



КАРТОГРАФУВАННЯ АДГЕЗІЙНОЇ МІЦНОСТІ ГАЗОТЕРМІЧНОГО ПОКРИТТЯ НА ОСНОВІ РЕЄСТРАЦІЇ ЗВОРОТНЬО-РОЗСІЯНОГО УЗ СИГНАЛУ

**В. І. ПОХМУРСЬКИЙ, В. В. КОШОВИЙ, М. М. СТУДЕНТ, Р. І. РОМАНИШИН, І. М. РОМАНИШИН,
В. М. ГВОЗДЕЦЬКИЙ, П. М. СЕМАК, Р. В. ШАРАМАГА**

Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79053, м. Львів-53, вул. Наукова, 5. E-mail: pminasu@lviv.ua

Запропоновано неруйнівний метод визначення адгезійної міцності газотермічного покриття по поверхні товстостінного виробу на основі реєстрації зворотньо-розсіяного УЗ сигналу у вигляді А-скану. Викладені фізичні основи методу, ультразвукова технологія для його реалізації та результати експериментальної апробації для зразків з газотермічним покриттям. Бібліогр. 7, рис. 6.

Ключові слова: адгезія, УЗ зворотньо-розсіяний сигнал, статистична обробка

Для вимірювання адгезії найбільш поширеними є механічні методи, які зводяться до вимірювання сили або роботи, які необхідно прикласти, щоб відірвати покриття одиничної площі [1, 2]. Такі методи є руйнівними. Крім того, вони не дозволяють визначати адгезію між окремими шарами в багатошарових матеріалах.

До перспективних неруйнівних методів оцінювання адгезії належать УЗ методи [3–5].

Найпростіший УЗ метод виявлення відшарувань покриття від основи [4] базується на тому, що при поширенні УЗ хвиль через матеріали з різним акустичним імпедансом частина енергії відбивається від поверхонь розділу цих матеріалів. Якщо покриття в окремих місцях має відшарування від основи, то від цих відшарувань УЗ хвилі будуть відбиватися і у зареєстрованому сигналі (на екрані осцилографа) буде спостерігатися сигнал, відбитий від відшарування.

Відомий неруйнівний УЗ метод контролю адгезійних зв'язків між тонкими металевими листами порядку 0,8 мм [5]. Цей метод базується на імпульсному УЗ зондуванні об'єкту контролю з поверхні металу, реєстрації багатократно відбитого від границі метал–адгезійний шар УЗ сигналу (часової реалізації А-скану), обчисленні відношення між кожними двома послідовно відбитими сигналами. Це відношення визначається коефіцієнтом відбивання від границі метал–адгезійний шар і на його основі оцінюють адгезійне зчеплення.

В даній роботі запропоновано новий неруйнівний метод картографування адгезійної міцності покриття на основі сканування поверхні об'єкту прямим роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем, реєстрації зворотньо-розсіяного сигналу

(«структурного шуму») у вигляді А-скану [6] у багатьох точках сканування, статистичній обробці зареєстрованих сигналів, визначенні місць відшарувань покриття від основи та побудови просторового розподілу адгезійної міцності покриття. Фізичною основою такого підходу є залежність інтенсивності зворотньо-розсіяного сигналу від адгезійної міцності покриття (якості адгезії), що дає можливість визначати місця відшарувань. Картографування адгезійної міцності покриття проводять на основі інформації про місця відшарувань та тарування відносної площі відшарувань до адгезійної міцності покриття.

Фізичні принципи методу. Адгезійна міцність (Па) визначається силою зчеплення покриття одиничної площі до підкладки [1, 2]. Тому методи визначення адгезійної міцності зводяться до вимірювання сили, яку необхідно прикласти до покриття одиничної площі, щоб відірвати це покриття від підкладки (основи). Інший підхід зводиться до визначення роботи, яку необхідно виконати, щоб відірвати покриття одиничної площі. Обидва ці методи руйнівні.

Адгезійна міцність газотермічного покриття залежить від відношення площі відшарувань T до площі покриття S і визначається за формулою

$$C = C_0 \left(1 - \frac{T}{S} \right), \quad (1)$$

де C_0 – адгезійна міцність покриття при відсутності відшарувань (визначається експериментально за допомогою еталонного зразка або із довідників). Задача зводиться до визначення місць і площі відшарувань.

Обґрунтування використання зворотньо-розсіяного сигналу для визначення наявності відшару-

вання. Коефіцієнт відбивання УЗ сигналу від границі двох середовищ визначається відмінністю імпедансів цих середовищ. При нормальному падінні УЗ хвилі на границю двох середовищ коефіцієнт відбивання рівний:

$$R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (2)$$

де Z_1, Z_2 – імпеданси середовищ (з якого і на яке падає хвиля відповідно; теоретично середовище, на яке падає хвиля, повинно бути напівбезмежне).

