

ВПЛИВ ОПРОМІНЕННЯ, УЛЬТРАЗВУКУ, ЗМІНИ ДЕФЕКТНОЇ НАНОСТРУКТУРИ НА РЕЛАКСАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ ТА АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА АНАЛІЗУ АКУСТИЧНОЇ АНІЗОТРОПІЇ

А. П. ОНАНКО, В. О. АНДРУЩЕНКО, Г. Т. ПРОДАЙВОДА, Ю. А. ОНАНКО

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Київ, Україна
onanko@univ.kiev.ua*

Наявність залежності між інтенсивністю опромінення та обумовленого ним значенням механічного напруження надає можливість використовувати методи вимірів змін внутрішнього напруження для визначення діючої інтенсивності опромінення на зразок. Запропоновано спосіб визначення дози поглинутої радіації, якій базується на використанні реєстрації радіаційної стимульованої зміни внутрішнього залишкового механічного напруження за допомогою тестувальної лунки з голографічною інтерферометрією. Використовується автоматизована система чисельного аналізу даних вимірювань параметрів акустичної анізотропії ультразвукових швидкостей.

ВСТУП

Під впливом радіаційного опромінення в металах та їх сплавах виникають структурні дефекти. Поява великої кількості радіаційних структурних дефектів приводить до суттєвої зміни сплавами фізичних властивостей. Під дією радіаційного опромінення при його поглинанні відбувається радіаційне зміцнення, пришвидшена дифузія, радіаційно обумовлені фазово-структурні перетворення, радіаційне розпушення. Явища радіаційно обумовленого впливу особливо помітні у випадку гетерогенних сплавів, коли кожна з складових фаз змінюється під дією опромінення незалежним чином [1].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Найбільш розповсюджені методи виміру поглинутих доз опромінення побудовані на використанні газорозрядних або сцинтиляційних лічильників, іонізаційних камер, люмінесцентних, напівпровідникових чи фотографічних детекторів [2, 3]. Недоліком всіх способів є те, що вони інформують про певну ефективну поглинуту дозу, яка не враховує особливості взаємодії високоенергетичних частинок з конкретним металом. Цих недоліків позбавлений запропонований спосіб визначення дози поглинутої радіації в металах та їх сплавах, якій базується на використанні реєстрації радіаційної стимульованої зміни внутрішнього залишкового механічного напруження σ_i .

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Ефективна фазова швидкість поширення пружної хвилі v^* в процесі експерименту обчислювалася за формулою:

$$v^* = \frac{l_0}{(t - t_0)}, \quad (1)$$

де l_0 - довжина зразка; t_0 - час поширення УЗ хвилі в затримках; t - час поширення УЗ хвилі при наявності між затримками зразка [4-6]. На рис. 1 наведена осцилограма сигналу в мілкозернистому пісковнику.

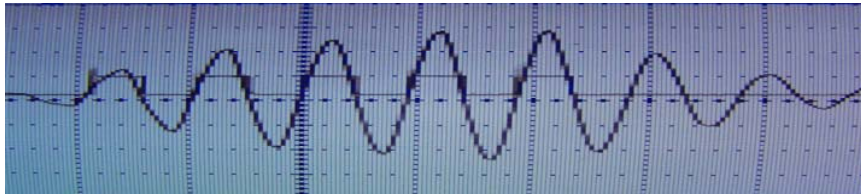


Рис. 1. Осцилограма сигналу в мілкозернистому пісковнику з блоку перетворювача.

Загальний вигляд установки КЕРН-СГ приведений на рис. 2. Вона складається із синхрогенератора, блока управління, зондуючого генератора, вимірювальної лінії, підсилювача, осцилографа і частотоміра. Блок управління містить схему виділення парних імпульсів, які слідують із тактовою частотою, що задається тактовим генератором, схему формування еталонних і вимірювальних імпульсів і схему синхронізації розгортки осцилографа. Діапазон частот $f = 0,3 \div 5$ МГц.



Рис. 2. Ультразвукова установка КЕРН-СГ для вимірювання швидкостей V пружних хвиль.

Час розповсюдження імпульсу в зразку з заданими розмірами визначається шляхом введення в схему приладу другого каналу, де УЗ розповсюджується в середовищі з відомим значенням швидкості ультразвуку. Процес вимірювання полягає у суміщенні імпульсів на екрані осцилографа зі зразком без зразка. За різницею шляху у рідині визначається швидкість звуку у зразку. Тоді t визначається з двох вимірів – без зразка і з зразком. При цьому імпульси обох каналів суміщаються на екрані двохканального осцилографа модернізованої установки УЗВШ-КНУ на рис. 3, а в другому каналі шлях УЗ може змінюватись.



