

ОЦІНКА ПОШКОДЖЕНОСТІ ФЕРИТНО-ПЕРЛІТНОЇ СТАЛІ ЗА ВЕЛИЧИНОЮ ЗМІНИ ШВИДКОСТІ ПОЗДОВЖНЬОЇ АКУСТИЧНОЇ ХВИЛІ

В. Р. СКАЛЬСЬКИЙ, О. М. МОКРИЙ

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: skalsky.v@gmail.com, mokomo@lviv.farlep.net

Отримано кількісну характеристику зміни швидкості поздовжньої акустичної хвилі та густини в феритно-перлітній сталі в результаті пластичної деформації. Показано можливість оцінювати величину пошкодженості, яка виникла внаслідок пластичної деформації, за зміною швидкості акустичної хвилі. На основі експериментальних даних встановлено кореляційну залежність між зміною швидкості та пошкодженості у вигляді полінома третього степеня. Бібліогр. 14, рис. 3.

Ключові слова: пластична деформація, пошкодженість, швидкість акустичної хвилі, густина

Розробка ефективних і неруйнівних методик оцінки стану металів в елементах конструкцій є актуальним завданням сучасності. Одним з важливих параметрів, який визначає ресурс металу, є його пошкодженість. Вона проявляється через зміну різних характеристик: пружних модулів, густини, твердості, механічних властивостей тощо [1, 2]. Одним із способів оцінювання пошкодженості є вимірювання швидкості ультразвукових хвиль в матеріалі [2, 3]. Фізична суть такого підходу неруйнівного контролю ґрунтується на залежності швидкості поширення акустичних хвиль від пружних модулів та густини, які є чутливими до пошкодженості. З іншого боку, ефективність використання зміни швидкості базується на існуванні високоточних методик її вимірювання.

Створення нових сучасних методів збудження та реєстрації ультразвукових хвиль, а також опрацювання отриманих електричних сигналів відкривають нові перспективи для застосування цього підходу. Одним з основних обмежуючих факторів використання вимірювання швидкості акустичних хвиль для діагностики стану металу є складність фізичної інтерпретації результатів вимірювань. Це зумовлено тим, що зміна стану металу неоднозначно впливає на величину швидкості, тобто по-різному зумовлює її зміну. Це створює різне інтерпретування експериментальних результатів.

Для вирішення цієї проблеми використовують два різних методичних підходи. Перший полягає в проведенні додаткових досліджень, які дають можливість оцінювати вклади різних факторів у зміну швидкості поширення хвиль у металі. За певних умов це може бути використання вимірювання швидкості різних типів пружних хвиль [3], проведення додаткових металографічних досліджень [4] або проведення вимірювань в умовах,

коли можна ігнорувати роль деяких несуттєвих чинників зміни швидкості [5]. Разом з тим, враховуючи складність процесів, що з часом відбуваються в металах, і їх просторову неоднорідність, такий підхід є достатньо трудомістким і не завжди можливим.

Інший підхід полягає у побудові калібрувальних залежностей для конкретних процесів, які проходять в металах за певних умов. В його основу покладено припущення, що співвідношення між різними фізичними чинниками, які вносять вклад у вимірювану величину, є однакові для конкретних умов протікання процесу зміни стану металу. В даному разі достатньо експериментально побудувати калібрувальні графіки залежності вимірюваної величини від параметра, який характеризує стан металу за певних умов. Прикладом такого підходу є використання сигналу акустичної емісії для діагностування об'ємної пошкодженості [1]. Також така методика є суттєво простішою і більш надійною за попередню, оскільки базується на експериментальних калібрувальних залежностях. В роботі розглянуто можливість використання даного підходу для визначення пошкодженості в пластично деформованій ферито-перлітній сталі за величиною зміни швидкості акустичних хвиль, які проходять через її об'єм.

