

# Дослідження та методи аналізу

УДК 620.183.16

DOI: 10.31471/1993-9973-2018-4(69)-37-49

## АПРОБАЦІЯ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛЕЙ

*Н.І. Чабан, І.В. Рибіцький, М.О. Карнаш, В.Д. Миндюк*

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 506611,  
e-mail: chaban.n11@gmail.com*

*Більшість обладнання нафтогазового комплексу в процесі експлуатації зазнає впливу циклічно-змінних, механічних, теплових навантажень і корозійно-активних середовищ. Ці впливи викликають зміну структурного стану металу, що призводить до прискореного розвитку дефектів (особливо в місцях з концентраторами напружень), і подальшого руйнування конструкції.*

*Існуючі в даний час ультразвукові, електромагнітні та вихроструміві методи неруйнівного контролю здебільшого спрямовані на вирішення задач виявлення дефектів, що вже утворилися. Однак важливіше вчасно виявити процес накопичення пошкодженої в металі на початковому етапі шляхом визначення змін структурного стану металу.*

*В статті запропонована методологія досліджень структурних змін сталі в процесі експлуатації та визначення їх впливу на механічні характеристики. Обґрунтовано вибір оптимального показника, що характеризує зображення акустичних структурних шумів матеріалу, отриманих за допомогою ультразвукового дефектоскопу у комплекті з п'єзоперетворювачами з фазованими гратками. Проведено лабораторні вимірювання комплексу фізико-механічних параметрів досліджуваних зразків та проаналізовано отримані результати. Розглянуто сучасні методи визначення механічних характеристик сталей та запропоновано шляхи їх оптимізації. Здійснено регресійно-кореляційний аналіз результатів експериментальних досліджень та отримано рівняння залежності між сукупністю параметрів неруйнівного контролю та механічними характеристиками сталей.*

*Для перевірки адекватності запропонованої моделі та для встановлення можливості контролю насосно-компресорних труб (НКТ) на виготовлених з них зразках проведено серію експериментальних досліджень, в результаті яких підтверджено достовірність отриманої розрахункової моделі визначення механічних характеристик сталей за допомогою двох інформативних параметрів, а саме, твердості та інтегральної густини зображень акустичних структурних шумів.*

*Ключові слова: неруйнівний контроль, багатопараметровий контроль, границя плинності, насосно-компресорні труби.*

*Большая часть оборудования нефтегазового комплекса в процессе эксплуатации подвергается воздействию циклически-переменных, механических и тепловых нагрузок, а также влиянию коррозионно-активных сред. Эти воздействия вызывают изменение структурного состояния металла, что способствует ускоренному развитию дефектов (особенно в местах с концентраторами напряжений) с последующим разрушением конструкции.*

Существующие в настоящее время ультразвуковые, электромагнитные и вихрековые методы неразрушающего контроля в основном решают задачи поиска уже образовавшихся дефектов. Однако гораздо важнее обнаружить на начальном этапе накопления повреждений в металле путем определения изменений структурного состояния металла.

Предлагается методология исследования структурных изменений стали в процессе эксплуатации и определения их влияния на механические характеристики. Обоснован выбор оптимального показателя, характеризующего изображения акустических структурных шумов материала, полученных с помощью ультразвукового дефектоскопа, укомплектованного пьезопреобразователями с фазированными решетками. Проведены лабораторные измерения физико-механических параметров исследуемых образцов и проанализированы полученные результаты. Рассмотрены современные методы определения механических характеристик сталей и предложен путь их оптимизации. По результатам регрессионно-корреляционного анализа данных экспериментальных исследований получено уравнение зависимости между совокупностью параметров неразрушающего контроля и механическими характеристиками сталей.

Для проверки адекватности предложенной модели и для установления возможности контроля насосно-компрессорных труб (НКТ) на изготовленных из них образцах проведена серия экспериментальных исследований, в результате которых подтверждена достоверность полученной расчетной модели определения механических характеристик сталей с помощью двух информативных параметров, а именно, твердости и интегральной плотности изображений акустических структурных шумов.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, многопараметрический контроль, предел текучести, насосно-компрессорные трубы.

*Most of the oil and gas equipment complex is subjected to cyclic-variable, mechanical, thermal loads and corrosive-active environment. These effects causing a change in the structural state of the metal contribute to the accelerated development of defects, especially in places with stress concentrators, which ultimately lead to the constructions destruction.*

*Available ultrasonic, electromagnetic, and eddy-current non-destructive testing methods are currently aimed at solving defect detection problems. However, it is more important to timely identify the initial stage of the process of damage accumulation in a metal by determining changes in the structural state of the metal.*

*The article proposes a methodology for studies of steel structural changes arising in the process of exploitation and their impact on mechanical characteristics. A reasonable choice of the optimal indicator characterizing the image of the acoustic structural noise of the material obtained by applying ultrasonic flaw detector in a complete set with piezoelectric converters with a phased array is substantiated. The complex of physical and mechanical parameters of the investigated samples are measured and the results obtained were analyzed. The modern methods of determination of mechanical characteristics of steels are considered, their deficiencies are determined and the methods of their optimization are proposed. The regression-correlation analysis of the experimental studies results was carried out, which resulted in the equation of dependence between a set of non-destructive control parameters and mechanical characteristics of steels was obtained.*

*In order to verify the adequacy of the proposed model and to establish the possibility of controlling the casing and tubing on the samples made, series of experimental studies were carried out, which confirmed the reliability of the resulting calculation model for determining the mechanical characteristics of the steels by using two informative parameters, namely hardness and integral density of images of acoustic structural noise.*

Keywords: non-destructive testing, multiparameter control, yield strength, tubing.

## ВСТУП

Технічне діагностування у ході експлуатації обладнання нафтогазового комплексу здебільшого вирішує лише задачу виявлення і моніторингу розвитку дефектів типу тріщин, зумовлених впливом експлуатаційних чинників. За своєю природою це макродефекти, які визначають інтегральні властивості елементів конструкцій. Розмір цих дефектів значно (на порядок і більше) перевищує розмір структурних елементів матеріалів, такі як розмір зерна, нерівномірність розподілу складових та структури сталі, міжкристалічна корозія, які і є причиною зародження мікро-, а в подальшому

макродефектів та неоднорідності фізико-механічних характеристик.

Проте ще задовго до появи мікродефектів під час експлуатації відбуваються зміни в конструкційних матеріалах на мікроструктурному рівні – так звана деградація [1]. Технічні і граничні стани елементів конструкцій оцінюють за результатами дефектоскопічного контролю і характеристиками конструкційних матеріалів, отриманими на етапі виробництва, тобто без урахування їх експлуатаційної деградації. Це призводить до недостовірних оцінок залишкового ресурсу елементів конструкцій і зростання ризику їх руйнування [2].