Визначення місця відшарування. При зондуванні об'єкта з покриттям повздовжньою хвилею прямим роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем зворотньо-розсіяний УЗ сигнал залежить від якості адгезії між покриттям і підкладкою. В місцях з відшаруванням інтенсивність зворотньо-розсіяного сигналу вища. Тому на першому

етапі поверхня об'єкту з покриттям сканується прямим роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем по сітці, реєструються та аналізуються зворотньо-розсіяні УЗ сигнали у вигляді А-скану в багатьох точках на поверхні сканування (рис. 1).

На другому етапі за результатами аналізу сигналів, зареєстрованих в багатьох точках на поверхні сканування, визначаються місця з відшаруванням і будується карта адгезійної міцності.

На рис. 2 приведено зразок (зліва) та типові приклади зареєстрованих сигналів при імпульсному зондуванні плоскопаралельного виробу прямим роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем, зареєстровані в декількох точках на поверхні зразка.

Слід відмітити, що в часовій реалізації А-скану, зареєстрованій прямим роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем, можна виділити кілька ділянок, а саме: зондуєчий імпульс; імпульс, відбитий від границі призма-метал; перший донний відбитий імпульс, другий донний відбитий імпульс, а також ділянку між зондуєчим імпульсом та імпульсом, відбитим від границі призма-метал, та інформативну частину для оцінювання ступеня адгезії – зворотньо-розсіяний сигнал – ділянку між імпульсом, відбитим від границі призма-метал, і першим донним відбитим імпульсом. На рис. 2 цій ділянці відповідає часовий проміжок від моменту часу US Enter до моменту Bottom Signal, тобто сигнал в межах цього проміжку є зворотньо-розсіяним і несе інформацію для оцінювання ступеня адгезії в даній точці реєстрації.

На рис. 2 приведено чотири реалізації сигналів, які є частинами А-сканів, зареєстрованих в різних точках на поверхні зразка, і містять зворот-

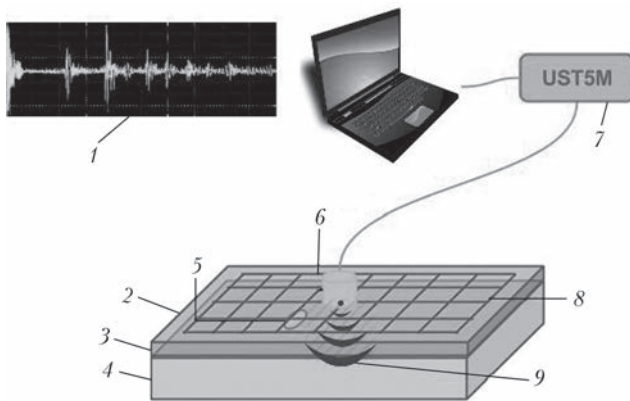


Рис. 1. Схема реєстрації зворотньо-розсіяного сигналу: 1 – А-скан; 2 – газотермічне покриття; 3 – адгезійне покриття; 4 – підкладка; 5 – відшарування; 6 – УЗ-перетворювач; 7 – УЗКТ UST5M; 8 – сітка сканування; 9 – поширення УЗ хвилі

