

УДК 620.179.18

ЗВ'ЯЗОК МІЖ ПАРАМЕТРАМИ АКУСТИЧНИХ СТРУКТУРНИХ ШУМІВ ТА МЕХАНІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

В. Д. МИНДЮК, Н. І. ЧАБАН, І. В. РИБИЦЬКИЙ, О. М. КАРПАШ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Під час порівняльних досліджень параметрів акустичних структурних шумів на зразку конструкційної сталі 40Г зі застосуванням ультразвукових дефектоскопів на фазованих ґратках встановлено, що показник інтегральної густини зображення В-скану найкраще відтворює зміну енергії відбитих від неоднорідностей мікроструктури (різнозернистість, зміна співвідношення між фазовими складниками) акустичних коливань. Визначено зв'язок між показником інтегральної густини зображення акустичних структурних шумів R_o та механічними властивостями сталі. Удосконалено відомий спосіб знаходження границі плинності сталей σ_T за результатами вимірювання твердості HV шляхом доповнення розрахункового рівняння параметром R_o та виведено нове рівняння виду $\sigma_T = f(R_o, HV)$ для обчислення границі плинності сталі у встановленому діапазоні значень.

Ключові слова: *деградація властивостей, неруйнівний контроль, акустичні зображення структурних шумів, границя плинності, твердість, технічний стан металу.*

Вступ. Через високий рівень зносу машин, устаткування і конструкцій тривалої експлуатації в різних галузях промисловості необхідно удосконалити методи оцінювання їх фактичного технічного стану, а також системи обслуговування і ремонту. Внаслідок великих термінів між випробуваннями і ремонтами не вдається виявляти пошкодження устаткування на ранній стадії. Механічні пошкодження агресивного середовища, значних навантажень різного характеру, порушення умов експлуатації та недостатній об'єм контролью-діагностичних робіт – основні причини появи корозійного абразивного зносу та втомного руйнування [1].

Технічне діагностування під час експлуатації обладнання різних промислових об'єктів, в основному, дає можливість виявляти і моніторити розвиток дефектів типу тріщин, зумовлених експлуатаційними чинниками. Проте ще задовго до їх появи та розвитку у часі експлуатації відбуваються локальні структурні перетвореннями в об'ємі металу, що призводить до змін просторового розподілу його фізико-механічних характеристик. Дегградація властивостей матеріалів пов'язана з накопиченням мікропошкоджень, які, об'єднуючись, викликають появу макродефекту та втрату початкових характеристик металу [2, 3]. Одним зі шляхів підвищити інформативність оцінювання фактичних технічних і граничних станів елементів конструкцій з урахуванням мікроструктури, особливо в період їх експлуатації, є акустична мікроскопія, яка ґрунтується на тому, що у полікристалічному середовищі і в сплавах з пружною анізотропією загасання швидкості ультразвуку залежить від розсіяння енергії коливань зернами металу. В окремих кристалах вона різна залежно від напряму поширення ультразвуку до осей симетрії. Тому під час переходу ультразвукової хвилі з одного кристала в інший і за різної їх орієнтації ця величина може суттєво змінюватися. В результаті виника-

ють часткове віддзеркалення, заломлення ультразвуку і трансформація типів хвиль. Коливання поступово розсіюються у всіх напрямках, причому інтенсивність розсіяння визначає відношення довжини пружної хвилі λ до середнього діаметра зерен-кристалів \bar{d} , а також анізотропія металу. Якщо $\lambda \leq \bar{d}$, коливання поглинаються в кожному зерні як в одному великому кристалі і загасання залежить, в основному, від поглинання [4].

Нижче здійснено пошук нових інформативних параметрів акустичних структурних шумів з допомогою перспективних акустичних когерентних методів. Сучасні ультразвукові дефектоскопи, що реалізують технологію ультразвукових фазованих ґраток (УЗФГ), дають можливість отримувати результати “прозвучування” об’єктів у вигляді двовимірного зображення внутрішньої структури, що розширює можливості аналізу даних.

Методика досліджень. Мета випроб – виявити та обґрунтувати нові параметри акустичних структурних шумів сталюого зразка. Для цього використовували плоский зразок зі сталі марки 40Г площею 400×300 mm та товщиною 18,7 mm, вирізаний з експлуатованої конструкції. Цю сталь широко застосовують для виготовлення обладнання підвищеної міцності [5] – трубопроводів, посудин, що працюють під тиском, механічні властивості яких суттєво змінюються під час експлуатації. Досліджували в два етапи [6].