## Аналіз сучасних закордонних та вітчизняних досліджень і публікацій

Оцінювання технічного стану та обґрунтування залишкового ресурсу конструкцій після довготривалої експлуатації залишається комплексною та не до кінця вирішеною проблемою [3].

Оцінюючи технічний стан конструкцій тривалої експлуатації, зазвичай визначають місцезнаходження, кількість і розміри дефектів. Деякі з них усувають під час ремонту, а наявність інших враховують, визначаючи напружено-деформований стан елемента конструкції з дефектами (тріщинами) та визначають його залишковий ресурс за вихідними (заводськими) механічними характеристиками конструкційних матеріалів. Проте з розвитком експлуатаційної деградації механічні характеристики матеріалів погіршуються; відповідно знижується і їх залишковий ресурс.

### Формулювання цілей статей

Метою статті є проведення експериментальних досліджень з аналізом отриманих результатів та визначення характеру і типу залежності між інформативними параметрами методів неруйнівного контролю (а саме, зображень акустичних структурних шумів сталей, що отримані за допомогою ультразвукових дефектоскопів у комплекті з п'єзоелектричними перетворювачами з ультразвуковими фазованими ґратками (УЗФГ)) та фізико-механічними характеристиками сталей, а також перевіряння їх адекватності.

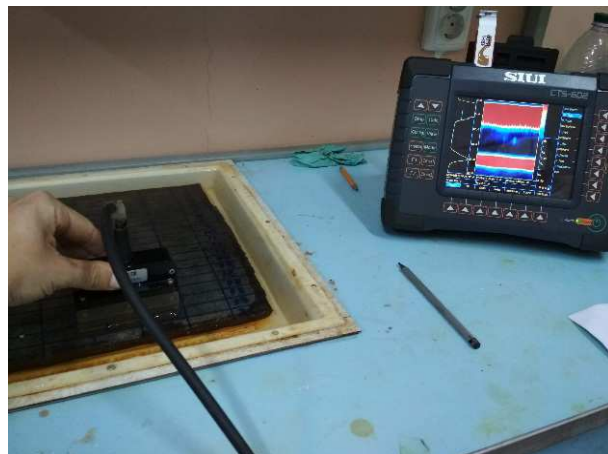
Для досягнення поставленої мети необхідно:

- 1) визначити оптимальний інформативний параметр, що характеризує зображення акустичних структурних шумів;
- 2) встановити наявність та характер залежностей між інформативним параметром зображень акустичних структурних шумів сталей та їх фізико-механічними характеристиками;
- 3) провести дослідження з метою перевірки правильності запропонованої залежності.

### Висвітлення основного матеріалу

Дослідження структурних змін сталі, що виникли в процесі експлуатації, та їх впливу на механічні характеристики проводилися згідно із запропонованою методологією [4], що включає в себе:

- розроблення плану проведення експериментальних досліджень залежності інформативних параметрів методів неруйнівного контролю та фізико-механічних характеристик сталей;
- вибір матеріалу металоконструкцій (а саме, конструкційної легованої сталі марки 40Г);
- відбір зразка зі структурними неоднорідностями, що виготовлений з даної сталі, з метою проведення експериментальних досліджень;
- підбір типу ультразвукового дефектоскопа та п'єзоелектричних перетворювачів (SIUI CTS-602 з перетворювачем 5.0L-64-1.0-10 та перехідною призмою 64N00L-40);
- проведення повного ультразвукового сканування досліджуваного зразка (рис. 1) з метою визначення ділянок з найбільш вираженими структурними змінами;
- виготовлення з металу, що розміщений в цих ділянках 18 циліндричних стандартних зразків для розтягу відповідно до ГОСТ 1497-84 [5];
- проведення руйнівних статичних випробувань на розтяг виготовлених циліндричних зразків типу III згідно з [5];
- отримання індивідуальних діаграм розтягу для кожного з зразків;
- визначення границі міцності, границі плинності, показників відносного видовження і звуження для кожного з 18 зразка .



**Рисунок 1 – Дослідження структурних неоднорідностей у відібраному зразку зі сталі 40Г**

В попередніх дослідженнях [4] як оптимальні кількісні показники акустичних зображень структурних шумів сталей запропоновано використати фактичну площу неоднорідностей та інтегральну густину акустичних зображень структурних шумів (далі інтегральна густина).

Таблиця 1 – Фізико-механічні параметри циліндричних зразків III типу та кількісні показники зображень акустичних структурних шумів

№ зразка	Границя міцності, $\sigma_b$ , Н/мм <sup>2</sup>	Границя плинності, $\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	Відносне видовження, $\delta_s$ , %	Відносне звуження, $\psi$ , %	Площа структурних неоднорідностей, пікселів	Інтегральна густина зображення, $\cdot 10^5$	НВ	Нс, А/см	I, ум.од.
1	610	440	30	69	5220	8,43853	221	6,6	1972
2	600	400	32	71	7407	15,15736	226	6,4	1974
3	620	415	27	69	6963	12,69751	223	6,3	1973
4	620	425	28	68	152	11,73415	226	6,4	1980
5	610	435	23	69	207	11,58939	224	6,4	1997
6	620	485	26,5	70	6404	7,69845	226	6,6	1982
7	620	420	29	69	9965	13,86568	225	6,4	1991
8	620	425	27,5	68	6719	11,06315	218	6,5	2002
9	570	435	27,5	71	5038	11,57082	217	6,3	1976
10	620	465	27,5	70	8724	7,87664	230	6,4	1975
11	610	380	27	71	209	14,81317	212	6,5	1967
12	610	455	25	67	5044	9,68726	223	6,3	1980
13	610	435	26	69	15124	11,59324	225	6,7	1982
14	600	405	26,5	69	10536	15,15478	215	6,5	1975
15	620	420	25	70	9853	14,17472	225	6,3	1969
16	610	430	26,5	71	6842	11,89456	218	6,4	1972
17	610	420	27	68	7952	12,14123	222	6,5	1982
18	600	410	25,5	68	7154	12,96452	215	6,4	1972

Для визначення інтегральної густини зображення, отримані за допомогою дефектоскопа з УЗФГ, піддаються обробці в програмному середовищі MatLab [6]. Додаткове ПЗ Image Processing Toolbox конвертує графічні зображення в матрицю чисел, де кожне число відповідає градієнту кольору кожного пікселя. Тобто кожному пікселю зображення присвоюється число, що залежить від його кольору. Інтегральна густина зображення характеризує суму цих чисел і є безрозмірною величиною.