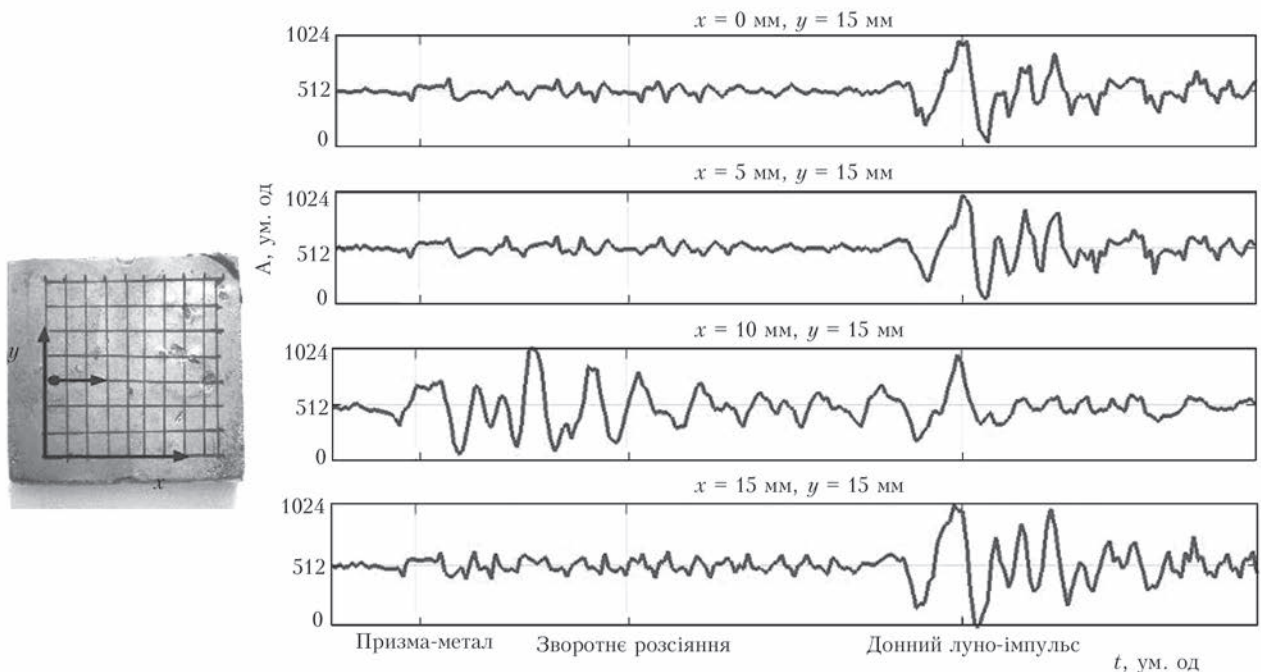


Рис. 2. Типові приклади зареєстрованих сигналів



ньо-розсіяний сигнал та донний відбитий сигнал. Як бачимо, реалізація, зареєстрована в положенні ($x = 10$ мм, $y = 15$ мм), якісно відрізняється від інших трьох. Як виявилось (в результаті обробки зареєстрованих сигналів), це положення відповідає місцю відшарування.

На рис. 3 приведено найпростіші моделі об'єкта з покриттям та типові реалізації зворотньо-розсіяного сигналу у випадку наявності відшарування (зліва) та при добрій адгезії (справа).

Основною проблемою УЗ контролю є вплив акустичного контакту. Для врахування впливу акустичного контакту і забезпечення співстави-

мости реалізацій, зареєстрованих в різних точках поверхні, проводиться нормування інтенсивності зареєстрованого сигналу.

Обчислюється дисперсія пронормованої інформативної частини сигналу. Будується гістограма дисперсій за результатами зареєстрованих сигналів в багатьох точках поверхні сканування. Експерименти засвідчили, що при відсутності відшарувань гістограма має вигляд релівського розподілу. Знаходиться границя зміни дисперсій (реперне значення) для випадку, коли відшарувань немає. Експерименти засвідчили, що у випадку наявності відшарування значення дисперсії сигналу в рази перевищує це реперне значення, тобто дисперсію, коли відшарування немає. Таким чином визначаються місця наявності відшарувань.

Картографування адгезійної міцності. Проводиться розбиття поверхні сканування на елементарні ділянки. Розміри елементарної ділянки вибирають, виходячи з кроку сканування, апріорних даних про розміри відшарувань, необхідної роздільної здатності. Обчислюється площа кожної елементарної ділянки S та площа відшарувань T в межах цієї ділянки. За формулою (1) обчислюється адгезійна міцність для цієї ділянки. Будується карта адгезійної міцності $C(x, y)$.

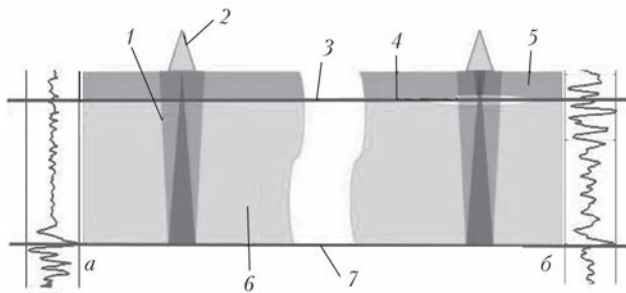


Рис. 3. Модель об'єкта з покриттям при наявності відшарування (а) та при добрій адгезії (б): 1 – поширення хвилі; 2 – УЗ-перетворювач; 3 – адгезійне покриття; 4 – відшарування; 5 – газотермічне покриття; 6 – підкладка; 7 – внутрішня поверхня

