

О.В. Шарко, д.т.н., проф.

В.Д. Нігалатій, аспір.

Херсонська державна морська академія

**ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З АКУСТИЧНИМИ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИМИ ПАРАМЕТРАМИ**

Досліджено взаємозв'язок між акустичними характеристиками і твердістю сталей 30ХГСНА і У8. Сутність методики вимірювань полягала у тому, що у зразках на початковому етапі визначали швидкість поширення ультразвуку, використовуючи прямі шукачі з робочою частотою 2,5 і 5 МГц. Надалі вимірювали мікротвердість зразків та порівнювали отримані залежності результатів вимірювань.

Статистична обробка результатів вимірювання показала, що значення коефіцієнта кореляції  $r = -0,949$  для сталі У8 і  $r = -0,906$  для сталі 30ХГСНА. При довірчій ймовірності 0,98 табличні значення коефіцієнта кореляції для вимірювання на сталі У8 –  $r_{табл.} = 0,63$  і для сталі 30ХГСНА –  $r_{табл.} = 0,82$ . Це свідчить про існування кореляційного зв'язку між швидкістю ультразвуку й твердістю матеріалу.

Як показали результати експериментальних досліджень, у випробуваному методі ультразвукового контролю матеріалів незначні зміни акустичного контакту (у шарі контактної рідини, співвідношенні ізоперетворювачів із зразком) призводять до розкиду експериментальних даних навіть на одному і тому самому зразку. Цих недоліків немає в імерсійному методі контролю.

**Ключові слова:** механічні властивості; твердість; матеріали; перетворювач.

**Актуальність роботи. Постановка проблеми.** Високі вимоги до якості металопродукції можуть бути задоволені лише за належного контролю над технологічними процесами на різних стадіях виготовлення виробів. У процесі виготовлення виробів, як і в процесі їх експлуатації, відбувається зміна механічних властивостей матеріалів. Дані зміни обумовлені впливом температури, тиску, радіоактивного опромінення й інших факторів на міцність і ресурс машин та механізмів у цілому.

За однакового хімічного складу матеріалів, але різної технології їх виготовлення, формується різна структура й властивості металів та сплавів. Знання про структуру дозволяють оптимізувати технологічні процеси одержання матеріалів.

**Аналіз публікацій за зазначеною проблемою** показує, що традиційні методи визначення механічних властивостей, які ґрунтуються на визначенні характеристик міцності матеріалів, не можуть вже вважатися досить об'єктивними, оскільки не дають інформації про якість усього матеріалу в цілому. Отримані результати надають інформацію про властивості частини виробу, з якої вирізаний випробуваний зразок і, крім того, не дозволяють забезпечити відтворюваність результатів вимірювань у цілому [1–10].

**Метою роботи** є наукове обґрунтування методик і перспективних напрямів дослідження взаємодії електрофізичних характеристик матеріалів з їх фізико-механічними властивостями.

**Викладення основного матеріалу.** Залежно від вимірюваної структурно чутливої характеристики матеріалу методи контролю механічних властивостей можна розділити на три групи: механічні, акустичні й електромагнітні [2, 3].

Механічні вимірювання ґрунтуються на визначенні межі міцності  $\sigma_0$ , границі текучості  $\sigma_{02}$ , відносного видовження  $\delta$  й звуження  $\Psi$ . Їх вимірювання вимагає виготовлення спеціальних зразків, що руйнуються під час випробувань. Тому як характеристику достовірності механічних властивостей матеріалів використовують твердість, оскільки для багатьох металів і сплавів існує ряд емпіричних залежностей між твердістю й механічними властивостями.

Існують статичні й динамічні методи вимірювання твердості. Серед статичних методів, найбільш широко розповсюджених у промисловості, розрізняють вдавнення сталеві кульки з визначенням твердості за величиною поверхні відбитка (спосіб Брінеля), вдавнення сталеві кульки або алмазного конуса з визначенням твердості за глибиною одержаного відбитка (спосіб Роквелла), вдавнення алмазної піраміди з визначенням твердості за величиною поверхневого відбитка (спосіб Віккерса).