Результати, отримані після опрацювання акустичних зображень матеріалу зразків III типу, виготовлених згідно з ГОСТ 1497-84 для випробування на розтяг, зведені до табл. 1.

Також в ході експерименту на дослідному зразку проведені лабораторні вимірювання комплексу фізико-механічних параметрів, таких як: коерцитивна сила *Нс*, твердість *НВ*, магнітний індуктивний параметр *I* (визначається частотою електромагнітних коливань індуктивного перетворювача, що взаємодіє з об'єктом контролю [7]), які є структурночутливими для феромагнітних сталей. Перелік технічних засобів, ілюстрація до процесу проведення досліджень, а також нормативні документи (методики контролю), якими регламентується кожен вид контролю, наведені в таблиці 2.

Для визначення наявності і характеру взаємозв'язку між інформативними параметрами зображень акустичних структурних шумів сталі і її фізико-механічних характеристик (ФМХ) проведено графічний та кореляційний аналіз.

Характер зв'язку між обраними характеристиками металу встановлювали шляхом попарного кореляційного аналізу результатів спостережень інформативних параметрів, які характеризують мікроструктуру  $M_q$ , та інформативних вимірних фізичних параметрів  $F_j$ , а наявність між ними кореляційної залежності визначали за формулою [8]:

$$R = \frac{\frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n M_{q_i} \cdot F_{j_i} - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n M_{q_i} \right) \left( \sum_{i=1}^n F_{j_i} \right) \right]}{\sigma_{M_q} \cdot \sigma_{F_j}}, \quad (1)$$

де  $R$  – коефіцієнт кореляції;


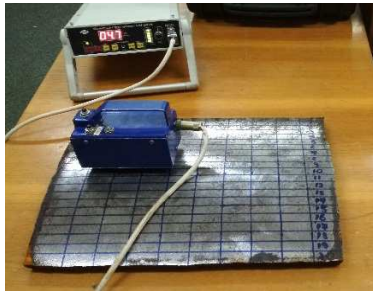

$M_q$  - відповідний інформативний параметр зображень акустичних структурних шумів сталі 40Г;

$F_j$  – відповідний фізичний параметр;

$\sigma_{M_q}$  та  $\sigma_{F_j}$  – стандартні відхилення відповідних величин;

$n$  – кількість спостережень.

Таблиця 2 – Технічні засоби, які використовувалися під час досліджень

№ з/п	Контрольований параметр	Технічні засоби контролю	Нормативний документ чи методика контролю	Проведення досліджень з допомогою вибраних технічних засобів
1	Твердість поверхневого шару за шкалою Брінеля	Твердомір динамічний ТД-32	ГОСТ 22761-77 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия	
2	Коерцитивна сила $H_c$ , А/см	Структуроскоп КРМ-Ц-К2М	Настанови з експлуатації, якими комплектується прилад	
3	Магнітний параметр $I-2$ , ум. од.	Інформаційно-вимірjuвальна система ІВС-12	Методика виконання вимірювань ударної в'язкості сталей трубopовідного сортаменту (розроблена Науково-дослідним інститутом нафтогазової енергетики і екології, 2011р.)	

Таблиця 3 – Коефіцієнти кореляцій між інформативними параметрами неруйнівного контролю і фізико-механічними характеристиками досліджуваних циліндричних зразків

	$H_B$	$H_c$ , А/см	$I$ , ум.од.	Площа неоднорідностей $F$ , ум.од	Інтегральна густина, $R_0$ , ум.од.
Границя плинності, $\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	0,5633	0,1392	0,2514	0,0576	-0,9018

Значення коефіцієнтів кореляцій між параметрами інформативними параметрами неруйнівного контролю та фізико-механічними властивостями наведені в таблиці 3.

Згідно з таблицею 3 площа структурних неоднорідностей, коерцитивна сила та параметр  $I$  мають слабкий зв'язок з границею плинності, про що свідчать малі значення коефіцієнтів кореляції, тому в подальших дослідженнях їх використовувати недоцільно. Натомість найбільші значення коефіцієнтів кореляції характерні для показників інтегральної густини та твердості, тому саме їх і запропоновано використовувати

як основні показники для подальших досліджень. Коефіцієнт кореляції експериментальних даних між границею плинності та інтегральною густиною є від'ємним і складає 0,9. Це свідчить, що ділянки з вищими значеннями інтегральної густини досягають границі плинності за менших значень напруження. Це можна пояснити тим, що за умов високих значень інтегральної густини ультразвукові коливання відбиваються від великої кількості неоднорідностей ґратки (як варіант дислокації). За умови навантаження матеріалу такі неоднорідності концентруються в зоні найбільших напружень,

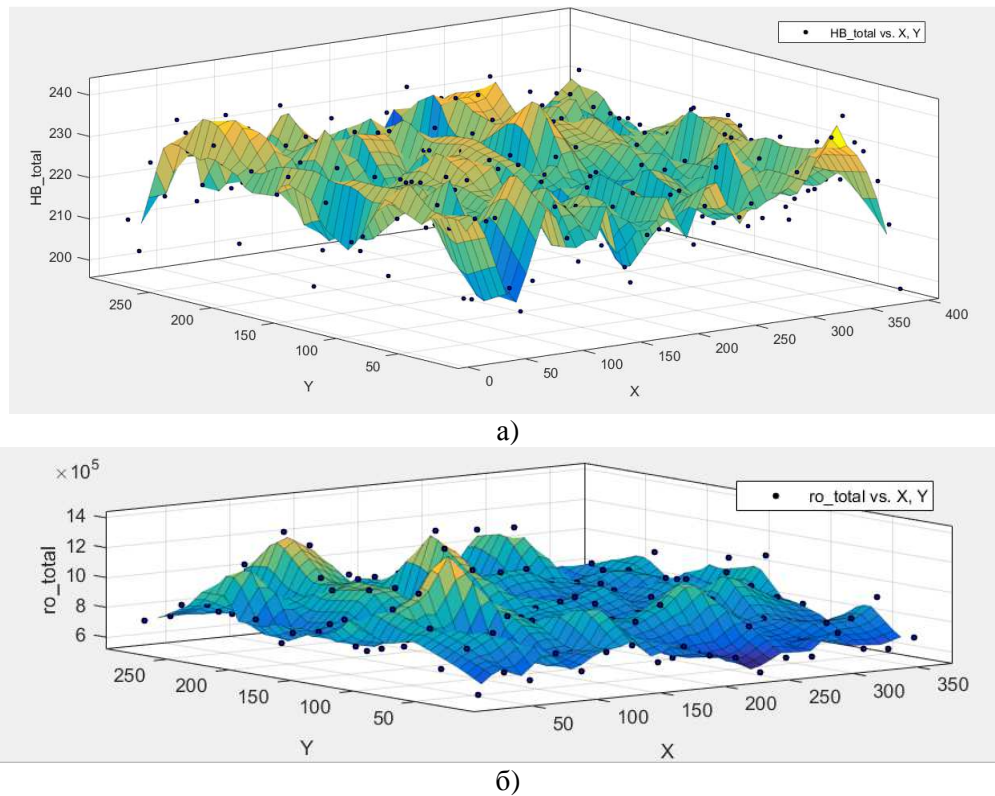


Рисунок 2 – Розподіл твердості (а), та показника інтегральної густини зображень акустичних структурних шумів(б) по поверхні досліджуваного зразка сталі 40Г

призводячи спочатку до підвищення плинності металу в цій зоні, а потім і до руйнування зразка. Фактично інтегральна густина відображає інтегральну суму розмірів зерен сталі, тобто в зонах, де параметр інтегральної густини більший, структура сталі є крупнозернистішою.

