

Григоров О.В., д.т.н., проф., Петренко Н.О., к.т.н., проф.,
Губський С.О., ст. викладач

ТРУДНОЩІ ОЦІНКИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ПРИДАТНОСТІ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ КРАНІВ З РІЗНИМИ ТОВЩИНАМИ ЕЛЕМЕНТІВ МАГНІТО-КОЕРЦИТИВНИМ МЕТОДОМ

Постановка проблеми. Промисловість України переживає зараз не кращі часи. Через скрутне економічне становище, коли промислові підприємства змушені боротися за виживання, оновлення парку вантажопідіймних машин (ВПМ) відбувається повільно, або і зовсім не відбувається. Тому ситуація щодо кранового парку складна. З кожним роком вона погіршується (рисунок 1). За останніми даними [1] 84 % вантажопідіймних кранів відпрацювали свій нормативний строк.

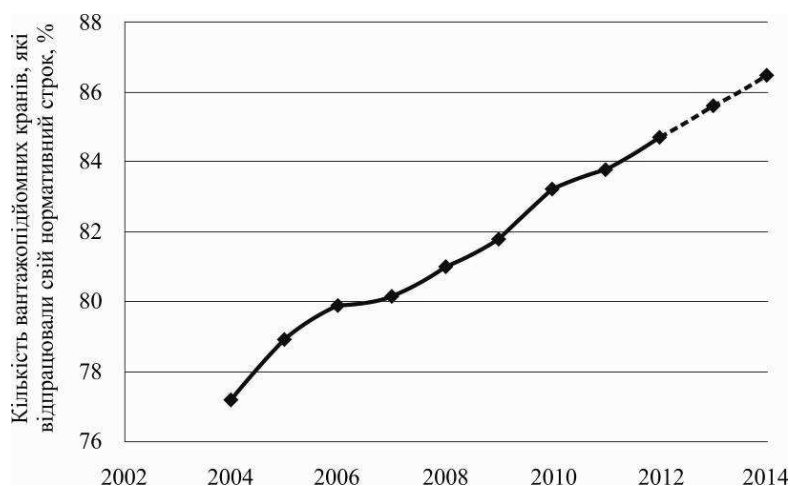


Рисунок 1 – Графік зміни кількості кранів, що відпрацювали свій нормативний строк та прогноз (екстраполяція) до 2014 р.

Через ці обставини актуальним завданням є визначення реального стану металу вантажопідіймних кранів для подальшого прогнозування строку безпечної експлуатації. Одним із інструментів визначення властивостей металу є методи неруйнівного контролю (НК). Значного поширення отримав магніто-коерцитивний метод НК.

Аналіз останніх досліджень. В Україні нормативна база для використання магніто-коерцитивного методу НК досить обмежена та

недосконала. У 2005 році були затверджені МВ 0.00-7.01-05 [2]. Вони базуються на російській методиці «РД ИКЦ «КРАН»-007-97/02». Про дозвіл використання Методичних вказівок при експертному обстеженні мостових кранів указано в ОМД 00120253.001-2005.

Дослідженням магнітного контролю на основі коерцитивної сили металоконструкцій (МК) вантажопідйомних споруд присвячені роботи Котельникова В. С., Григорова О. В., Попова В. А., Попова Б. Є., Ліпатова А. С., Левіна Є. А. [4, 5, 6, 7].

Невирішені частини загальної проблеми. Якщо в приставному магнітному ланцюзі збільшувати величину струму, що намагнічує (I_{nc} , А) зразок металу товщиною δ (мм), то поступово буде досягнуто індукцію насичення (B_n , Гн) при певному значенні товщини контрольованого елемента $\delta = \delta_m$ (мм). Подальше збільшення I_{nc} не призведе до збільшення індукції. Тобто буде досягнуто мінімальну товщину промагнічування однорідного за структурою масивного тіла. І подальше збільшення товщини однорідного за структурою контрольованого об'єкта ($\delta > \delta_m$) не впливатиме на показання коерцитиметра. Щоб змінити глибину проникнення магнітного потоку в контрольований метал, необхідно змінити геометричні розміри приставного електромагніта [8]. $\delta = \delta_m$ – величина мінімальної товщини промагнічування однорідного за структурою масивного тіла розраховується за формулою

$$\delta_m = 2\sqrt{S_3}, \quad (1)$$

де S_3 (мм) – площа перерізів полюсів приставного електромагніта.