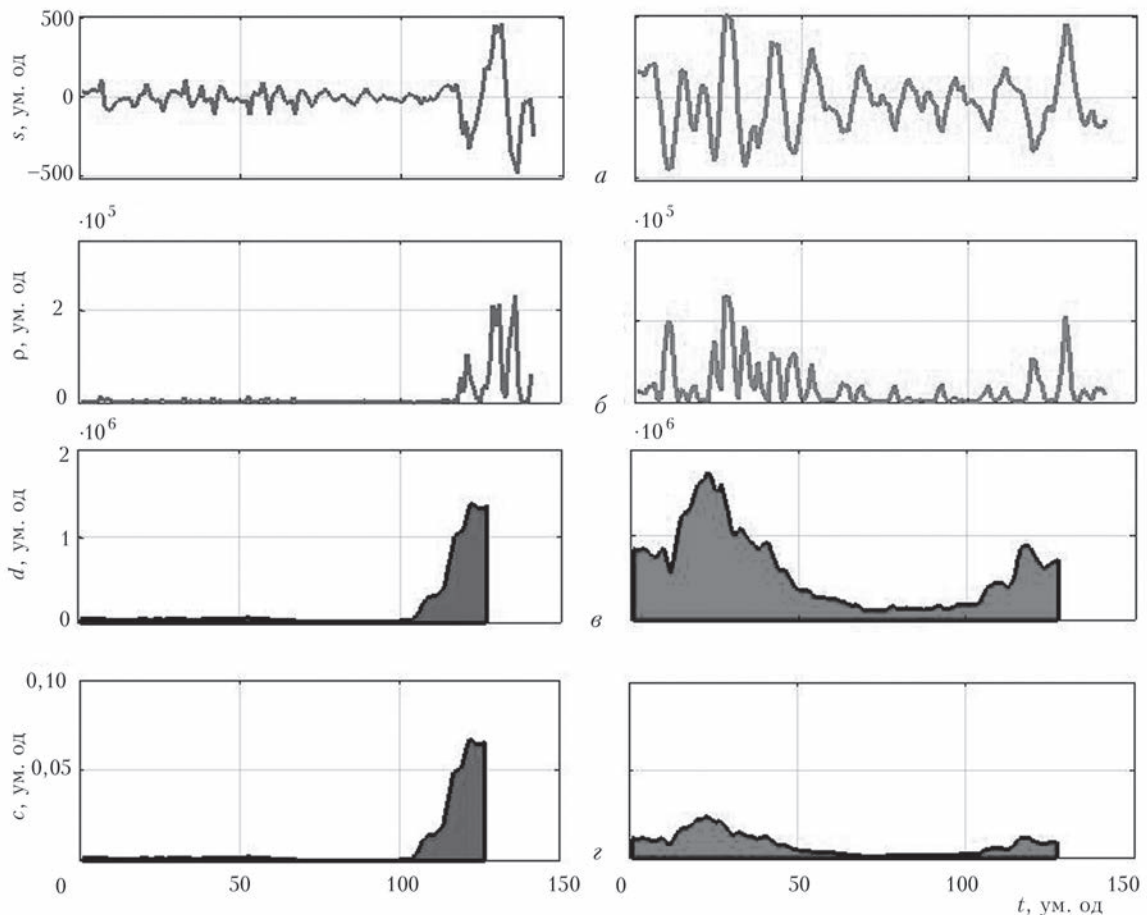


Рис. 4. Обробка зворотньо-розсіяного сигналу (зліва – без відшарування, справа – з відшаруванням)



Інформаційна технологія обробки зворотньо-розсіяного УЗ сигналу. УЗ технологія картографування адгезійної міцності полягає в наступному.

Проводиться розбиття поверхні об'єкта контролю на сітку – елементарні пікселі (рис. 2, зліва).

Проводиться покрокове сканування поверхні об'єкта контролю та УЗ імпульсне зондування повздовжніми УЗ хвилями прямим роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем.

На кожному кроці сканування проводиться реєстрація часової реалізації зворотньо-розсіяного УЗ сигналу у вигляді А-скану.

Інформаційна технологія обробки часової реалізації зареєстрованого УЗ сигналу у вигляді дискретних відліків А-скану полягає в наступному (рис. 4).

1. Нехай в точці сканування (x, y) зареєстрована реалізація $s(x, y) = \{s(n; x, y), n = 1, \dots, N\}$ $s(n; x, y)$ – n -й відлік, N – загальна кількість відліків).

Інформативною частиною сигналу про стан матеріалу по товщині є ділянка сигналу від кінця імпульсу, відбитого від границі призма–метал, до початку першого донного відбитого сигналу (рис. 4, а).

2. Виділяємо інформативну частину сигналу $s_i(x, y) = \{s(n; x, y), n = N_1, \dots, N_2\}$ (N_1 – номер відліку кінця імпульсу, відбитого від границі призма–метал, N_2 – номер відліку початку першого донного відбитого сигналу). Отримуємо реалізацію інтенсивності

$$p(x, y) = \{p(n; x, y) = s^2(n; x, y), n = N_1, \dots, N_2\}.$$

Реалізація інтенсивності – шумоподібний RF-сигнал (рис. 4, б).