Чинники, що впливають на зміну швидкості ультразвукових хвиль за пластичної деформації металів. Пластична деформація є складним явищем, за якого відбувається зміна властивостей деформованого металу. Вона призводить до зміни у ньому швидкостей різних типів ультразвукових хвиль. Причиною цього, як вже відзначалось вище, можуть бути різні явища, що відбуваються під час пластичного деформування. До основних чинників, які впливають на зміну швидкості за пластичного деформування металу, можна відне-

сти виникнення розривів суцільності (виникнення мікропор та мікротріщин), появу чи зміну текстури металу, виникнення залишкових механічних напружень [6–9].

Розглянемо послідовно вплив кожного з цих чинників. Мікропори виникають вже за невеликих ступенів пластичної деформації [10] в місцях, де локальні механічні напруження перевищують мікротісність. Відповідно виникає пошкодженість, яку можна визначити як [3]:

$$\theta = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0}, \quad (1)$$

де ρ – густина тіла з порами; ρ_0 – густина тіла без пор.

Величина швидкості ультразвукової хвилі залежить від модуля пружності та густини так [6, 11]:

$$V = \sqrt{\frac{C}{\rho}}, \quad (2)$$

де C – модуль пружності.

Поява мікропор впливає на зміну швидкості акустичної хвилі двома шляхами. З одного боку мікропори призводять до зменшення густини, а з іншого – до зменшення модуля пружності металів. Як випливає з формули (2), зменшення густини та пружного модуля в певній мірі компенсують одне одного, проте в підсумку швидкість все таки зменшується.

Іншим механізмом, що спричинює зміну акустичних властивостей металів і сплавів, є виникнення текстури. Вона полягає у переважній кристалографічній орієнтації зерен металу [12]. Проявляється текстура у анізотропії фізичних властивостей. Значення фізичних характеристик полікристалу є проміжним між максимальною та мінімальною їх величиною у відповідному монокристалі. За пластичної деформації виникає текстура під час повороту кристалографічних площин в результаті ковзання та двійникування [12]. Спочатку це відбувається в найбільш сприятливо орієнтованих площинах, а із збільшенням механічного напруження охоплює все більше їх число.

Ще одним чинником, згідно з яким змінюється швидкість акустичної хвилі, є виникнення залишкових механічних напружень. В основі цього чинника лежить акустопружний ефект, який полягає у зміні пружних модулів металу під дією механічних напружень. Величина зміни швидкості залежить тоді від відповідних акустопружних коефіцієнтів. Згідно з літературними даними [13] величина зміни швидкості становить долі відсотка за напружень у сотні МПа.

Таким чином, пластична деформація зумовлює складні процеси, які призводять до зміни швидкості проходження пружної хвилі у тілі. Важливим є визначення співвідношення між вкладами

різних фізичних чинників, які впливають на цей процес. Можна припустити, що для заданих умов деформування співвідношення між ними для конкретних металів будуть мати певні сталі закономірності. Тому важливою є побудова емпіричних залежностей, на основі яких можна визначити пошкодженість за величиною зміни швидкості проходження акустичної хвилі у пластично деформованому металі.

Модель зв'язку пошкодженості зі зміною швидкості акустичної хвилі. Пошкодженість впливає на зміну модуля пружності, яку можна записати так [10]:

$$C = C_0 - \Delta C_p = C_0(1 - \alpha\theta), \quad (3)$$

де C_0 – модуль пружності матеріалу, в якому нема пор; ΔC_p – зміна модуля пружності, спричинена пошкодженістю. Зміну модуля пружності, яку спричинено іншими механізмами, позначимо ΔC_r . Тоді:

$$\Delta C = \Delta C_p + \Delta C_r, \quad (4)$$

де ΔC – сумарна зміна пружного модуля у разі пластичного деформування.

У загальному випадку зв'язок між різними механізмами зміни пружного модуля може залежати від багатьох чинників і мати складний вигляд. Проте для конкретного режиму і умов пластичної деформації з певним наближенням цю залежність можна записати у вигляді ряду:

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \beta_1 \frac{\Delta C_p}{C_0} + \beta_2 \left(\frac{\Delta C_p}{C_0}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{\Delta C_p}{C_0}\right)^3, \quad (5)$$

де $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ – коефіцієнти розкладу.