Отже, при контролі елементів металоконструкції з одного металу, але з різними товщинами будемо отримувати поступове заниження показників коерцитивної сили зі збільшенням товщини металу [4] до певної величини δ_m . Що, в свою чергу, призведе до значної похибки при аналізі результатів магніто-коерцитивного методу НК металоконструкції крана з різними товщинами елементів.

Більше того, всі номограми, що приведені в [2], виводилися для металу товщиною 8–12 мм. Тому подальше використання цих номограм на товщинах більше 10–12 мм призведе до значної похибки в кінцевих результатах.

Мета статті. Порівняти існуючі методи вирішення проблеми заниження показань коерцитивної сили, заміряних структуроскопом типу КРМ-ЦК-2М, при оцінці експлуатаційної придатності

металоконструкцій кранів з різними товщинами елементів магніто-коерцитивним методом неруйнівного контролю.

Основний матеріал. У МВ 0.00-7.01-05 [2] пропонується значення коерцитивної сили в стані постачання (H_C^0 , А/см) та значення коерцитивної сили, що відповідають критичному режиму експлуатації ($H_C^{крит.}$, А/см) розраховувати за формулою (2):

$$H_{C(нов.)} = H_{C(табл.)} + k \cdot h \quad (2)$$

де $H_{C(табл.)}$, А/см – коерцитивна сила отримана на об'єкті контролю;

h , мм – товщина стінки контрольованого об'єкта;

k – коефіцієнт, що залежить від величини коерцитивної сили отриманої на об'єкті контролю. Вибирається з таблиці 1:

Таблиця 1 – Залежність коефіцієнта k , від величини коерцитивної сили отриманої на об'єкті контролю

H_C , А/см	k
1-2	0,05
3-6	0,1
7-10	0,15
11-14	0,2

Використання перерахунку запропонованого в МВ 0.00-7.01-05 [2] на практиці, викликає декілька запитань, які будуть розглянуті в цій роботі.

Використовувати формулу 2 пропонують для всіх кранових сталей: від Ст3 (з порівняно малими значеннями $H_C^0=1,7$ А/см) до сталі 10ХСНД (з порівняно великими значеннями $H_C^0=4,0$ А/см). При цьому, значення коефіцієнта k не змінюється. Але ж, магнітні параметри (коерцитивна сила) різних сталей відрізняються. Тому, такий алгоритм перерахунку може привести до значних похибок при оцінці стану металу контрольованої конструкції за параметром коерцитивна сила.

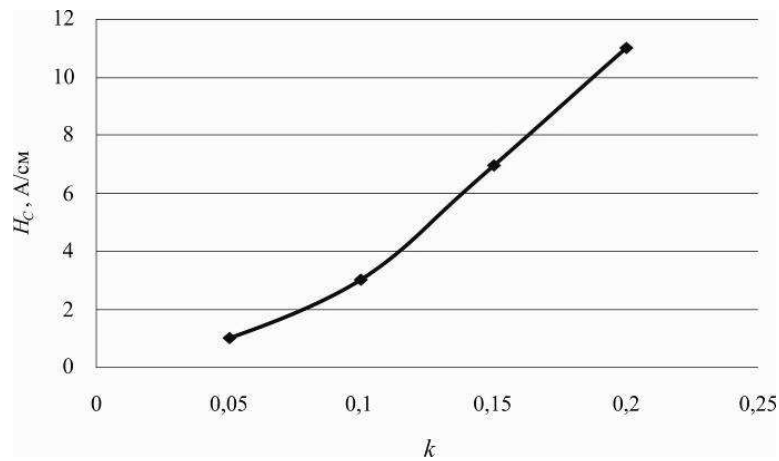


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта k від величини коерцитивної сили отриманої на об'єкті контролю

Практика використання перерахунку з використанням формули 2 показує, що правильніше було давати залежність $H_c(k)$ не в формі таблиці, а в формі інтерполяції у графік залежності коефіцієнта k від величини коерцитивної сили отриманої на об'єкті контролю (рисунок 2). В результаті чого, точність перерахунку значно збільшиться. Наприклад, на зразку зі сталі 09Г2С товщиною 16 мм заміряна коерцитивна сила склала $H_{c(\text{табл.})} = 6,0$ А/см. Після перерахунку по формулі (2):

– коефіцієнт $k = 0,1$ брався з таблиці 1, $H_{c(\text{нов.})} = 7,7$ А/см

– коефіцієнт $k = 0,14$ брався з рисунку 2, $H_{c(\text{нов.})} = 8,56$ А/см.