Також зміна параметра інтегральної густини пояснюється тим, що в процесі експлуатації під впливом робочих умов можлива перебудова дрібнозернистої структури матеріалу в крупнозернисту. На ділянках, де такий перехід відбувся, виникають додаткові напруження та зароджуються мікротріщини, що в подальшому призводить до утворення макротріщин і руйнування (відповідно до зменшення границі плинності).

Підтвердження залежності параметрів ультразвукових хвиль і структури матеріалу наведені в працях В.В. Муравйова, де зазначено, що коефіцієнт затухання повздовжніх хвиль  $\delta_l$ , обумовлений поглинанням  $\delta_a$ , і розсіюванням  $\delta_b$ , можна розрахувати [9] за формулою:

$$\delta_l = \delta_a + \delta_b = 0,12f + 20f^4 D_g^3, \quad (2)$$

де  $f$  – частота ультразвукової хвилі, МГц  
 $D_g$  – середній діаметр зерна, мм.

Для підвищення точності визначення ФМХ запропоновано взяти за основу існуючу методику визначення механічних характеристик ма-

теріалів і модернізувати її. Оскільки показник інтегральної густини розглядається вперше, і прийнятих методик з його використанням не існує, то за основу взято параметр твердості. Згідно з існуючою методикою, що наведена в ГОСТ 10006-80 [10], границя плинності матеріалу через твердість визначається за формулою:

$$\sigma_t = 0,2 \cdot HB, \quad (3)$$

де  $\sigma_t$  – границя плинності матеріалу, МПа,

HB – твердість за Брінелем, МПа.

Отже, як видно з формули (2), коефіцієнт кореляції між границею плинності і твердістю мав би дорівнювати 1, але аналіз отриманих експериментальних даних свідчить про інше. Відмінності між описаними коефіцієнтами кореляції пояснюються тим, що отримані значення твердості є твердістю тільки поверхневого шару і не можуть характеризувати загальний стан матеріалу. В свою чергу, результати ультразвукових досліджень показали, що структура сталі не однорідна в об'ємі зразка.

Підтвердженням цього є графік розподілу твердості та інтегральної густини (рис. 2) по всій площі контрольованого зразка сталі 40Г.

Таким чином, використання тільки твердості при розрахунку за існуючими методиками границі плинності матеріалу не дає можливості

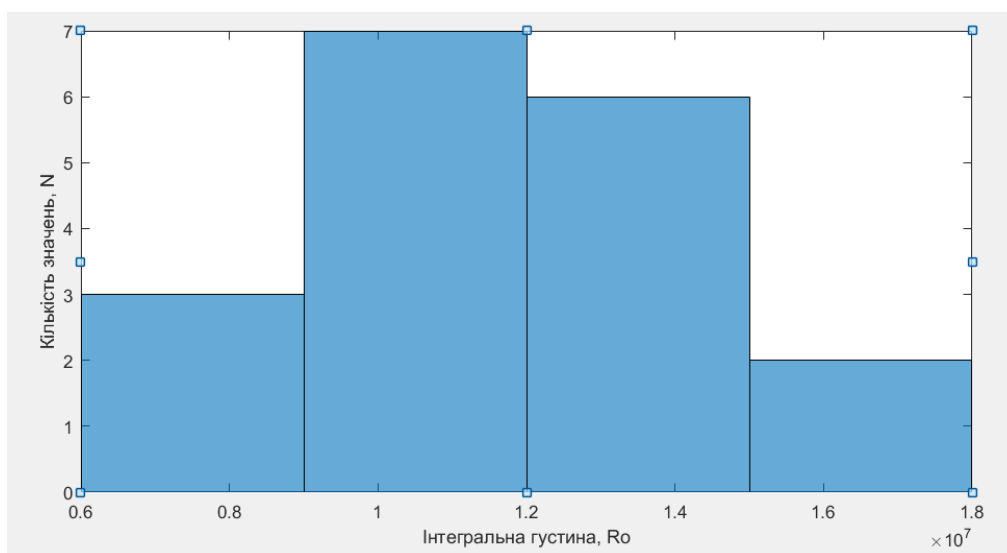


Рисунок 3 – Гістограма розподілу значень інтегральної густини

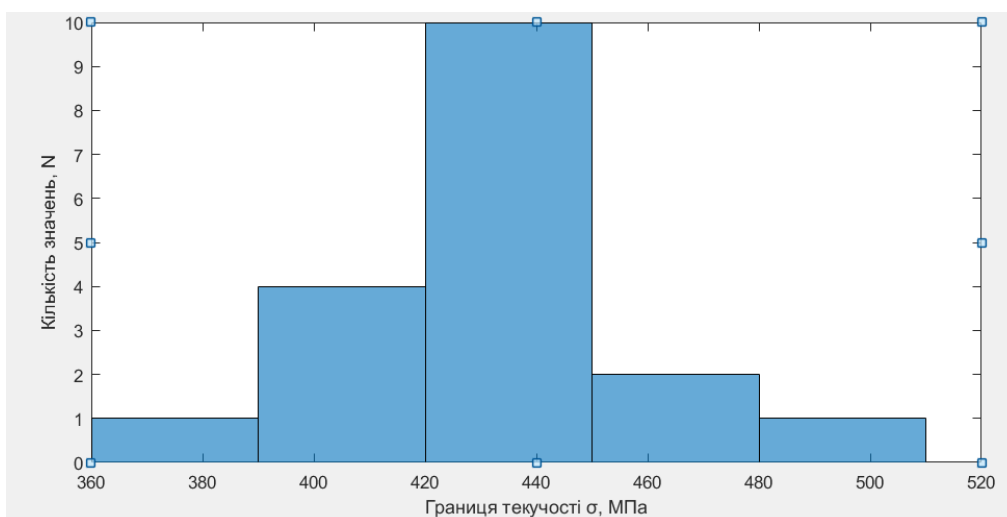


Рисунок 4 – Гістограма розподілу значень границі плинності

отримати достовірну інформацію про фізико-механічні характеристики матеріалу, тому актуальною проблемою залишається удосконалення цих методик шляхом доповнення їх новими інформативними параметрами.