3. Проводимо детектування інтенсивності шляхом усереднення в біжучому вікні тривалістю одного періода несучої

$$d(x, y) = \left\{ d(n; x, y) = \frac{1}{2\Delta} \sum_{k=n-\Delta+1}^{n+\Delta} s^2(k; x, y), \right. \\ \left. n = N_1, \dots, N_2 + \Delta_{imp} \right\},$$

де $\Delta = \text{Int}(F/f)$; f – частота зонduючого сигналу; F – частота дискретизації; Δ_{imp} – тривалість зонduючого імпульсу (кілька періодів несучої), яка визначається на основі відбитого донного сигналу (рис. 4, в).

Важливо відзначити два моменти цієї процедури з точки зору статистичної обробки шумоподібного сигналу.

По-перше, приведене детектування є обчисленням автокореляційної функції шумоподібного модульованого сигналу при нульовій затримці і є нормованою (усередненою по числу відліків) енергією сигналу [7].

По-друге, відомо, що при обчисленні автокореляції синусоїдальної функції на основі скінченного числа даних виникає похибка із-за скінченності числа даних. В цьому випадку для синусоїдального сигналу автокореляцію можна представити у вигляді двох складових: «правильної» автокореляції (як такої, що отримується на основі нескінченного числа даних) та «похибки», яка виникає через «урізання» даних [7]. Ця складова рівна нулю, коли інтервал, на основі якого обчислюється «урізана» автокореляція, співпадає або кратний періоду синусоїдального сигналу.

Таким чином, усереднення інтенсивності на періоді несучої забезпечує практично відсутність похибки автокореляції через «урізання» даних.

4. Обчислюємо енергію сигналу на проміжку

$$N_1 - \Delta_{imp} \div N_2 + \Delta_{imp} \quad E = \sum_{n=N_1-\Delta_{imp}}^{N_2+\Delta_{imp}} d(n; x, y) \text{ і нор-}$$

муємо кожний відлік інтенсивності до цієї величини

$$c(x, y) = \left\{ c(n; x, y) = \frac{d(n; x, y)}{E}, n = N_1, \dots, N_2 \right\}.$$

В результаті такого нормування отримуємо реалізацію інтенсивності зворотньо-розсіяного сигналу, яка має одиничну енергію на проміжку нормування з врахуванням енергії відбитого донного сигналу (рис. 4, з).

За допомогою цієї процедури позбавляємось впливу контакту та підсилення приймального тракту.

5. Враховуємо вплив загасання сигналу по шляху зондування внаслідок розсіювання:

$$r(x, y) = \left\{ r(n; x, y) = \frac{c(n; x, y)}{1 - \sum_{i=N_1}^{N_1+n-1} c(i; x, y)}, \right.$$

$$\left. n = N_1, \dots, N_2 \right\}.$$

В результаті отримуємо профіль перерізу зворотнього розсіювання вздовж шляху поширення зонduючого сигналу.

6. Обчислюємо дисперсію зворотньо-розсіяного сигналу (усередненого на проміжку $[N_1, N_2]$ значення інтенсивності):

$$D(x, y) = \sum_{n=N_1}^{N_2} \frac{1}{N_2 - N_1 + 1} r(n; x, y). \quad (3)$$

У випадку багат шарового покриття усереднення (3) проводиться на проміжку, який відповідає стику шарів по товщині.

Далі проводиться сканування досліджуваної області покриття і обчислюється дисперсія $D(x, y)$ (п.п. 1–6) в кожній точці сканування. В місцях, де адгезія відсутня і є відшарування, дисперсія зростає.



Будується гістограма розподілу дисперсії $D(x, y)$ для контрольованого об'єкта для визначення, чи є на контрольованій поверхні місця з відшаруваннями. У випадку, коли адгезія покриття по контрольованій поверхні добра і немає відшарувань, спостерігається розподіл дисперсії $D(x, y)$, подібний до релеївського. Причому значення дисперсії обмежені величиною D_{\max} . Це реперне значення визначається, в першу чергу, різницею імпедансів покриття і підкладки (основи), а також рівнем структурних завод. При наявності відшарувань появляються значення дисперсії, які в рази перевищують D_{\max} . На скільки дисперсія, яка відповідає відшаруванню, перевищує дисперсію від кондиції, залежить від співвідношення відповідних імпедансів, структурних завод тощо. Таким чином, на основі гістограми дисперсій по факту наявності значень дисперсій, які віддалені від розподілу дисперсій, подібного до релеївського, судять про наявність відшарувань.

У випадку, коли є еталонний зразок з покриттям без відшарувань, знаходимо граничне значення дисперсії D_0 , яке розділятиме область кондиції від області з відшаруванням. Для цього будемо гістограму розподілу дисперсій і знаходимо значення D_{\max} . За D_0 приймаємо $D_0 = D_{\max} + \Delta$, де Δ визначається структурними шумами і параметрами розподілу. Про наявність відшарування буде свідчити нерівність $D(x, y) > D_0$.