Різниця в перерахунку більше 10 %, що досить суттєво.

Важливою характеристикою метала є бал зерна. Збільшення його розміру супроводжується зниженням границі текучості ($\sigma_{0,2}$, МПа), а також коерцитивної сили (H_c , А/см) [8]. Щоправда

$$H_c \sim \frac{1}{d}, \sigma_{0,2} \sim \frac{1}{\sqrt{d}}$$

де d – розмір зерна.

На рисунку 3 наведено залежність коерцитивної сили від величини зерна для низьковуглецевої сталі

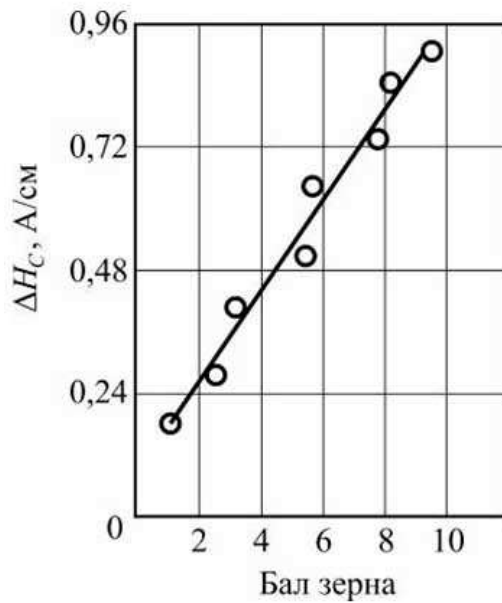


Рисунок 3 – Залежність коерцитивної сили (H_C , А/см) від величини зерна для низьковуглецевої сталі

З рисунку 3 видно, що показники коерцитивної сили в однакових зразках металу, але з різним балом зерна, будуть мати різні значення. Наприклад, два однакові зразки металу низьковуглецевої сталі з різним розміром зерна (бал зерна 6 та 10) матимуть різницю в показах коерцитивної сили $\Delta H_C = 0,36$ А/см. Більші покази коерцитивної сили матиме зразок з меншим розміром зерна.

На практиці доволі часто зустрічаються такі випадки, коли металокопструкція крана з різними товщинами елементів виготовлена з одного металу, але розміри зерна в елементах металокопструкції відрізняються. Переважно, зі збільшенням товщини металу – розміри зерна також збільшуються.

Складовою частиною сталі є вуглець (С), кремній (Si), марганець (Mn), хром (Cr), нікель (Ni) та інші хімічні елементи. Вони по-різному впливають на показники коерцитивної сили. Збільшення процентного вмісту в сталі С підвищує коерцитивну силу; Si, Cr, Ni та інші легуючі елементи також підвищують коерцитивну силу; Mn – навпаки зменшує її. У таблиці 2 наведено вагову частку хімічних елементів в сталях, що використовуються в кранобудуванні.

Таблиця 2 – Вагова частка хімічних елементів в сталях, що використовуються в кранобудуванні

Марка сталі	Нормативний документ	Вагова доля хімічного елемента, %					
		C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu
Ст3пс	ГОСТ 380-2005	0,14...0,22	0,40-0,65	0,05-0,15			
Ст3сп		0,14...0,22	0,40-0,65	0,15-0,30			
09Г2С	ГОСТ 19281	не більше 0,12	1,30-1,70	0,50-0,80	не більше 0,3	не більше 0,3	не більше 0,3

З таблиці 2 видно, що існує допуск на вміст хімічних елементів у сталі. Постає питання, на скільки сильно може вплинути цей допуск на величину коерцитивної сили в контрольованому металі? Щоб дати відповідь на це запитання, на Харківському заводі підйомно-транспортного устаткування були проведенні наступні дослідження: металопрокат, що надходив у виробництво, при вхідному контролі піддавався не тільки хімічному аналізу й механічним випробуванням, але й металографічним дослідженням з первісними замірами коерцитивної сили.