На першому зразок сканували дефектоскопом SIUI CTS-602 з перетворювачем 5.0L-64-1.0-10 та перехідною призмою 64N00L-40. У результаті отримали секторну розгортку області сканування на екрані дефектоскопа, де амплітуду луно-сигналу від відбивача кодують кольором. Зміна забарвлення від темно-синього до червоного відповідає збільшенню амплітуди луно-імпульсу відбитого сигналу. Внаслідок заломлення та трансформації ультразвукових сигналів від груп зерен збільшується амплітуда луно-імпульсу відбитого сигналу, що проявляється в місцях структурних неоднорідностей у вигляді світло-синіх плям на зображенні дисплея дефектоскопа. У місцях, де значення луно-імпульсів максимальні, утворюються плями червоного кольору, які вказують на присутність дефекту (рис. 1). Інтенсивність яскравості та кольору цих зон пропорційна амплітуді відбитих акустичних коливань.

Подання результатів прозвучування у вигляді двовимірного кольорового зображення внутрішньої структури зразка значно полегшило їх аналіз та опрацювання, оскільки візуально локалізували ділянку металу з найбільшою кількістю неоднорідностей мікроструктури. На початковому етапі аналізу зображень як кількісний показник структурних шумів використовували фактичну сумарну площу ділянок неоднорідностей S на зображенні, тобто фактичну площу “світлих плям”. Слід відмітити, що зображення містять також блоки інформації про параметри ультразвукових коливань та налаштування приладу, зону затримки сигналу перехідною призмою, а також певну кількість відбиттів ультразвукового сигналу. Тому для подальшого аналізу зображення через засоби зв’язку передавали в ПК, де зайві ділянки обтинали програмно, щоб виділити ділянки тільки т. зв. першого відбиття ультразвукових коливань. Для визначення сумарної площі неоднорідностей мікроструктури на зображенні використовували спеціальне програмне забезпечення ImageJ, яке індивідуально встановлює рівень чутливості вимірювання параметрів зображення, тобто оператор виділяє межі зони неоднорідностей та контрастність зображення “вручну” [7]. Оскільки різниця між відтінками кольору зон неоднорідності мікроструктури металу на загальному фоні зображення після його бінаризації незначна, то запропонований спосіб визначення сумарної площі зон неоднорідностей доволі трудомісткий та залежить від суб’єктивних дій оператора.

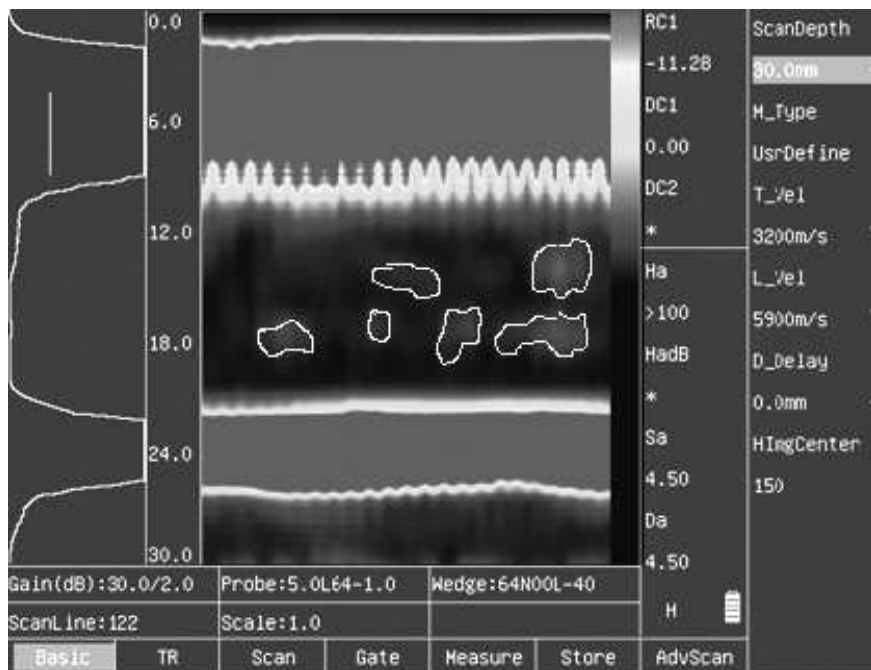


Рис. 1. Акустичне зображення структурних неоднорідностей на екрані дефектоскопа SIUI CTS-602.

Fig. 1. Acoustic image of the structural heterogeneities on the SIUI CTS-602 ultrasonic flaw detector screen.