Будується поверхня залежності дисперсії від координат $D(x, y)$, яка відповідає поверхні сканування, для виявлення місць відшарування, обчислення їх площ і подальшого оцінювання адгезійної міцності. Місцям з пониженою адгезією (відшаруваннями) будуть відповідати підвищені рівні дисперсії. На основі побудованої поверхні $D(x, y)$ визначаємо місця відшарувань $A_1(x_1, y_1)$, $A_2(x_2, y_2)$, ... і обчислюємо їх площі $t_1(x_1, y_1)$, $t_2(x_2, y_2)$, ... У випадку, коли в розглядуваній області покриття S площа відшарувань складає T і її можна обчислити, як суму $t_1(x_1, y_1)$, коли (x_1, y_1) належать S , то адгезійна міцність для даної області покриття становитиме $C = C_0(S - T)/S$.

Будується поверхня залежності адгезійної міцності від координат, яка відповідає поверхні сканування, для досліджуваного об'єкта наступним чином. Спочатку проводимо розбиття поверхні сканування на елементарні ділянки. За поверхнею $D(x, y)$ знаходимо просторовий розподіл відшарувань для кожної елементарної ділянки розбиття. Обчислюємо площі цих відшарувань в кожній елементарній ділянці $T(x, y)$ як суму $t_1(x_1, y_1)$, коли (x_1, y_1) належать цій елементарній ділянці. Далі отримуємо просторовий розподіл адгезійної міцності $C(x, y) = C_0(S - T(x, y))/S$. Тут S – площа елементарної ділянки. Розміри елементарної ділянки вибираються, виходячи з необхідної роздільної

здатності для $C(x, y)$, кроку сканування, апіорних даних про розміри відшарувань і просторовий розподіл адгезійної міцності.

Експериментальні дослідження. Для перевірки правомірності використання зворотньо-розсіяного УЗ сигналу та алгоритму його обробки для визначення просторового розподілу адгезійної міцності виготовлені зразки зі сталі та алюмінію (50 мм×50 мм×8 мм) з електродуговим покриттям. Газотермічне покриття товщиною ~1,2 мм наносили на підготовлену поверхню (50 мм×50 мм) шляхом дробоструминної обробки. Причому на поверхні основи окремі ділянки (1 мм×1 мм) не обробляли. На необроблених ділянках адгезія покриття менша, ніж на поверхні, яка оброблена. Після напилення поверхню покриття обробляли механічно для підготовки до УЗ експериментів.

Проведені експерименти: сканування поверхні зразка з газотермічним покриттям прямим роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем П112-10-6/2-Т-003 (частота 10 МГц) з кроком 5 мм, реєстрація та обробка зворотньо-розсіяного сигналу в області сканування, побудова гістограми дисперсії, визначення наявності відшарувань за гістограмою, побудова просторового розподілу дисперсії, який відображає розміщення відшарувань.

На рис. 5 приведені результати експериментальних досліджень для двох зразків зі сталі із покриттям (один зразок з відшаруваннями, інший – без відшарувань): гістограми дисперсій та просторовий розподіл дисперсій, який відображає розміщення відшарувань.

Експерименти засвідчили, що для зразка з газотермічним покриттям без відшарувань гістограма дисперсій інформативних частин зворотньо розсіяних сигналів подібна до релеївського розподілу і знаходиться в межах до 0,018 ум.од. (рис. 5, а). Як показують експерименти, для зразка з відшаруваннями переважна частина результатів вимірювань відноситься до таких, для яких дисперсія знаходиться в межах, як і для зразка без відшарувань. Однак, як видно з рис. 5, б, окремим вимірюванням характерні дисперсії в межах [0,2...0,3] ум.од., а також в околі 0,6 ум.од. Ці місця інтерпретуються як такі, що є відшарування. Знайшовши відношення площ відшарувань до площі сканування та провівши «тарування» до відомої адгезійної міцності покриття без відшарування, отримуємо адгезійну міцність покриття для досліджуваного зразка.

Аналогічні експериментальні дослідження проведені для зразків з алюмінію з газотермічним покриттям (рис. 6).

Для зразка з алюмінію з газотермічним покриттям без відшарувань дисперсія інформативних частин зворотньо-розсіяних сигналів знаходилась