Після металографічних досліджень металопрокат зі сталі 09Г2С (ГОСТ 19281-89) розділявся на три групи за параметром – величина зерна. Таким чином виключався вплив цього параметра на показання структуроскопа. Заміри H_C (А/см) проводилися паралельно двома приладами КРМ-Ц-К2М (зав. № 542, 834) на 180 відібраних зразках (по 10 зразків кожної товщини з балом зерна 7, 8 і 9, зі співвідношенням перліту до фериту від 15/85 % до 20/85 %). Частина зведених результатів магніто-коерцитивного методу НК за зразками з балом зерна 9 та товщиною 6 мм наведена в таблиці 3.

З таблиці 3 видно, що для сталі 09Г2С-12 з балом зерна 9 та товщиною 6 мм хімічний склад впливає на зміну коерцитивної сили до $\Delta H_C = 0,66$ А/см.

Таблиця 3 – Результати магніто-коерцитивного методу НК зразків металопрокату зі сталі 09Г2С-12 з різним хімічним складом (величина зерна 9 балів (ГОСТ 5639-82), товщина 6 мм)

Хімічний склад, %			H _C , А/см	Співвідношення перліту до фериту, % (ГОСТ 5639-82)	Механічні властивості ¹				
С	Mn	Si			Опір розриву, МПа	Границя текучості, МПа	Відносне подовження, %	Ударна в'язкість при -40 С°, Дж/см ²	Ударна в'язкість при мех. старінні, Дж/см ²
0,90	1,58–1,62	0,60–0,65	3,51–3,59	15/85	540	435	28	75	60
0,10	1,53–1,59	0,61–0,68	3,61–3,72						
0,10	1,50–1,56	0,66–0,74	3,70–3,89						
0,11	1,48–1,53	0,70–0,79	3,82–3,96						
0,11	1,45–1,49	0,76–0,80	3,92–4,06						
0,11	1,43–1,46	0,80–0,84	4,03–4,17						

З раніше проведених досліджень [9] відома залежність коерцитивної сили (H_C, А/см) від вмісту вуглецю в залізі в формі зернистого (1) та пластинчастого (2) цементита (рисунок 4). На жаль, та частина графіка, що відноситься до кранових сталей мало досліджена. Але, і існуючі дані показують, що збільшення вагового вмісту вуглецю викликає збільшення коерцитивної сили. Що підтверджує проведені дослідження на ХЗ «ПТУ».

¹ Приведені середні значення за результатами випробування 10 зразків

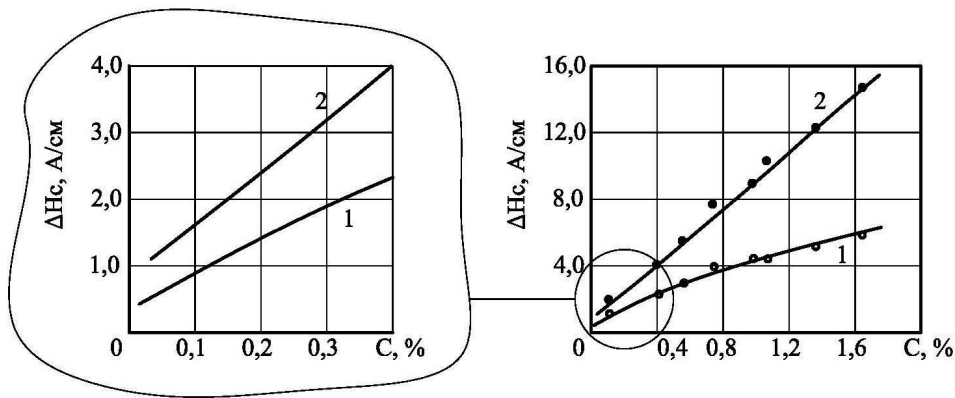


Рисунок 4 – Залежність коерцитивної сили (H_c , А/см) від вмісту вуглецю в залізі в формі зернистого (1) та пластинчастого (2) цементиту

Отже, вплив допусків вагових часток хімічних елементів в сталях на покази коерцитивної сили суттєвий.