Найбільш зручні для досліджень ті випробування, що дозволяють одержати залежність напруги в лунці від величини деформації при вдавненні індентора. При цьому згідно з показниками приладів, за допомогою яких роблять ступінчасте занурення індентора, будують діаграму твердості, фіксуючи навантаження й параметри відбитка на кожному ступені. У пружній області таку діаграму можна побудувати в домінуючій частині для вимірювання параметрів відбитків під навантаженням, тобто невідновлених відбитків. З появою перших пластичних деформацій вимірюють відбитки після зняття

навантаження, тобто відновлені відбитки. Вивчення діаграм твердості – одне з основних завдань в області вимірювання твердості [6].

Основний недолік механічних випробувань полягає в залежності випробувань від стану матеріалу. Крім того, за певних обставин ці методи по-різному чутливі до зміни складу й структури матеріалів. При цьому значення твердості, визначені за Роквеллом, не показують змін у тонкій структурі, тоді як твердість, отримана за Віккерсом, є до них чутливою. Крім того, надійне уявлення про напружений стан матеріалу можливе лише за умови погодження сили вдавлення індентора і величини відбитка з нормованими значеннями напруги і деформації.

Принцип дії електромагнітних приладів контролю характеристик міцності матеріалів заснований на наявності кореляційного зв'язку між магнітними й механічними властивостями. Відомо [8], що режими термообробки одночасно впливають на магнітні й механічні властивості. Виходячи з цього, можна констатувати, що практично в усіх випадках, коли магнітні властивості корелюють із твердістю або з іншими механічними характеристиками, вони однозначно пов'язані з режимами термообробки.

За вимірювані характеристики використовують як стандартні магнітні характеристики: електропровідність, початкова й максимальна магнітна проникність, коерцитивна сила, залишкова індукція, так і нестандартні: миттєва амплітуда напруги несинусоїдальної форми (при перемагнічуванні виробу в сильних змінних полях), амплітуда й фаза однієї з гармонік напруги датчика (при перемагнічуванні виробу в полі великої напруженості), залишкова індукція повністю або частково намагніченого виробу тощо. Під час класифікації засобів електромагнітного контролю доцільно за основу брати не вид вимірюваної характеристики, а метод вимірювання.

За засобами вимірювання електромагнітні методи можна поділити на: пристрої для вимірювання у постійному магнітному полі, у низькочастотних полях великої напруженості, у високочастотних полях малої напруженості, у дво- і багаточастотних полях, пристрої для вимірювання параметрів вищих гармонік електромагнітного поля.

До загальних недоліків приладів, призначених для вимірювання у постійному магнітному полі, слід зарахувати наявність значної похибки вимірювання, що залежить від неідентичності розмірів контрольованих виробів і магнітопроводу.

На сьогодні немає загальної теорії магнітної діагностики, тому в кожному конкретному випадку доводиться знаходити кореляцію між магнітними й механічними властивостями матеріалів. Навіть у тих випадках, коли така кореляція існує, необхідно її перевіряти у виробничих умовах.

Застосування цих методів обмежене, оскільки у широкому інтервалі варіювання механічних властивостей для багатьох матеріалів спостерігається неоднозначність електромагнітних характеристик. Широкий діапазон хімічного складу матеріалів, навіть у межах однієї марки, змушує вводити у деяких випадках контроль кожної плавки окремо. Тому розробка нових методів неруйнуючого контролю, що здатні доповнити електромагнітні методи, є актуальним завданням сучасної промисловості.

Сучасні акустичні методи дозволяють досліджувати стан матеріалів:

- за швидкістю і часом поширення поздовжніх, поперечних та поперечних хвиль;
- за вимірними значеннями частот власних коливань виробів;
- за даними вимірюваннями коефіцієнта загасання.

Крім того, методами акустичної спектроскопії можна оцінювати механічні властивості матеріалів за результатами акустичних процесів у інденторі, що дозволяє також прогнозувати зміну напруженого стану об'єктів методами акустичної емісії [5].