Рис. 3. Модернізована установка УЗВШ-КНУ. 1 – зразок, 2 – затримки, 3 – генератор, 4 – приймач, 5 – двохканальний осцилограф.

У ультразвуковому вимірювачі швидкості УЗВШ-КНУ, що працює на частотах $f_1 \approx 1,67$ МГц і $f_2 \approx 5$ МГц, забезпечувалась точність вимірювань $\frac{\Delta V}{V} = 0,5 \div 1,5\%$ [7].

РЕЗУЛЬТАТИ

До радіаційного опромінення в зразку існує механічне напруження σ_1 . Значення $\sigma_1 = E\varepsilon$ по закону Гука пов'язане з відносним зміщенням $\varepsilon = \frac{\Delta a_1}{a}$ атомів решітці зразка з їхнього рівноважного положення [5]:

$$\frac{\Delta a_1}{a} = \frac{\sigma_1}{E_1}. \quad (2)$$

де a - стала решітці при відсутності механічного напруження, Δa_1 – зміна величини сталої решітці під дією механічного напруження σ_1 , E_1 – модуль пружності зразка до опромінення.

Під час поглинання радіаційного опромінення в кристалічній структурі металевого зразка утворюються дефекти, які приводять до зміни сталої решітці, що була до опромінення, а значить і до зміни величини початкового напруження – від σ_1 до σ_2 . Зміна величини напруження під дією поглинутої дози опромінення пов'язана із зміною величини сталої решітці. У цьому випадку відхилення від рівноважної величини сталої решітці стає рівним Δa_2 . Тоді буде виконуватись співвідношення, аналогічне (2),:

$$\frac{\Delta a_2}{a} = \frac{\sigma_2}{E_2}, \quad (3)$$

де E_2 - модуль пружності зразка після опромінення. Різниця $|\Delta a_2 - \Delta a_1|$ залежить [1] від значення поглинутої дози D :

$$\left| \frac{\Delta a_2}{a} - \frac{\Delta a_1}{a} \right| = \gamma \cdot D, \quad (4)$$

де γ - стала радіаційного деформування решітці зразка, що залежить від хімічного складу металу. З співвідношень (2)- (4) випливає вираз:

$$\left| \frac{\sigma_2}{E_2} - \frac{\sigma_1}{E_1} \right| = \gamma \cdot D. \quad (5)$$

Відомий метод визначення σ в металах при використанні методу зондових лунок [8]. Параметри лунок: їх діаметр d , глибина H вибираються таким чином, щоб висвердлювання лунок в зразку з металу не впливало на його експлуатаційні властивості. При наявності внутрішнього напруження в зоні розташування лунки безпосередньо на її кромці виникає бруствер, висота якого h пропорційна величині σ . Тобто, має виконуватися співвідношення [8]:

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot h, \quad (6)$$

де $\alpha(d,H)$ - відомий розмірний коефіцієнт пропорційності, залежний від d та H . Позначимо висоту брустверу до (після) опромінення h_1 (h_2). Тоді внутрішні механічні напруження σ_1 , σ_2 до і після опромінення відповідно можна представити у вигляді:

$$\sigma_1 = \alpha \cdot E_1 \cdot h_1 \quad (7)$$

$$\sigma_2 = \alpha \cdot E_2 \cdot h_2. \quad (8)$$

З формул (5), (6), (7), (8) випливає співвідношення:

$$D = |h_2 - h_1| \cdot \frac{\alpha}{\gamma} = \frac{|\Delta h| \cdot \alpha}{\gamma}, \quad (9)$$

де $\Delta h = h_2 - h_1$. Вираз (9) є базовим для запропонованого методу виміру поглинутої дози радіаційного опромінення.