Враховавши недоліки вказаного способу, для подальшого аналізу неоднорідностей мікроструктури на зображенні використовували інтегральну густину ділянок зображення акустичних структурних шумів R_o – амплітуду (енергію) відбитих від неоднорідностей акустичних коливань. Для її визначення зображення з дефектоскопа обробляли в програмному середовищі *MatLab Image Processing Toolbox*, яке конвертувало графічні зображення в матрицю чисел, де кожне число відповідало градієнту кольору кожного окремого пікселя зображення. Тобто кожному пікселю присвоювали число, що залежить від кольору зображення. Інтегральна густина зображення характеризує суму цих чисел і є безрозмірною величиною.

На другому етапі виготовляли 18 стандартних циліндричних зразків, які вирізали із окремих ділянок плоского зразка сталі 40Г для випробування на одновісний розтяг згідно з ГОСТ 1497-84, а також вимірювали твердість переносним контактним-резонансним приладом типу ТКР-35. Слід зазначити, що вибирали зони вирізання, враховуючи результати прозвучування на першому етапі випроб.

За даними механічних випробувань побудували індивідуальні діаграми розтягу для кожного зразка, з яких отримали фактичні значення механічних характеристик окремих ділянок плоского зразка: границі міцності та плинності, показники пластичності. До протоколу результатів визначення механічних параметрів також занесли дані вимірювання твердості.

Опрацювання та аналіз результатів. Результати визначення досліджуваних інформативних параметрів наведені в таблиці. Для встановлення взаємозв'язку між інформативними параметрами зображень акустичних структурних шумів досліджуваної сталі і її фізико-механічними характеристиками використали методи математичного аналізу, зокрема графічний та кореляційний аналізи.

Кореляційний зв'язок між досліджуваними параметрами акустичних структурних шумів N та механічними властивостями M визначали за результатами їх попарного кореляційного аналізу [8]:

$$R(N, M) = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (N_i - \bar{N}) \cdot (M_i - \bar{M}) \right]}{(n-1) \cdot \sigma_N \cdot \sigma_M}, \quad (1)$$

де $R(N, M)$ – коефіцієнт кореляції; σ_N та σ_M – стандартні відхилення відповідних величин; n – кількість спостережень окремих пар параметрів.

Зведені результати експериментальних досліджень

№ зразка	Границя плинності σ_T , МПа	HV	Сумарна площа структурних неоднорідностей S , pxls	Інтегральна густина зображення акустичних структурних шумів $R_o \cdot 10^5$
1	440	221	5220	8,43853
2	400	226	7407	15,15736
3	415	223	6963	12,69751
4	425	226	152	11,73415
5	435	224	207	11,58939
6	485	226	6404	7,69845
7	420	225	9965	13,86568
8	425	218	6719	11,06315
9	435	217	5038	11,57082
10	465	230	8724	7,87664
11	380	212	209	14,81317
12	455	223	5044	9,68726
13	435	225	15124	11,59324
14	405	215	10536	15,15478
15	420	225	9853	14,17472
16	430	218	6842	11,89456
17	420	222	7952	12,14123
18	410	215	7154	12,96452

Виявили, що такий параметр акустичних структурних шумів, як сумарна площа структурних неоднорідностей S не корелює з границею плинності σ_T ($R(S, \sigma_T) = 0,0576$), тому далі його використовувати недоцільно. Натомість встановили хорошу кореляцію між інтегральною густиною зображення акустичних структурних шумів та границею плинності σ_T ($R(R_o, \sigma_T) = -0,9018$), тому їх вживали як інформативні характеристики стану металу. Високе значення коефіцієнта кореляції свідчить про близькість до лінійного зв'язку між границею плинності та інформативним параметром інтегральної густини акустичних шумів, а отже, про доцільність його уведення як аргументу в регресійну модель для визначення границі плинності. Мінусове значення коефіцієнта кореляції вказує на обернену залежність між цими параметрами. Це зумовлено тим, що за високих

значень інтегральної густини ультразвукові коливання відбиваються від великої кількості неоднорідностей у структурі металу [4], які часто концентруються в зоні найбільших напружень. Фактично інтегральна густина R_o опосередковано характеризує суму розмірів зерен сталі на визначеній ділянці [4, 9]. Залежність границі плинності та твердості від інтегральної густини зображення акустичних структурних шумів подано на рис. 2.