З іншого боку вираз, який зв'язує зміну швидкості і зміну пружного модуля та густини, має вигляд:

$$V_0^2 - V^2 = \frac{C_0}{\rho_0} - \frac{C_0 - \Delta C}{\rho_0 - \Delta \rho}, \quad (6)$$

де $\Delta \rho$ – зміна густини за пластичної деформації. Вираз (6) із урахуванням (3)–(5) можна привести до вигляду:

$$2 \frac{\Delta V}{V_0} - \frac{\Delta V^2}{V_0^2} = \frac{(1 + \alpha - \alpha\beta_1)\theta - \alpha^2\beta_2\theta^2 + \alpha\beta_3\theta^3}{1 - \theta}, \quad (7)$$

де ΔV – зміна швидкості акустичної хвилі у разі пластичного деформування. Таким чином, вираз (7) дозволяє знайти зв'язок між зміною швидкості і пошкодженістю за пластичної деформації. Очевидно, що коефіцієнти $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ будуть залежати від умов, за яких відбувалось деформування.

Матеріали та методи досліджень. Досліджували пластично деформовані зразки з феритно-перлітної сталі. Для досліджень використовували призматичні зразки зі сталі 20 довжиною 280 мм і поперечним перерізом робочої частини 15×7 мм² (рис. 1). Визначали розподіл швидкості поши-

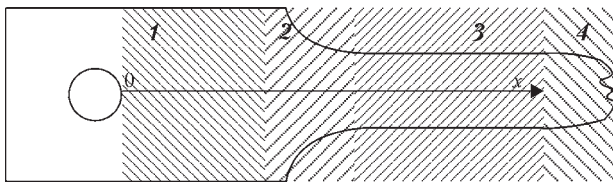


Рис. 1. Половина зразка після розриву

рення поздовжньої акустичної хвилі та густини вздовж осі зразка використовуючи для цього їх половини, що утворилися в результаті його розриву на машині УМЭ-10 ТМ. До розриву зразки термічно обробляли для зменшення залишкових механічних напружень. Термічна обробка полягала в нагріванні зразків до 500 °С і витримуванні при цій температурі протягом трьох годин з подальшим повільним охолодженням разом із пічкою.

Навантажували зразки розтягом із швидкістю 0,5 мм/хв до руйнування. Після руйнування кожну половинку зразка розрізали на частини довжиною 10 мм для вимірювання зміни густини. На цих самих частинах зразка проводили вимірювання швидкості пружних хвиль у напрямку, перпендикулярному до напрямку розтягу.

Вимірювання швидкості проходження ультразвукових хвиль. Швидкість ультразвукових хвиль вимірювали луно-імпульсним методом [14]. Вимірювали час проходження акустичного імпульсу по зразку за його багатократного відбивання від протилежних граней, а також розміри зразка в напрямку проходження акустичних імпульсів і на основі цих даних визначали швидкість ультразвукової хвилі. Для збудження та реєстрації ультразвукових імпульсів використовували п'єзоелектричний перетворювач з резонансною частотою 10 МГц. Тривалість акустичного імпульсу становила кілька мікросекунд. Визначали відносну зміну швидкості пружної хвилі $\Delta V/V$ в пластично деформованій ділянці матеріалу відносно швидкості в недеформованій частині. Похибка вимірювання швидкості становила 0,06 %.

Вимірювання густини. Для оцінки величини пошкодженості згідно (1) проводили вимірюван-

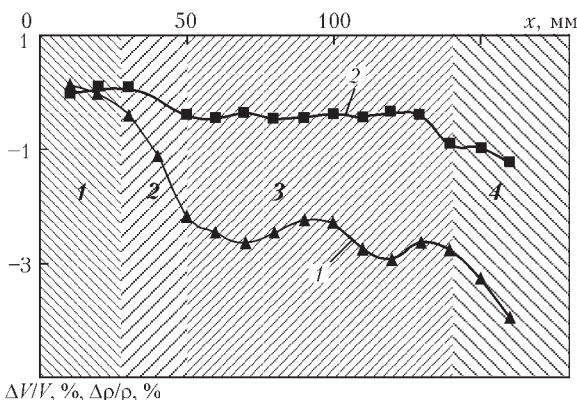


Рис. 2. Типові просторові залежності зміни швидкості проходження поздовжньої акустичної хвилі та густини для розірваних зразків: 1 – зміна швидкості; 2 – зміна густини

ня густини гідростатичним методом з допомогою лабораторних ваг RADWAG PS750. Маса досліджуваних кусочків матеріалу знаходилась в межах 10...11 г. Похибка вимірювання густини становила 0,05 %.