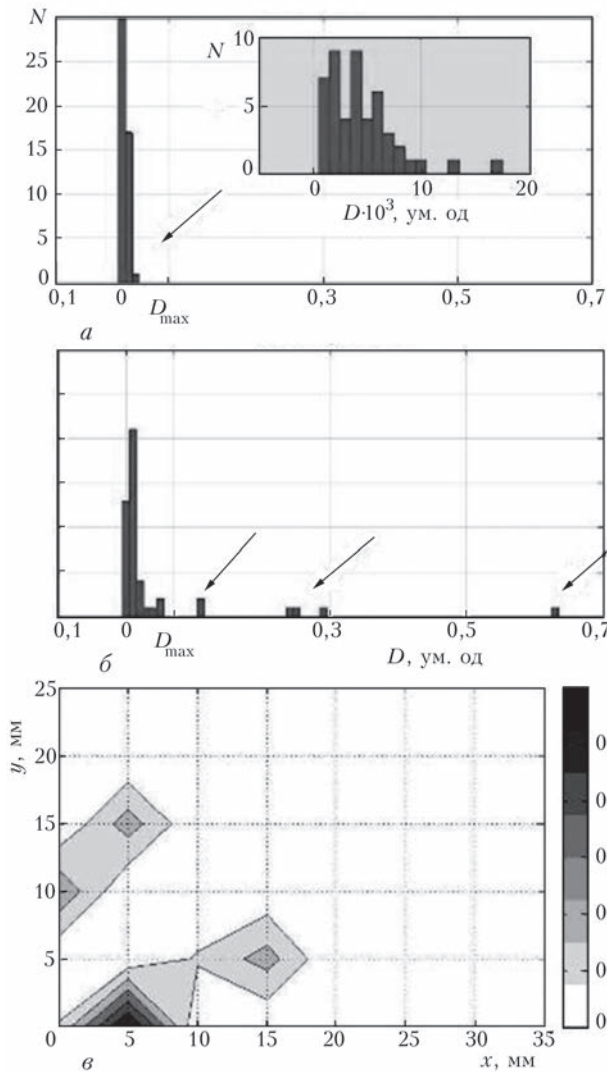


Рис. 5. Гістограма дисперсій (а, б), карта відшарувань (в) для зразків зі сталі з газотермічним покриттям (кількість вимірювань $N = 48$)

в межах до 0,24 ум.од. (рис. 6, а). Якщо порівняти зі сталлю, то таке зростання дисперсії може бути обумовлене різними імпедансами покриття зі сталі – підкладка зі сталі та покриття зі сталі – підкладка з алюмінію. Для алюмінієвого зразка з покриттям з відшаруваннями в окремих місцях дисперсія становила (0,6...0,8) ум.од., а також (1,2...1,3) ум. од. (рис. 6, б). За результатами експериментів побудована карта відшарувань (рис. 6, в).

Висновки

Розроблено неруйнівний УЗ метод картографування адгезійної міцності газотермічного покриття. Метод полягає в наступному: проводять сканування поверхні об'єкта з покриттям прямим роздільно суміщеним п'єзоперетворювачем, ультразвукове зондування повздовжньою хвилею, реєстрацію та статистичну обробку зворотньо-розсіяного УЗ сигналу. За інформативний параметр про якість адгезії в «точці» реєстрації зворотньо-розсіяного сигналу прийнято дисперсію сигналу.

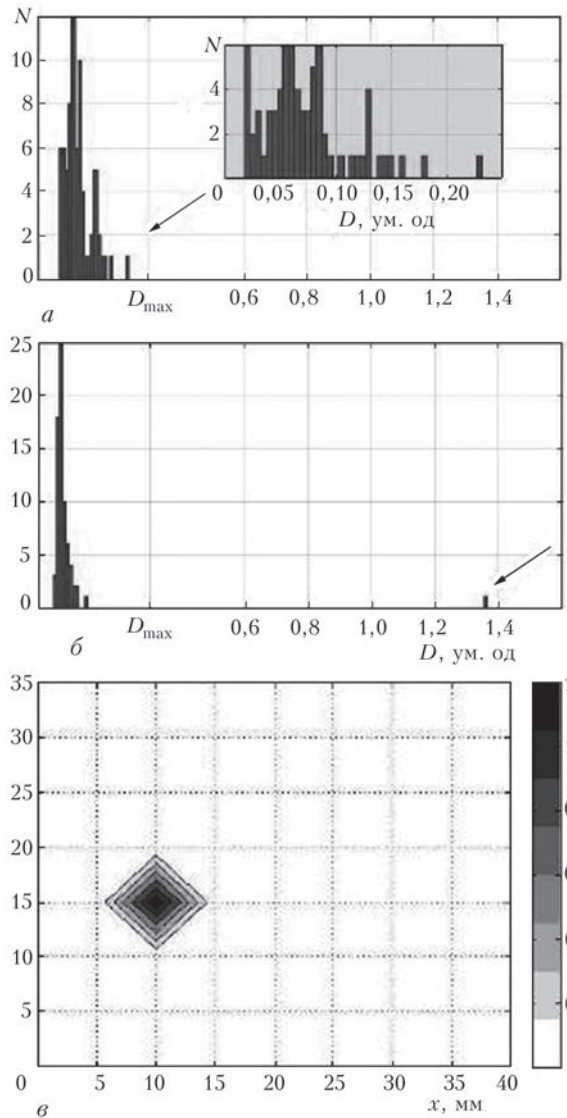


Рис. 6. Гістограма дисперсій (а, б), карта відшарувань (в) для зразків з алюмінію з газотермічним покриттям ($N = 72$)