У [4, 10] докладно описана методика врахування похибки, що виникає при магніто-коерцитивному методі НК металоконструкції з різними товщинами елементів. Пропонується використовувати паспортизовані зразки із змінним перерізом з відомими механічними властивостями та хімічним складом металу, мікроструктурою та значеннями коерцитивної сили в кожному перерізі зразка (фото 1). Це виключає вплив розміру зерна, хімічного складу на покази коерцитивної сили.



Фото 1 – Паспортизовані зразки металу із змінним перерізом

Розроблений алгоритм методики був взятий за основу при написанні комп'ютерної програми Metal v2.0 [10]. У базу програми внесено більше 100 одиниць паспортизованих зразків різних кранових сталей. Це дозволяє підбирати потрібний зразок вже з напрацьованої бази. У подальшому, в програмній оболонці реалізуються наступні функції:

– перерахунок, що враховує різну товщину елементів контрольованої металоконструкції;

– побудову кривих, що наглядно відображають розподілення коерцитивної сили по поверхні контрольованої металоконструкції;

– розрахунок залишкового ресурсу металоконструкції вантажопідйомного крана;

– отримані результати формуються у звітну документацію для подальшого роздрукування.

Висновки. Після проведених досліджень можна зробити висновок, що формула для перерахунку, яка запропонована в МВ 0.00-7.01-05, некоректна, тому що вона не враховує розміри зерна, допуски на вагові частки хімічних елементів в сталях. Використання її на практиці може призвести до суттєвої похибки при оцінці експлуатаційної придатності контрольованої металоконструкції.

Використання методики паспортизованих зразків із змінним перерізом з відомими механічними властивостями та хімічним складом металу, мікроструктурою та значеннями коерцитивної сили в кожному перерізі зразка дозволяє врахувати всі недоліки першого способу перерахунку. Запропонований алгоритм методики автоматизувати у вигляді комп'ютерної програми Metal v2.0.

ЛІТЕРАТУРА

1. Андриенко Н. Н. Куда идем, Куда поворачиваем? / Андриенко Н. Н. Корень В. Л., Полнарев С. Я. // Подъёмные сооружения. Специальная техника. – 2011. – №7-8.
2. МВ 0.00-7.01-05 Методичні вказівки з проведення магнітного контролю напружено-деформованого стану металоконструкцій підйомних споруд та визначення їх залишкового ресурсу. – К. : 2005. - 77 с.

3. Попов В. А. Практика применения экспериментальных образцов с переменным сечением при оценке значений коэрцитивной силы по результатам магнитного контроля металлоконструкций мостовых кранов, отработавших нормативный срок / В. А. Попов, С. А. Губский // Збірник статей 6-го міжнародного науково-практичного семінару «Технічне переозброєння та безпека в промисловій енергетиці. – Х. : 2006. - С. 58-64.
4. Григоров О. В. Метод анализа замеров коэрцитивной силы при технической диагностике металлоконструкций кранов с разными толщинами элементов / О. В. Григоров, В. А. Попов, С. А. Губский и др. // 2009 р. Метрология. - 2009. - №3. – С. 34-39.
5. Попов Б. Е. Магнитная диагностика и остаточный ресурс подъемных сооружений / Б. Е. Попов, В. С. Котельников и др. // Безопасность труда в промышленности. – 2001. - №2. – С. 44-49.
6. Попов Б. Е. Диагностика мостовых кранов в литейных цехах / Б. Е. Попов, А. Е. Левин и др. // Безопасность труда в промышленности. - 2004. - №4. – С. 33-38.
7. Попов В. А. Оценка напряженно-деформированного состояния металлоконструкций грузоподъемных кранов по изменениям коэрцитивной силы металла / Попов В. А., С. А. Губский и др. // Подъемные сооружения. Специальная техника. - 2005. - №5. – С. 24-29.
8. Михеев М. Н. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М. Н. Михеев, Е. С. Горкунов // - М. : 1993.
9. Гудинаф Д. Теория возникновения областей самопроизвольной намагниченности и коэрцитивной силы в поликристаллических ферромагнетиках // Магнитная структура ферромагнетиков. М.: Изд-во иностр. Лит. 1959. С. 19-57.
10. <http://koercitiv.ucoz.ru/>