Істотно впливає на міцність структура металу і, зокрема, величина зерна. Аналіз експериментальних досліджень [4] показує, що найбільш структурно чутливою акустичною характеристикою є коефіцієнт згасання хвиль. У найбільш простому випадку коефіцієнт згасання визначають шляхом порівняння амплітуд сигналів, що пройшли через метал визначеної товщини. Структуру матеріалу оцінюють, зіставляючи результати вимірювань досліджуваного зразка і зразка з відомою величиною зерна. Для таких вимірювань придатні імпульсні ультразвукові дефектоскопи з каліброваним атенуатором.

Один з ефективних способів зменшення похибки вимірювань полягає у контролі однієї і тієї самої ділянки виробу на двох частотах. При цьому одна з частот вибирається свідомо низькою, такою, щоб згасання ультразвуку майже не залежало від структурних складових. Інша частота має відповідати області максимального розсіювання. Відношення вимірних на різних частотах амплітуд сигналів називається структурним коефіцієнтом. Його порівнюють з таким самим коефіцієнтом, отриманим на еталонних зразках. Зазвичай використовують частоти у діапазоні 0,65...20 МГц. При цьому діапазон вимірювання величини зерна в аустенітних сталях – у межах 1...9 балів з точністю  $\pm 1$  бал. Спосіб вимірювання структурного коефіцієнта використовують також для контролю міжкристалічної корозії.

Резонансні методи оцінки міцності матеріалів досить різноманітні. Найбільш простим з них є метод визначення частоти, що відповідає максимально активному навантаженню п'єзоперетворювача при подачі на нього синусоїдального електричного сигналу змінної частоти. Знаючи розміри зразка, можна визначити довжину хвилі і, відповідно, швидкість ультразвуку.

Для визначення напружень у матеріалах може бути використаний фазовий вимірювач швидкості поширення поверхневих хвиль у вигляді підсилювача з акустичним зворотним зв'язком. Він складається з випромінюючого і приймального перетворювачів, підключених до виходу і входу підсилювача, та ділянки досліджуваного середовища між перетворювачами. При виникненні умов балансу амплітуд і фаз у такій замкнутій петлі виникає генерація на частоті

$$F = N \frac{C}{L},$$

де  $N$  – кількість довжин хвиль у середовищі між перетворювачами, розташованими на відстані  $L$  один від одного;  $C$  – швидкість поверхневої хвилі. Вимірюючи цю частоту за допомогою частотоміра, визначають швидкість розповсюдження поверхневої хвилі в досліджуваному матеріалі.

У роботі досліджено взаємозв'язок між акустичними характеристиками і твердістю сталей 30ХГСНА і У8. Сутність методики вимірювань полягала у такому. За шкалою глибиномірного пристрою, налаштованого за зразком з відомою швидкістю поширення ультразвуку  $C_0$ , визначена уявна  $l'$  довжина випробуваного зразка. Дійсну його довжину  $l_0$  вимірювали мікрометром. Шукану величину швидкості  $C$  знаходили за  $nC \frac{l_0}{l'}$ , де  $n$  – номер багаторазового відбиття ехо-імпульсу.

Похибка визначення швидкості становила не більше 0,1 %. При визначенні швидкості розповсюдження ультразвуку використовували прямі шукачі з робочою частотою 2,5 і 5 МГц. З метою забезпечення необхідної точності вимірювань і для з'ясування принципової можливості контролю вибраних марок сталей досліджували зразки, що мають плоскопаралельні поверхні, чистоту обробки торців –  $\nabla 6$  і розміри у напрямку прозвучування –  $50 \pm 0,01$  мм. Для отримання різної твердості зразки гартували при 900 °С з подальшим відпуском при 200...600 °С.

Дані вимірювання наведені на рисунку 1. Статистична обробка результатів вимірювання показала, що значення коефіцієнта кореляції  $r = -0,949$  для сталі У8 і  $r = -0,906$  для сталі 30ХГСНА. При довірчій ймовірності 0,98 табличні значення коефіцієнта кореляції для вимірювання на сталі У8 –  $r_{табл.} = 0,63$  і для сталі 30ХГСНА –  $r_{табл.} = 0,82$ . Це свідчить про існування кореляційного зв'язку між швидкістю ультразвуку й твердістю матеріалу.