Інтерпретування отриманих результатів. Зображення половини вихідного зразка після розриву показано на рис. 1, а на рис. 2 приведені типові залежності розподілу зміни швидкості і густини за довжиною зразка. Координата x напрямлена вздовж прикладення зусилля розтягу і її початок знаходиться в точці 0 (рис. 1). Для аналізу змін властивостей зразків, які отримали внаслідок пластичної деформації, кожну половинку досліджуваного зразка можна умовно розбити на чотири ділянки, які мають спільні особливості. Розташування цих ділянок на рис. 1, 2 показано відповідним штрихуванням і цифрами. Першою є ділянка, в якій відсутня пластична деформація. Відповідно там нема зміни швидкості ультразвукової хвилі і густини, викликаної пластичною деформацією. Швидкість на цій частині і густину зразка використовували для порівняння її значення на інших ділянках. Друга ділянка знаходиться на початку робочої області зразка. В ній є перехід від широкої до вузької частини зразка, тобто до початку робочої ділянки, яка незначно пластично деформована і знаходиться в межах 30...50 мм. Різке зменшення перерізу зразка призводить до великих градієнтів механічних напружень під час його розтягу. В цій ділянці швидкість зменшується приблизно на 2 %, а густина – на 0,4...0,6 %. Третьою ділянкою є основна площа робочої частини зразка і її розмір лежить від 50 мм до області, яка межує з місцем розриву. В цій ділянці швидкість зменшується на 0,7...1,0 %, а величина густини практично є незмінною в межах ділянки. Четвертою є зона біля самого місця розриву зразка, розмір якої умовно становить 15...20 мм. В цій ділянці спостерігається найбільше відносне локальне видовження зразка, а також екстремальні зміни властивостей металу. Зміна густини тут більше за 1 %, а зміна швидкості проходження пружних хвиль більше 4 %.

Оптимізація поліному апроксимації. Розглянемо можливий аналітичний зв'язок між пошкодженістю і зміною швидкості у пластично деформованому об'ємі. В основі виразу (7), який пов'язує зміну швидкості і пошкодженість деформованого металу, лежить вираз (5) у вигляді поліному з трьома членами. Для оцінки оптимальності кількості членів ряду необхідно розглянути питання адекватності представлення експериментальних даних запропонованою аналітичною залежністю.

Вираз (7) можна привести до вигляду:

$$\gamma = a\theta + b\theta^2 + c\theta^3, \tag{8}$$

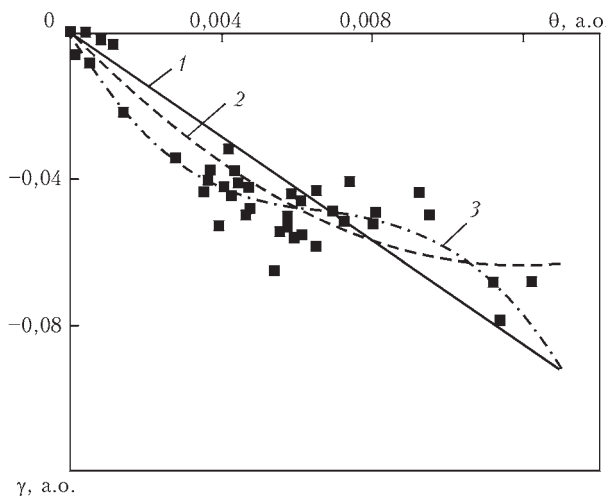


Рис. 3. Залежність величини γ від пошкоджуваності θ і апроксимаційні криві різного порядку: ■ – експериментальні дані; 1 – лінійна апроксимація; 2 – квадратична апроксимація; 3 – кубічна апроксимація

$$\text{де } \gamma = \left(2 \frac{\Delta V}{V_0} - \frac{\Delta V^2}{V_0^2}\right)(1 - \theta), \quad a = 1 - \alpha + \alpha\beta_1, \quad b =$$