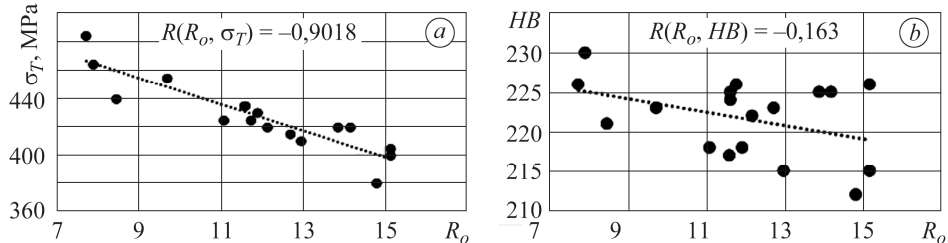


Рис. 2. Залежність границі плинності (а) та твердості (b) від інтегральної густини зображення акустичних структурних шумів.

Fig. 2. Dependence of yield strength (a) and hardness (b) on the density of acoustic noises images.

Аналіз підходів до визначення границі плинності як параметра, зі зниженням якого найсуттєвіше зменшується ресурс тривало експлуатованих сталевих конструкцій [6], виявив, що у більшості методик для цього використовують емпіричні рівняння переходу від твердості до границі плинності (див. ГОСТ 10006-80):

$$\sigma_T = 0,2 \cdot HB.$$

Однак, застосовуючи тільки твердість, отримують досить наближені значення границі плинності без достовірної інформації про фізико-механічні характеристики матеріалу загалом. Тому, використовуючи твердість разом з параметром, що характеризує мікроструктурні особливості металу по об'єму, вдається підвищити достовірність результатів вимірювання. В нашому випадку через високу кореляцію між значеннями інтегральної густини та твердості їх одночасне використання недоцільне. Оскільки коефіцієнт кореляції між ними лише $-0,16$ (рис. 3), то можна вважати їх некорельованими і обидві змінні вводити в модель як незалежні аргументи.

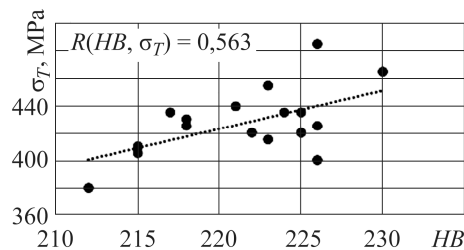


Рис. 3. Залежність границі плинності від твердості.

Fig. 3. Dependence of yield strength on hardness.

Для визначення характеру і виду залежності границі плинності сталі від твердості та інтегральної густини зображення акустичних структурних шумів використали регресійний аналіз.

Для побудови регресійної моделі виду

$$\sigma_T = f(HB, R_o)$$

застосували програмне забезпечення *Curve Fitting Tool MatLab*.

Рівняння лінійної регресії для моделі має вигляд

$$\sigma_T = f(HB, R_o) = a_0 + a_1 \cdot HB + a_2 \cdot R_o, \quad (2)$$

де a_0, a_1, a_2 – коефіцієнти регресії: $a_0 = 240,7$; $a_1 = 1,381$; $a_2 = -10,11$.

Тут коефіцієнт детермінації R^2 (наближення цього значення до одиниці свідчить про кращу адекватність моделі) становить 0,8543, що вказує на тісний зв'язок між досліджуваними параметрами.

Низький коефіцієнт кореляції між границею плинності і твердістю (рис. 3) також свідчить про нелінійний характер взаємозв'язку між ними. Тому тут доцільна регресійна модель, де аргумент твердості виражений нелінійно. З підвищенням степеня аргументів рівняння збільшується кількість коефіцієнтів регресії, що ускладнює обчислення.

Аналіз типів рівнянь регресії виявив, що оптимальним є другий степінь для аргументу твердості, оскільки з подальшим його збільшенням кількість коефіцієнтів зростає, а коефіцієнт детермінації змінюється несуттєво. Остаточо прийняли таке рівняння апроксимації:

$$\sigma_T = a_0 + a_1 \cdot HB + a_2 \cdot R_o + a_3 \cdot HB^2 + a_4 \cdot HB \cdot R_o, \quad (3)$$

де a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 – коефіцієнти регресії: $a_0 = 13890$; $a_1 = -123,1$; $a_2 = 11,64$; $a_3 = 0,2835$; $a_4 = -0,09933$. Коефіцієнт детермінації R^2 тут становить 0,8779. Середньоквадратична помилка (RMSE – відстань між двома точками) становить 9,672, у той час як залишкова сума квадратів дорівнює 1216, що вказує на високу достовірність моделі. Слід відмітити, що модель придатна для діапазону вимірювання значень границі плинності в межах 380...500 МПа.