Згідно літературним даним [1] відносна зміна сталої решітці $\frac{\Delta a}{a}$ Си є прямо пропорційною величині інтенсивності опромінення $I = k_1 \frac{\Delta a}{a}$, що обумовлюється опосередкованим впливом радіаційно стимульованих структурних дефектів на кристалічну будову решітці. Відомий також зв'язок між величиною $\frac{\Delta a}{a}$ та значенням внутрішнього напруження σ в металах $\sigma = k_2 \frac{\Delta a}{a}$, який використовується при рентгенографічному методі визначення механічного напруження в речовинах [5]. Таким чином, існує зв'язок між інтенсивністю опромінення металу I та обумовленого ним значенням механічного напруження в ньому $I = k_3 \sigma$. Наявність такої залежності надає можливість використовувати методи вимірів змін внутрішнього напруження σ в металах для визначення діючої інтенсивності опромінення I на конкретний зразок, чи зв'язаною з нею величиною поглинутої дози. Для конкретної реалізації цього способу було використано неруйнівний метод, що базується на методі голографічної інтерферометрії при використанні тестувальної лунки [9]. У випадку тестувальної лунки радіусом R у зразку товщиною d величина висоти $h(x, y)$ для довільної точки поверхні тіла з координатами (x, y) залежить від різниці головних напруг ($\sigma_1 - \sigma_2$) і визначається у кожній точки отвору (x, y) відповідно формули:

$$h(x, y) = \frac{\mu(\sigma_1 - \sigma_2)(x^2 - y^2)}{ER^2d(x^2 + y^2)^2} = \frac{(\frac{1}{2}V_{\uparrow}^2 - V_{\leftrightarrow}^2)}{(V_{\uparrow}^2 - V_{\leftrightarrow}^2)} \times \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)(x^2 - y^2)}{\rho V_{\uparrow}^2 R^2 d(x^2 + y^2)^2}, \quad (10)$$

де V_{\uparrow} - швидкість повздовжніх ультразвукових хвиль, V_{\leftrightarrow} - швидкість поперечних ультразвукових хвиль, ρ - густина матеріалу зразку, $E = \rho V_{\uparrow}^2$ - модуль пружності

матеріалу зразку, $\mu = \frac{(\frac{1}{2}V_{\uparrow}^2 - V_{\leftrightarrow}^2)}{(V_{\uparrow}^2 - V_{\leftrightarrow}^2)}$ - коефіцієнт Пуассона. Після опромінення

спостерігається зменшення величин швидкості повздовжніх ультразвукових хвиль V_{\uparrow} , швидкості поперечних ультразвукових хвиль V_{\leftrightarrow} , модуля пружності матеріалу зразку $E = \rho V_{\uparrow}^2$ [5].

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

Запропонований спосіб визначення поглинутої дози D, яка обумовила остаточні напруження σ за допомогою тестувальної лунки з голографічною інтерферометрію

зображено на рис. 4. В зразок довжиною l_0 (1) за допомогою п'єзоелектричного перетворювача - п'єзокварцу (2) надсилається короткий УЗ імпульс тривалістю τ і частотою f з генератора змінних напруг (3), пройшовши через зразок за час $T = \frac{l_0}{V}$ і другий п'єзокварц (2) на протилежній стороні зразка на рис. 4 пружна хвиля приймається приймачем (4), і потім сигнали подаються на двохканальний осцилограф (5).