$= \alpha^2\beta_2, \quad c = \alpha^3\beta_3.$ Залежно від того, скільки членів ряду використано у виразі (5), ліва сторона виразу (8), відповідно, буде мати різну кількість членів зі степенями за θ . На основі експериментальних результатів можна оцінити оптимальність виразу (8). На рис. 3 побудовано графік, в якому по осі ординат відкладено ліву частину виразу (8) γ , а по осі абсцис – величину пошкоджуваності θ . Як видно з рис. 3, спостерігається певний розкид даних, який можна пояснити похибками вимірювання, а також неоднорідностями пластичної деформації в різних ділянках. Поліном за степенями пошкоженості в правій частині виразу (8) апроксимує отримані експериментальні залежності. Точність апроксимації зростає із ростом степеня поліному. Нами зроблено порівняння поліномів від першого до четвертого порядків. Для них було знайдено коефіцієнти розкладу методом найменших квадратів.

Для кількісного порівняння наближення з допомогою різних апроксимаційних поліномів розраховано величини відповідних індексів кореляції. Індекс кореляції для лінійного поліному становив 0,8, для квадратичного 0,91, а для третього і четвертого степеня 0,943 і 0,945, відповідно. Таким чином, поліноми третього і четвертого степенів практично однаково апроксимують експериментальні дані. Тому можна обмежитись кубічним членом у виразі (8) і, відповідно, кубічним членом у формулі (5). Відповідні апроксимаційні криві показано на рис. 3. Крива, задана поліномом четвертого степеня, практично співпадає з кривою третього степеня і на рис. 3 не представлена.

Отже, на основі аналізу точності апроксимації експериментальних даних з допомогою індексу кореляції можна стверджувати, що вираз (5) задо-

вільно описує зв'язок між змінами пружного модуля, викликаного різними чинниками за пластичної деформації.

Отримана залежність зміни швидкості від пошкоженості може бути покладена в основу методики її оцінки. Для реалізації методики необхідно визначити коефіцієнти у виразі (8) для конкретних умов пластичного деформування, що можливо зробити з допомогою відповідних вимірювань і таким чином отримати калібрувальну залежність між пошкоженістю і зміною швидкості акустичної хвилі. За допомогою отриманої калібрувальної кривої можна визначати пошкоженість за вимірюваною величиною зміни швидкості акустичної хвилі.

Висновки

Проведено дослідження просторового розподілу швидкості повздовжньої акустичної хвилі та густини в пластично деформованих зразках з феритно-перлітної сталі. Їх взаємозв'язок інтегрально можна подати у вигляді кубічного полінома за степенями пошкоджуваності. На основі експериментальних даних показано, що таке представлення є оптимальним з точки зору точності апроксимації та кількості членів поліному апроксимації. Це може слугувати методикою визначення пошкоженості металу за вимірювано експериментально величиною зміни швидкості ультразвукової хвилі в металі, підданому пластичній деформації.

Список літератури

1. Назарчук З. Т., Скальський В. Р. (2009) Акустико-емісійне діагностування елементів конструкцій: Наук.-техн. пос. у 3 т. Т. 2. *Методологія акустико-емісійного діагностування*. Київ, Наукова думка.
2. Ерофеев В. И., Никитина Е. А. (2010) Согласованная динамическая задача оценки поврежденности материала акустическим методом. *Физические основы технической диагностики*, 56, 4, 554–557.
3. Мишакин В. В., Кассина Н. В., Гончар А. В. и др. (2008) Акустический метод оценки поврежденности материалов и конструкций, подвергаемых силовому нагружению. *Вестник научно-технического развития*, 5, 61–66.
4. Гончар А. В., Мишакин В. В. (2012) Оценка величины пластической деформации в структурно-неоднородных материалах с помощью ультразвуковых и металлографических исследований. *Металлургия и материаловедение*, 3, 221–227.
5. Levesque D., Lim C. S., Padioleau C., Blouin A. (2011) Measurement of texture in steel by laser-ultrasonic surface waves. *Journal of Physics: Conference Series*, 278, 1–4.
6. Скальський В. Р., Назарчук З. Т., Гірний С. І. (2012) Вплив електролітично поглиненого водню на модуль Юнга конструкційної сталі. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 4, 68–75.
7. Безьянний Ю. Г., Козирацкий Е. А. (2006) Отображение свойств волокнистых материалов по скорости распространения упругих волн. *Акустичний вісник*, 1, 15–20.
8. Запорожец О. И., Дордиенко Н. А., Михайловский В. А. (2016) Акустические и упругие свойства составляющих стенки корпуса реактора ВВЭР-440. *Металлофизика и новейшие технологии*, 6, 795–813.
9. Муравьев В. В., Зуев Л. Б., Комаров К. Л. (1996) *Скорость звука и структура стали и сплавов*. Новосибирск, Наука.
10. Черемской П. Г., Слезов В. В., Бетехин В. И. (1990) *Поры в твердом теле*. Москва, Энергоатомиздат.