З метою вибору нових інформативних параметрів та удосконалення методики визначення дійсних значень фізико-механічних характеристик сталей було проведено графічний аналіз отриманих значень твердості, інтегральної густини та границі плинності.

На рисунку 3 наведено гістограму розподілу значень інтегральної густини, яка була отримана у ході експериментальних досліджень. Подібність гістограми до нормального розподілу свідчить, що основна частина експериментальних зрізків, яка відповідає вершині розподілу, характеризує зразки з дрібнозернистою структурою, а отже, малими значеннями інтегральної густини. У випадку збільшення зернистості кількість зрізків зменшується.

На рисунку 4 наведено гістограму частот експериментальних значень границі плинності. Вигляд цієї гістограми також свідчить про наближення до нормального розподілу. Це підтверджує, що величина границі плинності для більшої частини зразків близька до її середнього значення – 440 МПа.

Аналіз та порівняння гістограм рис. 3 і 4 свідчить про імовірну високу корельованість між параметром інтегральної густини та границі плинності, що підтверджується аналітичними даними.

Розподіл частот вимірених значень твердості для експериментальних зрізків наведено на рис. 5. Даний розподіл близький до рівномірного, що свідчить про великий розкид значень твердості і порівняно невисоку корельованість з границею плинності. Однак використання твердості як параметра з іншою фізичною природою дозволяє підвищити достовірність результатів вимірювання та рівень його рабастності.

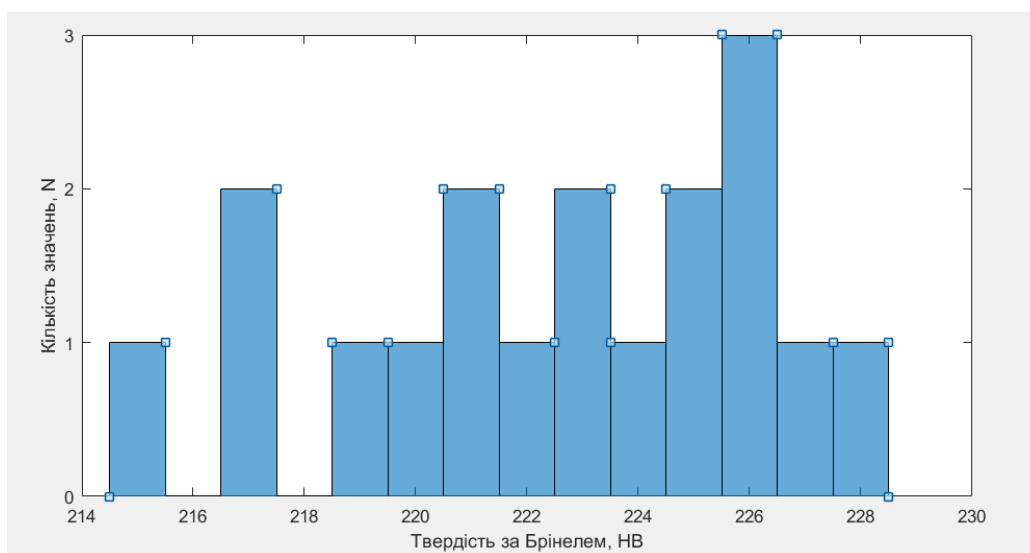


Рисунок 5 – Гістограма розподілу значень твердості

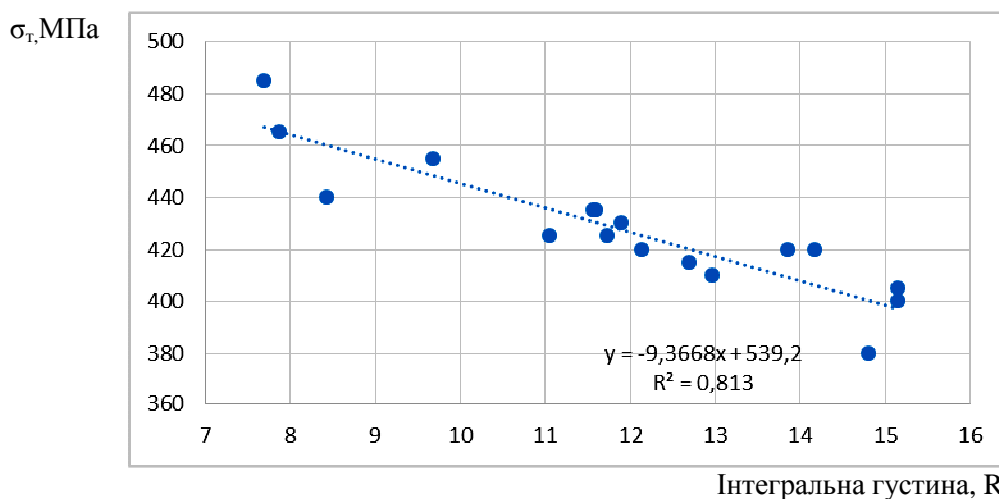


Рисунок 6 – Графік залежності границі плинності як функції інтегральної густини

Для визначення характеру і виду залежності інформативних параметрів неруйнівного контролю від механічних властивостей сталі запропоновано використати регресійний аналіз отриманих даних, що дасть можливість отримати регресійну модель у вигляді рівняння.

З цією метою побудовано графічну залежність границі плинності як функції інтегральної густини, що зображена на рис. 6. Для експериментальних значень відповідних параметрів була розрахована регресійна залежність та коефіцієнт кореляції. Високий коефіцієнт кореляції свідчить про суттєву залежність границі плинності від інтегральної густини і доцільність уведення цього параметру в регресійну модель як аргумента.

З метою визначення характеру та виду залежності границі плинності сталі від її твердості побудовано графік  $\sigma_m = f(HV)$ , зображений на рис. 7. З допомогою засобів математич-

ного аналізу для даного графіку розрахована регресійна залежність та коефіцієнт детермінації, з яких видно, що достовірність апроксимації становить 0,46, а це, в свою чергу, свідчить про точність підбору рівняння регресії – середня.

