнях [Текст] : дис... д-ра техн. наук: 01.02.04 / Кундрат Микола Михайлович ; Львівський національний ун-т ім. Івана Франка, Національний ун-т водного господарства та природокористування. - Рівне, 2007. - 347 арк.
5. Випробування зварних з'єднань металевих матеріалів руйнівні. Випробування на твердість [Текст]. - Київ : УкрНДНЦ, [2010] . - (Національний стандарт України). Ч. 2 : ДСТУ ISO 9015-2:2009. Випробування на мікротвердість (ISO 9015-2:2003, IDT). - Чинний від 2012-01-01. - 2018. - IV, 8 с. : рис., табл. - Бібліогр.: с. 8.
6. Магнітні властивості структурно-непорядкованих слабомагнітних твердих тіл [Текст] : автореф. дис... д-ра фіз.-мат. наук: 01.04.07 / Бродовий Олександр Володимирович ; Київський національний ун-т ім. Тараса Шевченка. - К., 2006. - 35 с.
7. Вплив лазерної імпульсної обробки на структуру та магнітні властивості приповерхневого шару Fe-Al-C сплавів [Текст] : автореф. дис... канд.

фіз.- мат. наук: 01.04.13 / Дзевін Євгеній Миколайович ; НАН України, Ін-т металофізики ім. Г. В. Курдюмова. - К., 1999. - 16 с.

8. Неруйнівний контроль зварювання [Текст] = Неразрушающий контроль сварки : підруч. : у 2 т. / Гавриш Павло, Чигарьов Валерій, Макаренко Наталія ; [ДВНЗ "Приазов. держ. техн. ун-т"]. - Маріуполь : ДВНЗ "ПДТУ", 2021. Т. 2. - 2021. - 288 с.

9. Неруйнівний контроль зварювання [Текст] = Неразрушающий контроль сварки : підруч. : у 2 т. / Гавриш Павло, Чигарьов Валерій, Макаренко Наталія ; [ДВНЗ "Приазов. держ. техн. ун-т"]. - Маріуполь : ДВНЗ "ПДТУ", 2021. Т. 1. - 2021. - 256 с.

10. ДСТУ EN ISO 22825:2017 (EN ISO 22825:2017, IDT; ISO 22825:2017, IDT) Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Контроль зварних швів в аустенітних сталях і сплавах на основі нікелю [Текст]. - Чинний від 2019-01-01. - Київ : УкрНДНЦ, 2021. - V, 20 с.

11. Неруйнівний контроль поковок зі сталі [Текст]. - Київ : УкрНДНЦ, 2019. - (Національний стандарт України). Ч. 1 : ДСТУ EN 10228-1:2017 (EN 10228-1:2016, IDT). Магнітопорошковий контроль. - На заміну ДСТУ EN 10228-1:2005 ; Чинний від 2019-01-01. - 2019. - IV, 8 с.

12. Неруйнівний магнітний контроль структурно-механічних властивостей виливків зі сталей та чавунів [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.04 / Твердохвалов В'ячеслав Олексійович ; НАН України, Фіз.-технол. ін-т металів та сплавів. - Київ, 2018. - 28 с.

13. Акустико-емісійний неруйнівний контроль процесів деградації InGaN/GaN світловипромінювальних діодів [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.27.06 / Киселюк Максим Павлович ; Нац. акад. наук України, Ін-т фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова. - Київ, 2014. - 20 с.

14. Неруйнівний контроль виробів електронної техніки за рівнем низькочастотного шуму [Текст] : монографія / Д. В. Михалевський, В. М. Кичак ; Вінниц. нац. техн. ун-т. - Вінниця : ВНТУ, 2014. - 111 с.

15. Селективна вихрострумова дефектоскопія [Текст] / А. Я. Тетерко, З. Т. Назарчук ; НАН України, Фіз.-механ. ін-т ім. Г. В. Карпенка. - Л. : [б.в.], 2004. - 248 с.