Як показали результати експериментальних досліджень, у випробуваному методі ультразвукового контролю матеріалів незначні зміни акустичного контакту (у шарі контактної рідини, співвідношенні п'єзоперетворювачів зі зразком) призводять до розкиду експериментальних даних навіть на одному і тому самому зразку. Цих недоліків не має імерсійний метод контролю.

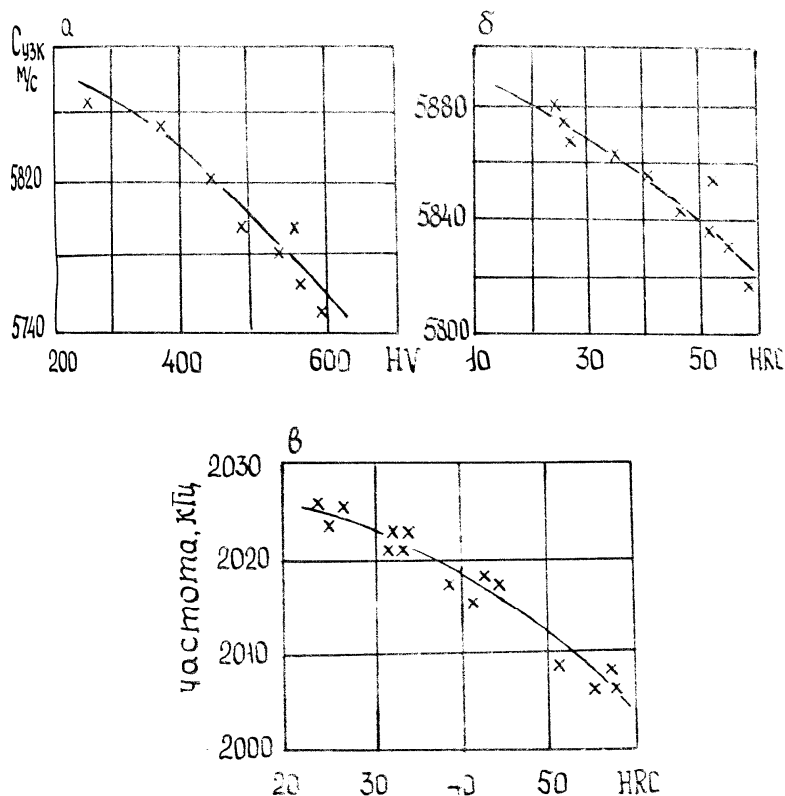


Рис. 1. Залежність акустичних характеристик від твердості сталей:  
а) 30ХГСНА; б) У8; в) 40Х

Додатково досліджували циліндричні зразки зі сталі 40Х з довжиною 50 мм і з діаметром 25 мм. Для одержання різної твердості зразки піддавали термообробці при температурі загартування 850 °С з наступним відпуском при 100...600 °С. Вимірювання резонансної частоти стоячої хвилі здійснювали на установці, що зібрана з генератора ультразвукових коливань ГЗ-41, двох п'єзоперетворювачів з титанату барію при частоті 2,5 МГц, лампового вольтметра з цифровою індикацією ЧЗ-22. Результати вимірювання для зразків різної твердості наведені на рисунку 1, в.

Дані вимірювання були статично оброблені. За результатами розрахунків коефіцієнт кореляції становить 0,62. При довірчій ймовірності 0,99 табличне значення коефіцієнта кореляції дорівнює 0,56. Отже, нерівність  $|r_{\text{табл.}}| < r$  виконується. Це дозволяє стверджувати про те, що кореляційний зв'язок між резонансною частотою утворення стоячої хвилі у зразку та твердістю існує. Велике значення довірчої ймовірності дозволяє констатувати про можливість використання ультразвукового методу контролю для оцінки твердості сталі 40Х.

Відомості про використання акустичних методів для контролю механічних властивостей нечисленні та розрізнені. Це пояснюється малим ефектом зміни швидкості ультразвуку при зміні хімічних властивостей і відсутністю апаратури серійного випуску, що забезпечує вимірювання з необхідною точністю. Разом з тим, виявлена на рисунку 1 практична незалежність результатів акустичних вимірювань від хімічного складу матеріалів у межах їх марки дозволяє констатувати про їх перспективність для дослідження зміни структури за різних технологічних режимів обробки.