Результати регресійного аналізу підтверджують, що для твердості характерна гірша корельованість (порівняно з інтегральною густиною) між нею і границею плинності, що свідчить про слабший зв'язок між цими параметрами та вищу похибку вимірювання твердості. Після аналізу отриманих даних встановлено, що зміна твердості експериментальних зразків була в межах 18 одиниць, а діапазон невизначеності вимірювання твердості (похибка вимірювання) становить 12 одиниць. Дане співвідношення змінюваності значень до невизначеності призводить до низької корельованості між границею плинності і твердістю, оскільки в дисперсії границі плинності, зумовленої тверді-



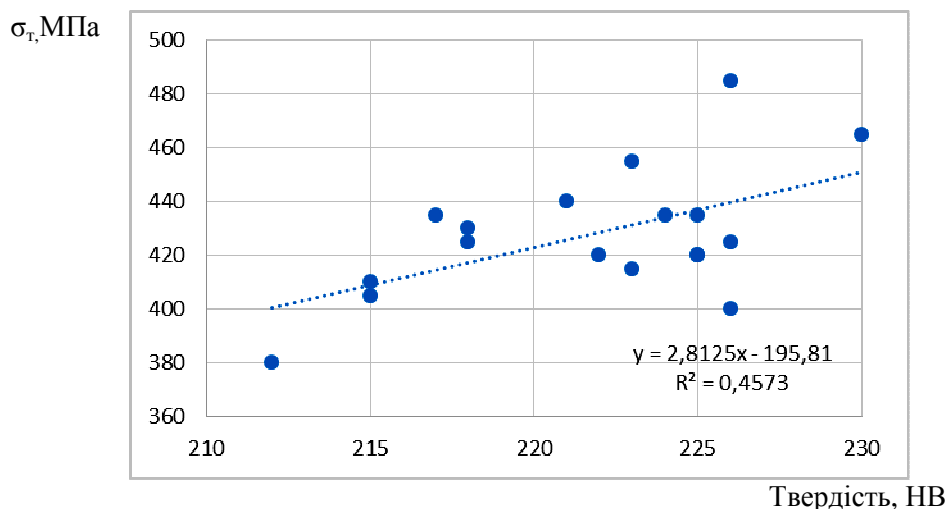


Рисунок 7 – Графік залежності границі плинності як функції твердості

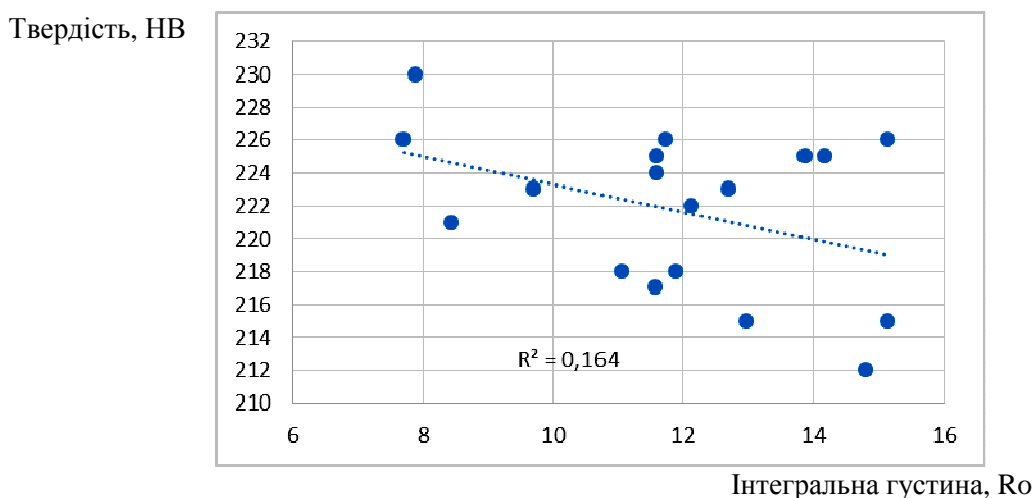


Рисунок 8 – Графік залежності твердості від інтегральної густини

стю велика складова за значеннями розкиду значень твердості, обумовлена впливом інших факторів, а не структурою матеріалу.

Для встановлення рівня взаємозалежності твердості та інтегральної густини проведено їх графічний аналіз. Для цього побудовано графік залежності цих двох величин, визначено коефіцієнт детермінації. (рис. 8). За наявності високої кореляції між значеннями інтегральної густини та твердості їх одночасне використання як аргументів рівняння визначення границі плинності є недоцільним, оскільки вони будуть чинити односторонній вплив на значення функції.

Однак, як видно з рис.8, коефіцієнт детермінації  $R^2$  даної залежності має низьке значення (менше 0,3). Це свідчить про некорельованість аргументів моделі між собою, а отже, сумарна інформаційність цих параметрів вища. Також це дає підстави увести обидва аргументи (інтегральну густину і твердість) в регресійну модель.

Як інструмент для побудови регресійної моделі використано спеціальне програмне забезпечення MatLab. З допомогою надбудови Curve Fitting Tool побудований тривимірний графік (рис. 9) залежності:

$$\sigma_t = f(HB, Ro). \quad (4)$$

Рівняння лінійної регресії для даної моделі має вигляд:

$$\sigma_t = f(HB, Ro) = a_0 + a_1 \cdot HB + a_2 \cdot Ro, \quad (5)$$

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

Для даної моделі коефіцієнт детермінації становить  $R^2=0,8543$ , що свідчить про високий рівень підтверджуваності моделлю отриманих результатів. Тобто значення, отримані за допомогою залежності з високою достовірністю, повторюють експериментальні. Скоректований R-квадрат є модифікованою версією R-квадрата, який був скоригований на кількість предикторів у моделі і становить 0.8349.

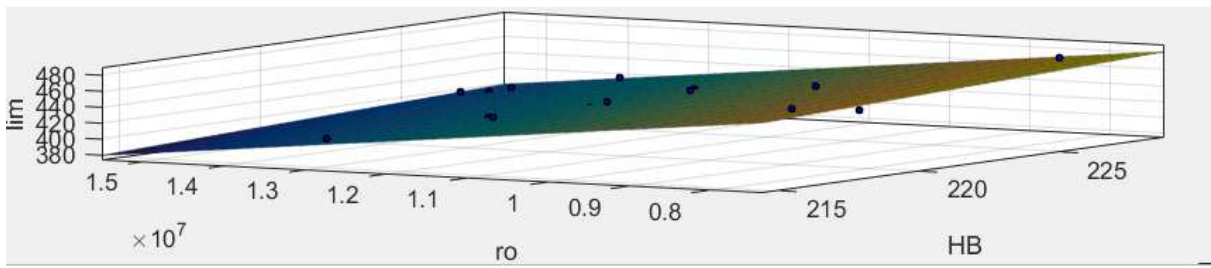


Рисунок 9 – Графік функції залежності границі плинності від твердості та інтегральної густини