16. Діагностика і дефектоскопія матеріалів та виробів [Текст] : методичні вказівки до виконання лаб. робіт для студ. напряму підгот. 0901 "Інженерне матеріалознавство" інж.-фіз. ф-ту / Національний технічний ун-т України "Київський політехнічний ін-т" ; уклад. Т. А. Роїк [та ін.]. - К. : Політехніка, 2006. - 68 с.

17. Діагностика і дефектоскопія матеріалів та виробів [Текст] : навч. посіб. / Н. Ю. Імбіроч, В. І. Шваб'юк ; Луц. нац. техн. ун-т. - Луцьк : Вежа-Друк, 2015. - 339 с.

18. Міцність, тріщиностійкість і довговічність бетонних та залізобетонних конструкцій на засадах механіки руйнування [Текст] / Й. Й. Лучко [та ін] ; НАН України, Фіз.-механ. ін-т ім. Г. В. Карпенка. - Л. : Каменяр, 1999. - 348 с.

19. Довговічність елементів крила транспортного літака із зміцненими функціональними отворами [Текст] : [монографія] / Ясній П. В. [та ін.] ; Тернопіл. нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. - Тернопіль : ТНТУ, 2020. - 125 с.

20. Контактна довговічність і руйнування елементів конструкцій за циклічного навантаження [Текст] : [монографія] / О. П. Дацишин, В. В. Панасюк ; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка. - Київ : Наукова думка, 2018. – 286

21. Надійність і довговічність машин та апаратів хімічних виробництв з урахуванням еволюції їх руйнування [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.13 / Чемерис Андрій Олегович ; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т ім. Ігоря Сікорського". - Київ, 2018. - 23 с

22. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах [Текст] : [монографія] / О. Є. Андрейків, О. В. Гембара ; НАН України, Фіз.-механ. ін-т ім. Г. В. Карпенка. - К. : Наукова думка, 2008. - 344 с.

23. Механіка руйнування і міцність матеріалів [Текст] : довідник. посіб. / заг. ред. В. В. Панасюк ; НАН України, Фіз.-механ. ін-т ім. Г. В. Карпенка. - Л. : Сполом. - ISBN 978-966-665-493-2. Т. 9 : Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Остап [та ін.] ; ред. О. П. Остап, В. М. Федірко. - Л. : [б.в.], 2007. - 1066 с.

24. Механіка руйнування, міцність і довговічність неперервно армованих композитів [Текст] : монографія / В. В. Божидарнік [та ін.] ; заг. ред. В. В. Божидарнік ; Луц. держ. техн. ун-т, Львів. нац. ун-т ім. І. Франка, Ін-т приклад. пробл. механіки та математики ім. Я. С. Підстригача НАН України. - Луцьк : Надстир'я, 2007. - ISBN 978-966-517-591-9 (загальний). Т. 1 : Основи механіки руйнування неперервно армованих композитів. - [Б. м.] : [б.в.], 2007. - 400 с.

25. Механіка руйнування та міцність матеріалів [Текст] = Fracture Mechanics and Strength of Materials : довід. посіб. / за заг. ред. акад. НАН України В. В. Панасюка ; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка. - Львів : Каменяр, [198-] . - ISBN 5-12-000300-1. Т. 9 : Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Остап [та ін.] ; ред.: О. П. Остап, В. М. Федірко. - 2007. - 1068 с.

26. Технологія машинобудування [Текст] : навч. посіб. / В. Б. Копей, З. М. Одосій, О. Р. Онисько ; Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу, Каф. комп'ютериз. машинобуд. - Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2021. Ч. 1. - 2021. - 203с.

27. Ультразвукова ударна обробка конструкцій і споруд транспортного машинобудування [Текст] : монографія / [Б. М. Мордюк та ін.] ; за ред. д-ра техн. наук, проф. Г. І. Прокопенка. - Суми : Університетська книга, 2020. - 309 с.