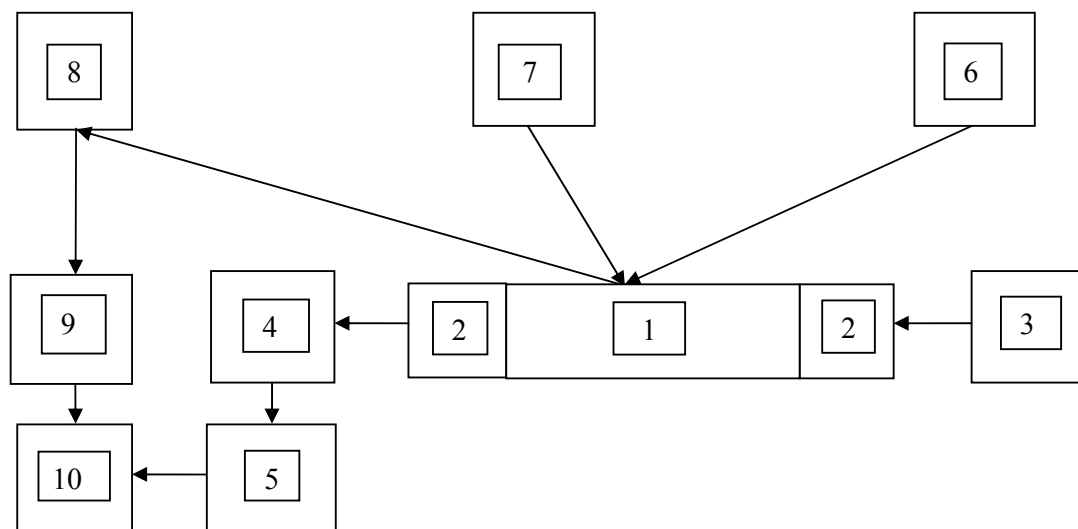


Рис. 4. Блок-схема установки. 1 – зразок, 2 – п'єзокварци (датчики УЗВШ), 3 – генератор змінних напруг, 4 - приймач, 5 – двохканальний осцилограф, 6 – свердлильний прилад, 7 – лазер, 8 – система ділення променів з двох напівпрозорих дзеркал і матового скла - оптичний блок поділу променя лазера і формування шляху вторинних оптичних променів та зміни оптичної довжини шляху на половину довжини хвилі лазера, 9 – відеокамера, 10 – комп'ютер з програмою розшифровки інтерферограм, що визначає висоту брустверу на кромці висвердленої лунки.

Після опромінення за час першої експозиції записується голограма кола майбутній лунки на поверхні опроміненого зразка (1). Потім спотворюється збурення поверхні опроміненого зразка (1) шляхом висвердлювання малої лунки свердлильним приладом (6) з свердлом діаметром $D \approx 1$ мм на глибину $h \approx 0,5$ мм, що дозволяє проявитися остаточним напруженням $\bar{\sigma}$: виїмка малого об'єму зводить до локальних пружних зміщень ϵ , які пропорційні остаточним напруженням $\bar{\sigma} = E\epsilon$, де E – модуль пружності. Далі записується голограма збуреної таким чином поверхні зразка за допомогою проходження променя лазера (7) скрізь систему ділення променів з двох напівпрозорих дзеркал і матового скла (8), потім на відеокамеру (9), яка з'єднана з комп'ютером (10). За величиною зміни напружень $\sigma\left(\frac{\Delta a}{a}\right)$ при використанні значення модуля пружності E визначають відносну зміну сталої решітці $\frac{\Delta a}{a}$ і по відносній зміні сталої решітці за допомогою графіків зв'язку між сталою решітці і величиною поглинутої дози $D\left(\frac{\Delta a}{a}\right)$ опромінення, визначають поглинуту дозу $D(\sigma)$ за допомогою формули:

$$D = \frac{1}{\gamma} \frac{\sigma_1}{E_1 \cdot h_1} |\Delta h| = \frac{1}{\gamma} \frac{\sigma_1}{\rho V_{1\downarrow}^2 \cdot h_1} |\Delta h|, \quad (11)$$

де Δh – зміна висоти брустверу на краю лунки за час радіаційного опромінення зразка; h_1 – висота брустверу краю лунки у початковому стані до радіаційного опромінення зразка; σ_1 – остаточні напруження у початковому стані зразка; ρ – густина зразка; $V_{1\downarrow}$ – швидкість повздовжніх ультразвукових хвиль у початковому стані зразка; γ – стала радіаційного деформування решітці металу, залежна від будови металу.

ВИСНОВКИ

1. Запропонований спосіб визначення поглинутої дози D , яка обумовила остаточні напруження σ за допомогою тестувальної лунки з голографічною інтерферометрією.
2. Розроблено програма і алгоритм, які дозволяють у автоматизованому режимі проводити аналіз параметрів анізотропії пружних хвиль.

ЛІТЕРАТУРА

1. Томпсон М. Дефекты и радиационные повреждения в металлах. – Москва: Мир, 1971. – 368 с.
2. Селищев П. А. Самоорганизация в радиационной физике. – М: НИЦ Институт компьютерных исследований, 2008. – с. 208.
3. Иванов В. И. Курс дозиметрии. Для студентов вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 233 с.
4. Мэзон У. П. Пьезоэлектрические кристаллы и их применение в ультразвуку. – М.: Иностран. лит., 1952. – 447 с.
5. Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. – М.: Атомиздат. 1975. – 472 с.
6. Грінченко В. Т., Вовк І. В., Мацитура В. Т. Основи акустики. – Київ: Наукова думка, 2007. – 640 с.
7. Lyashenko O. V., Onanko A. P., Veleschuk V. P. et al. Structural defects relaxation during complex thermal and dynamical mechanic processing of CdTe // Photoelectronics. – 2008. – № 17. – С. 10-13.
8. Чернышев Г. Н., Попов А. Л., Козинцев В. М. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах, М.: Наука, 1996. – 240 с.
9. Бакулин В. Н., Рассоха А. А. Метод конечных элементов и голографическая интерферометрия в механике композитов. – М.: Машиностроение, 1987. – 312 с.