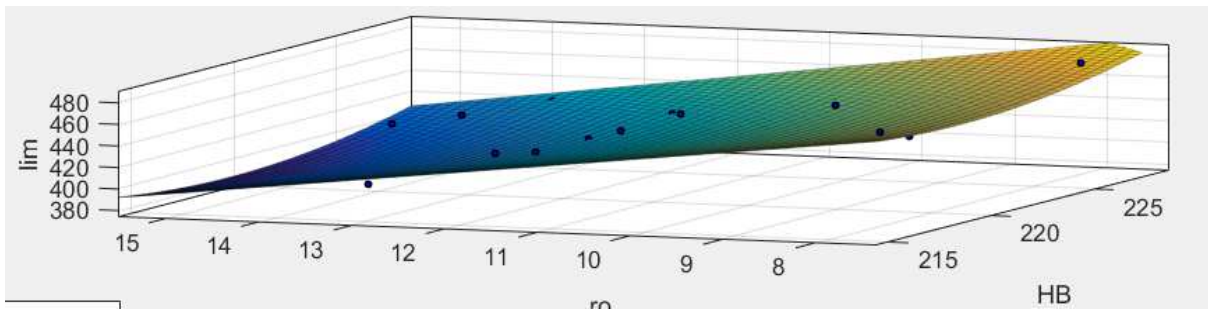


Рисунок 10 – Графік функції залежності границі плинності від твердості та інтегральної густини (змінено степінь аргумента HB)

Низький коефіцієнт кореляції між границею плинності і твердістю також може свідчити про нелінійний характер взаємозв'язку, тому доцільним є моделювання регресійної моделі, де аргумент твердості виражений нелінійно (рис. 10).

З підвищенням степеня аргументів рівняння збільшується кількість коефіцієнтів регресії, що, в свою чергу, ускладнює процес обчислення. Проведений аналіз вигляду рівнянь регресії встановив, що оптимальним є друга степінь для аргумента твердості, оскільки з подальшим збільшенням степеня кількість коефіцієнтів зростає, а коефіцієнт детермінації змінюється несуттєво. Остаточно прийнято таку конфігурацію рівняння:

$$\sigma_t = a_0 + a_1 \cdot HB + a_2 \cdot Ro + a_3 \cdot HB^2 + a_4 \cdot HB \cdot Ro, \quad (6)$$

де  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$  - коефіцієнти регресії, які відповідно дорівнюють:  $a_0=13890$ ;  $a_1=-123,1$ ;  $a_2=11,64$ ;  $a_3=0.2835$ ;  $a_4=-0.09933$ .

Коефіцієнт детермінації для даного рівняння становить  $R^2=0,8779$ , що свідчить про високий рівень підтверджуваності моделлю отриманих результатів. Скоректований R-квадрат є модифікованою версією R-квадрата, який був скоригований на кількість предикторів у моделі і становить 0,8404. Середньоквадратична помилка RMSE становить 9,672, в той час як залишкова сума квадратів дорівнює 1216, що свідчить про високу достовірність моделі.

Для перевірки адекватності запропонованої моделі та для встановлення можливості контролю насосно-компресорних труб (НКТ) на виготовлених з них зразках проведено серію експериментальних досліджень. Фізико-механічні характеристики матеріалу труб підбирались з умови наближеності до характеристик сталі 40Г. Тому, в якості експериментального зразка відібрано насосно-компресорну трубу [11] групи міцності К, механічні характеристики якої наведені в таблиці 4.

Для експериментальних досліджень відібрано зразок насосно-компресорної труби з умовним діаметром 73 мм та довжиною близько 350 мм, поверхню якої було підготовлено та очищено від слідів корозії.

З метою покращення якості отриманих акустичних зображень структурних шумів металу виготовлено спеціальну перехідну призму, поверхня дотику якої ідентична з кривизною поверхні НКТ з умовним діаметром 73мм (рис. 11).

Тіло НКТ піддавалось 100% УЗ-скануванню з використанням ультразвукового дефектоскопу у комплекті з п'єзоелектричними перетворювачами з ультразвуковими фазованими ґратками SIUI CTS-602 з метою отримання зображення акустичних структурних шумів та виявлення структурних неоднорідностей. Після опрацювання результатів УЗ-контролю розраховано значення інтегральної густини зображень. Також виміряно твердість зазначених ділянок зі структурними неоднорідностями.

Таблиця 4 – Механічні характеристики насосно-компресорних труб відповідно до груп міцності

Показник	Норма механічних характеристик для сталей групи міцності						
	Д		К	Е	Л	М	Р
	Виконання А	Виконання Б					
Границя міцності $\sigma_B$ , МПа, не менше	655	638	687	689	758	823	1000
Границя плинності, $\sigma_T$ , МПа, не менше	379	373	491	552	654	724	930
Границя плинності $\sigma_T$ , МПа, не більше	552	-	-	758	862	921	1137
Відносне видовження, %, не менше	14,3	16,0	12,0	13,0	12,3	11,3	9,5



а)



б)

а) загальний вигляд, б) вигляд збоку

Рисунок 11 – Перехідна призма ультразвукового п'єзоперетворювача з фазованими ґратками

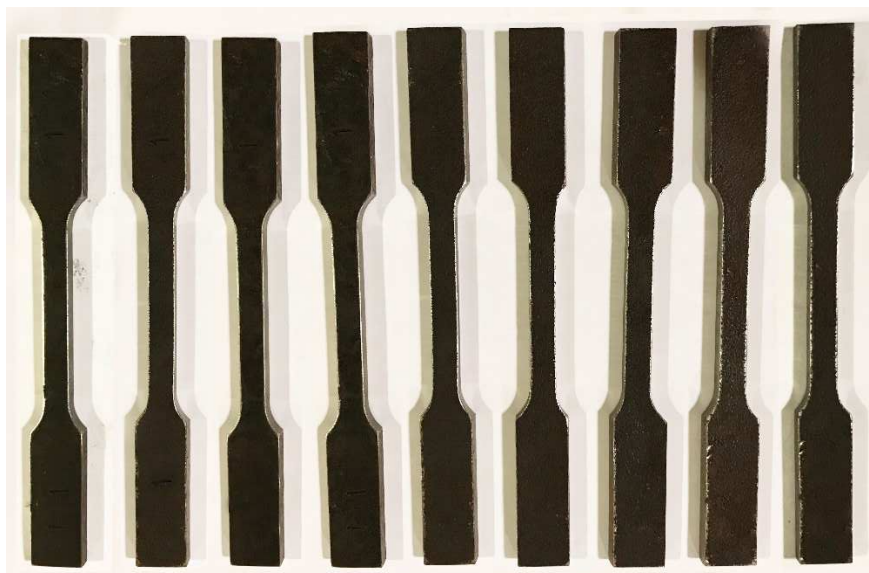


Рисунок 12 – Стандартні плоскі зразки для руйнівних статичних випробувань на розтяг

Результати вимірювань внесені в отриману розрахункову модель (6) визначення границі плинності. Розрахункове значення границі плинності, виміряні значення твердості та інтегральна густина наведені в таблиці 5.