Експериментально отримано, що при відсутності відшарувань покриття від основи гістограма дисперсій, обчислених в різних «точках» сканування, подібна до релієвського розподілу. Дисперсії не перевищують певного граничного значення. В місцях з відшаруванням дисперсія в рази перевищує це граничне значення. Будують карту просторового розподілу дисперсій поверхні сканування, яка відображає розміщення відшарувань. Цю карту тарують до адгезійної міцності. В результаті отримують карту адгезійної міцності покриття. Наведені результати експериментальної апробації на зразках з газотермічним покриттям.

- ГОСТ15140–78. Методы определения адгезии. – М.: Издво стандартов, 2001. – 13 с.
- Пат. RU 2084868 Способ определения адгезии газотермического покрытия / А.Б. Коберниченко, Е.Н. Моос. – Оpubл. 20.07.1997.
- Rokhlin S. I., Marom D. Study of adhesive bonds using low-frequency obliquely incident ultrasonic waves // J. Acoust. Soc. Am. – 1986. – 80 (2), August.
- <http://www.studfiles.ru/preview/1199877/page/2/>



5. *Goglio L., Rossetto M.* Ultrasonic testing of adhesive bonds of thin metal sheets // *NDT&E International*. – 1999. – 32. – P. 323–331.
6. *Неразрушающий контроль: В 5 кн. Кн. 2. Акустические методы контроля: Практ. пособие / Под ред. В.В.Сухору-*

кова // И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов. – М.: Высш. шк., 1991. – 283с.

7. <http://www.williamspublishing.com/PDF/5-8459-0710-1/part.pdf>

A non-destructive method of determination of adhesion strength of thermally-sprayed coating on the surface of a thick-walled item on the basis of recording the back-scattered US signal in the form of an A-scan was proposed. Physical principles of the method, ultrasonic technology for its realization and results of experimental verification for samples with thermally-sprayed coating are presented. 7 References, 6 Figures.

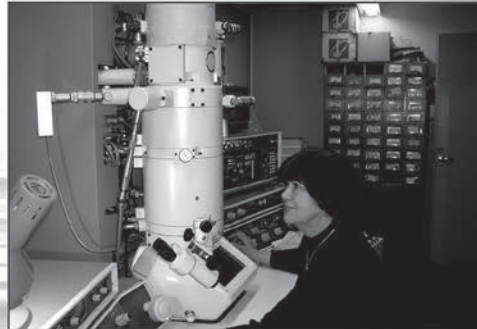
Keywords: adhesion; US back-scattered signal; statistical processing; histogram

*Надійшла до редакції
17.07.2015*

ЦЕНТР ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАТЕРИАЛОВ

Центр физико-химических исследований материалов Института электросварки им. Е. О. Патона НАНУ оснащен уникальным комплексом аналитического и исследовательского оборудования ведущих фирм Японии, США, Западной Европы и является единственным в Украине. В центре работают высококвалифицированные специалисты, многие из которых прошли стажировку в научно-исследовательских центрах ведущих европейских стран и США.

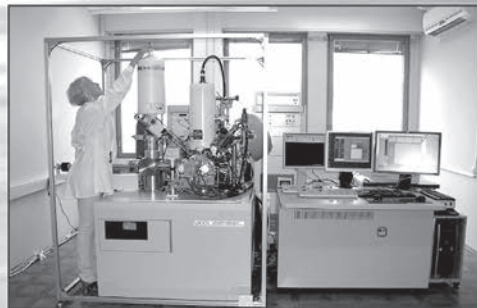
В центре занимаются аналитическими, материаловедческими, физико-химическими исследованиями пирометаллургических процессов, а также фундаментальными исследованиями физических и металлургических процессов сварки и родственных технологий, выяснением причин и механизмов разрушения конструкций и сварных соединений.



Просвечивающий электронный микроскоп JEM-200-CX (фирма «JEOL», Япония) позволяет получить представление о структурно-фазовом состоянии материала



ICP-спектрометр ICAP6500 DUO (фирма «Thermo Fisher Scientific», США) позволяет анализировать атомарный состав различных материалов



Оже-микросонд с полевым эмиссионным катодом JAMP-9500F (JEOL Ltd, Япония), укомплектованный энергодисперсионным спектрометром OXFORD EDS INCA Energy 350 для анализа элементов от бериллия до урана.



Автоматизированная динамическая система для моделирования (имитации) термомеханического состояния металлов GLEEBLE-3800 фирмы DSI (USA).



Анализаторы газов RO-316, RH-2 (фирма «LECO», США) предназначены для определения содержания кислорода, азота и водорода в металлах