Тому вивчення взаємозв'язку структури й властивостей конструкційних матеріалів з їх акустичними й електрофізичними параметрами має наукове і практичне значення. Даний метод є інструментальним засобом вирішення завдань зміцнення й технологічної обробки матеріалів. В основу подальших досліджень має бути покладена фізична модель і механізм взаємозв'язку механічних і акустичних властивостей металів зі структурою, що визначає ці властивості при утворенні та розпаді пересичених твердих розчинів і фазових перетвореннях у металах.

**Висновки.** Аналіз методів і засобів контролю механічних властивостей матеріалів показав: вибіркові механічні випробування є трудомісткими й дорогими; методи, засновані на емпіричних залежностях між твердістю й механічними властивостями надають інформацію лише про властивості поверхневих шарів металів й залежать від їх структури; засоби електромагнітного контролю забезпечують неоднозначність зміни магнітних характеристик від механічних властивостей матеріалів.

#### Список використаної літератури:

1. *Коротин И.М.* Контроль качества термической обработки металла / *И.М. Коротин.* – М. : Высшая школа, 1980. – 192 с.
2. *Скальський В.Р.* Основи акустичних методів неруйнівного контролю : навч. посібник / *В.Р. Скальський, Г.Т. Сулим.* – Львів : Вид. центр ЛНУ імені Івана Франка, 2010. – 386 с.
3. Исследования и практика применения магнитной структуроскопии при техническом диагностировании кранов-перегрузателей завода «Сибтяжмаш» / *В.А. Гудошник, С.А. Губский, В.А. Попов* и др. // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль.* – 2011. – № 2. – С. 51–57.
4. *Бобров В.Т.* Состояние и тенденции развития акустических (ультразвуковых) методов, средств и технологий неразрушающего контроля и технической диагностики / *В.Т. Бобров, А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин* // *Территория NDT.* – 2014. – № 2. – С. 24–26.
5. *Кретов Е.Ф.* Ультразвуковая дефектоскопия в энергомашиностроении / *Е.Ф. Кретов.* – 2014. – 312 с.
6. *Ботвина Л.Р.* Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности / *Л.Р. Ботвина.* – М. : Наука, 2008. – 334 с.
7. *Горкунов Э.С.* Эффект Баркгаузена и его использование в структуроскопии ферромагнитных материалов / *Э.С. Горкунов, Ю.Н. Драгошанский, М.Миховски* // *Дефектоскопия,* 2006. – № 6. – С. 3–38.
8. Электромагнитный неразрушающий контроль упроченного слоя на поверхности стальных изделий / *С.Д. Анисимов, Л.Н. Ананченко, И.Ю. Виноградова* и др. // *Дефектоскопия.* – 2006. – № 1. – С. 18–30.
9. *Шарко А.В.* Физические методы оценки технологических свойств материалов / *А.В. Шарко, И.Ф. Погребняк, В.Д. Нигалатий* // *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та*

обладнання для їх обслуговування : матер. Всеукр. науково-практ. конф. (1–3 жовт. 2014 р.). – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2014. – С. 343–344.

10. *Шарко А.В.* Вероятностные оценки технической диагностики металлов при эксплуатации технологических конструкций / *А.В. Шарко, И.Ф. Погребняк, В.Д. Нигалатий* // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2014) : зб. матер. VI Міжнар. науково-практ. конф. (27–29 трав. 2014 р.). – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2014. – С. 311–313.

ШАРКО Олександр Володимирович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та загальноінженерної підготовки Херсонської державної морської академії.

Наукові інтереси:

- полімерне матеріалознавство;
- механіка твердого деформованого тіла;
- тертя та зношування.

E-mail: mv-brailo@yandex.ru.

НИГАЛАТІЙ Віталій Дмитрович – асистент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та загальноінженерної підготовки, аспірант Херсонської державної морської академії.

Наукові інтереси:

- полімерне матеріалознавство;
- механіка твердого деформованого тіла;
- тертя та зношування.

E-mail: mv-brailo@yandex.ru.

Стаття надійшла до редакції 11.06.2015