В подальшому з металу, що розміщений в зонах з структурними неоднорідностями, виго-

товлено 9 стандартних зразків для розтягу згідно з [5] (рис. 12).

Для перевірки отриманих розрахункових результатів згідно з (6) проведено руйнівні статичні випробування на розтяг з метою визначення реальних механічних характеристик матеріалу (рис.13).



Рисунок 13 – Стандартний плоский зразок, виготовлений з НКТ, під час випробування на розтяг

У результаті статичних руйнівних (рис. 14) випробувань на розтяг отримано індивідуальні діаграми розтягу для кожного зі зразків відповідно до [5]. За допомогою графоаналітичного та розрахункового способів згідно з [5] визначено границі плинності. Результати випробувань на розтяг наведені в таблиці 5.

Абсолютна похибка розраховується, щоб оцінити розбіжність між розрахунковими та реальними значеннями границі плинності за формулою:

$$\Delta = \frac{\sigma_i^{\phi} - \sigma_i^p}{\sigma_i^{\phi}} \cdot 100\% , \quad (7)$$

де  $\sigma_i^{\phi}$  - границя плинності, визначена руйнівними методами, МПа;

$\sigma_i^p$  - розрахункове значення границі плинності, МПа.



Рисунок 14 – Стандартні плоскі зразки після випробування на розтяг

Таблиця 5 – Результати вимірювань твердості, інтегральної густини, розрахункове значення границі плинності, значення границі плинності, визначені руйнівними способами та абсолютна похибка

№ зразка	Твердість за Брінелем, НВ	Інтегральна густина зображення, $\cdot 10^5$	Границя плинності, $\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	Розрахункове значення границі плинності, $\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	Абсолютна похибка, %
1	239	12,58592	523	535	2,0
2	240	13,38321	517	536	3,6
3	241	15,23452	509	526	3,2
4	238	15,65345	503	487	3,3
5	231	7,38931	530	521	1,7
6	235	11,48336	510	507	0,6
7	240	12,25261	522	548	4,7
8	230	14,84832	515	549	5,0
9	241	15,94742	497	517	3,8

Порівняння розрахункових і реальних значень границі плинності матеріалу НКТ групи міцності К свідчить про високу достовірність отриманої розрахункової моделі (похибка не перевищує 5%) визначення механічних характеристик сталей за допомогою двох інформативних параметрів, а саме, твердості та інтегральної густини зображень акустичних структурних шумів. Її використання дозволить суттєво підвищити точність визначення ФМХ матеріалу насосно-компресорних труб, які були в експлуатації, що, в свою чергу, зменшить аварійність на свердловинах внаслідок покращення процесу розбракування труб та формування з них ліфтових колон. Також використання фактичних значень механічних характеристик матеріалу у сучасних методах розрахунку залишкового ресурсу дозволить достовірно оцінити ресурс обладнання, що відпрацювало нормативний термін експлуатації.

### Висновки

В даній статті проаналізовано результати експериментальних досліджень залежності інформативних параметрів методів неруйнівного контролю, а саме зображень акустичних структурних шумів сталей, що отримані за допомогою ультразвукових дефектоскопів у комплекті з п'єзоелектричними перетворювачами з ультразвуковими фазованими ґратками (УЗФГ) та фізико-механічних характеристик сталей. Запропоновано удосконалення існуючої моделі оцінки механічних характеристик матеріалів шляхом доповнення новим інформативним параметром. Запропоновану модель подано у вигляді рівняння та проведено експериментальні дослідження з метою перевірки її адекватності.

### Література

1 Крижанівський Є.І. Корозійно-воднева деградація нафтових і газових трубопроводів та її запобігання: наук.-техн. пос. у 3 т. / Є.І. Крижанівський, Г.М. Никифорчин; під заг. ред. В.В. Панасюка. – Івано-Франківськ: вид-во Івано-Франківськ нац. техн. ун-ту нафти і газу. Т.1: Основи оцінювання деградації трубопроводів. – 2011. – 458 с.; Т. 2: Деградація нафтопроводів та резервуарів та її запобігання. – 2011. – 448 с.; Т. 3: Деградація газопроводів та її запобігання. – 2012. – 434 с.

2 Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. посіб. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Ос-

таш, В. М. Федірко, В.М. Учанін та ін. – Львів: Сполом, 2007. – 1068 с.

3 Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довідн. посіб. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т.15: Остап О. П. Структура матеріалів і втомна довговічність елементів конструкцій. – Львів: Сполом, 2015. – 312 с.

4 Чабан Н.І. Експериментальні дослідження залежності інформативних параметрів методів неруйнівного контролю та фізико-механічних характеристик сталей / Н.І. Чабан // Нафтогазова енергетика. – 2018. – №2(30). – С. 44-48.

5 ГОСТ 1497-84 Метали. Методи випробувань на розтяг. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 28 с.

6 Wick D. Free and open-source software applications for mathematics and education / D. Wick // Proceedings of the twenty-first annual international conference on technology in collegiate mathematics. – 2009. – P. 300–304.

7 Миндюк В.Д. Досвід оцінки деградації матеріалу труб аміакопроводу за результатами неруйнівного контролю їх механічних характеристик / В.Д. Миндюк, М.О. Карпаш, А.В. Яворський, І.В. Рибіцький, Є.Р. Доценко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – №2. – С. 30-35. – ISSN 0235-3474.

8 Миндюк В.Д. Експериментальні дослідження щодо можливості оцінки фактичного стану металу елементів нафтогазового обладнання в процесі їх експлуатації / В.Д. Миндюк // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2015. – № 3. – С. 89-99.

9 Методика определения акустических структурных шумов металла / В.В. Муравйов, О.В. Муравйова, А.В. Байтерьяков, А.І. Дедов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1(21). – С. 143-148.

10 ГОСТ 10006 – 80 Трубы металлические. Метод испытания на растяжение. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 12 с.

11 ГОСТ 633-80 Трубы насосно-компресорні і муфти до них. Технічні умови. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 43 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*  
29.11.18

*Рекомендована до друку*  
професором **Райтером П.М.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Петришиним І.С.**  
(ДП «Івано-Франківськстандартметрологія»,  
м. Івано-Франківськ)