ВИСНОВКИ

На основі експериментальних результатів підтверджено можливість застосування інтегральної густини зображень акустичних структурних шумів на екрані ультразвукового дефектоскопа з п'єзоперетворювачами на фазованих ґратках для виявлення зміни мікроструктурної неоднорідності сталей. Встановлено, що обраний інформативний параметр стану мікроструктури володіє високим коефіцієнтом кореляції з границею плинності сталі 40Г. Отримано залежність виду $\sigma_T = f(R_o, HB)$, що дає можливість оцінювати технічний стан конструкцій зі сталі 40Г зі застосуванням удосконаленого методу визначення границі плинності металу за вимірними значеннями твердості та інтегральної густини зображень акустичних структурних шумів. Похибка визначення границі плинності за отриманим регресійним рівнянням не перевищує 5% у діапазоні значень границі плинності 380...500 МПа.

РЕЗЮМЕ. При исследовании параметров акустических структурных шумов на образце конструкционной стали 40Г с применением технологии ультразвуковых фазированных решеток установлено, что показатель интегральной плотности изображения В-скана наиболее точно отображает изменение энергии отбитых от неоднородности микроструктуры (разнозернистость, изменение соотношения между фазовыми составляющими) акустических колебаний. Выявлено связь между показателем интегральной плотности изображения акустических структурных шумов R_o и механическими свойствами стали 40Г. Усовершенствовано известное расчетное уравнение для определения предела текучести сталей σ_T по данным измерения твердости HB путем дополнения его параметром R_o и выведено новое уравнение вида $\sigma_T = f(R_o, HB)$ для расчета ее предела текучести в установленном диапазоне значений.

Ключевые слова: *деградація свойств, неразрушающий контроль, акустическое изображение структурных шумов, предел текучести, твердость, техническое состояние металла.*

SUMMARY. Comparative researches of acoustic structural noises parameters for the structural 40Г steel specimen using the UHF-technology were carried out. It was established that the index of integral density of the B-scan image represents best of all the change of acoustic vibrations energy reflected from the heterogeneity of microstructure (anisomerity, change in correlation between phase components) of acoustic vibrations. Experimental researches to determine the character of the relation between the image integral density index of acoustic structural

noises R_o and mechanical properties were conducted for 40Г steel. The research results contributed to the improvement of the known method for yield strength determination according to the results of hardness measuring by adding parameter R_o to the calculation equation. A new equation of the type $\sigma_T = f(R_o, HB)$ for yield strength determination of 40Г steel in the established values range was derived.

Keywords: *degradation of properties, non-destructive testing, acoustic images of structural noises, yield strength, hardness, technical condition of the metal.*

1. Чабан Н. І., Рибіцький І. В., Миндюк В. Д. Розвиток акустичного виду контролю для виявлення та оцінювання структурних змін сталевих конструкцій // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2018. – № 3 (68). – С. 27–30.
2. Аналіз методів акустичного контролю фізико-механічних характеристик металоконструкцій довготривалої експлуатації / Н. І. Чабан, О. М. Карпаш, І. В. Рибіцький, В. Д. Миндюк // Методи та прилади контролю якості. – 2018. – № 2 (41). – С. 38–43.
3. Технічна діагностика матеріалів і конструкцій: Довідн. пос. у 8-ми т. / За заг. ред. З. Т. Назарчука. Т. 5: Акустичні методи контролю деградації матеріалів і дефектності елементів конструкцій / В. Р. Скальський, О. М. Карпаш, В. В. Кошовий, А. Я. Недоссека, О. М. Станкевич. – Львів: Простір-М, 2017. – 416 с.
4. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. Скорость звука и структура сталей и сплавов. – Новосибирск: Наука, 1996. – 184 с.
5. Шрейбер Г. К., Перлин С. М., Шибряев Б. Ф. Конструкционные материалы в нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности. – М.: Машиностроение, 1969. – 396 с.
6. Чабан Н. І. Удосконалення методу оцінки технічного стану бурильних та насосно-компресорних труб: Дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. – Івано-Франківськ. нац. техн. ун-т нафти і газу, 2019. – 128 с.
7. Миндюк В. Д. Експериментальні дослідження щодо можливості оцінки фактичного стану металу елементів нафтогазового обладнання в процесі їх експлуатації // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2015. – № 3. – С. 89–99.
8. Грановский В. А., Синая Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
9. Методика определения акустических структурных шумов металла / В. В. Муравйов, О. В. Муравйова, А. В. Байтеряков, А. И. Дедов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1 (21). – С. 143–148.

Одержано 22.05.2019