11. Шутилов В. А. (1980) *Основы физики ультразвука*. Изд-во, Ленинград, универ.
12. Адамеску Р. А., Гельд П. В., Митюшов Е. А. (1985) *Анизотропия физических свойств металлов*. Москва, Металлургия.
13. Никитина Н. Е. (2005) *Акустоупругость. Опыт практического применения*. Нижний Новгород, Талам.
14. Труэл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. (1972) *Ультразвуковые методы в физике твердого тела*. Москва, Мир.

References

1. Nazarchuk, Z.T., Skalskyi, V.R. (2009) Acoustic-emission diagnostics of structure elements: Manual, in 3 Vol. Vol. 2: *Methodology of acoustic-emission diagnostics*. Kyiv, Naukova Dumka [in Ukrainian].
2. Erofeev, V.I., Nikitina, E.A. (2010) Matched dynamic problem of material damage evaluation by acoustic method. *Fiz. Osnovy Tekh. Diagnostiki*, 56(4), 554-557 [in Russian].
3. Mishakin, V.V., Kassina, N.V., Gonchar, A.V. et al. (2008) Acoustic method of damage evaluation of materials and structures under force loading. *Vestnik Nauchno-Tekhnicheskogo Razvitiya*, 5, 61-66 [in Russian].
4. Gonchar, A.V., Mishakin, V.V. (2012) Evaluation of plastic deformation value in structurally-inhomogeneous materials using ultrasonic and metallographic examinations. *Metallurgiya i Materialovedenie*, 3, 221-227 [in Russian].
5. Levesque, D., Lim, C.S., Padioleau, C., Blouin, A. (2011) Measurement of texture in steel by laser-ultrasonic surface waves. *J. of Physics: Conference Series*, 278, 1-4.
6. Skalsky, V.R., Nazarchuk, Z.T., Girny, S.I. (2012) Influence of analytically-absorbed hydrogen on Young's modulus of structural steel. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, 4, 68-75 [in Ukrainian].
7. Bezymyanny, Yu.G., Koziratsky, E.A. (2006) Characterization of properties of fibrous materials by velocity of elastic wave propagation. *Akustychny Visnyk*, 1, 15-20 [in Russian].
8. Zaporozhets, O.I., Dordienko, N.A., Mikhajlovsky, V.A. (2016) Acoustic and elastic properties of wall components of WWER-440 reactor body. *Metallofizika i Novejshe Tekhnologii*, 6, 795-813 [in Russian].
9. Muraviov, V.V., Zuev, L.B., Komarov, K.L. (1996) *Sound velocity and structure of steel and alloys*. Novosibirsk, Nauka [in Russian].
10. Cheremskoj, P.G., Slezov, V.V., Betekhin, V.I. (1990) *Pores in solid*. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
11. Shutilov, V.A. (1980) *Fundamentals of supersonics*. Leningrad, Izd-vo Leningrad. Un-ta [in Russian].
12. Adamesku, R.A., Geld, P.V., Mityushov, E.A. (1985) *Anisotropy of physical properties of metals*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
13. Nikitina, N.E. (2005) *Acoustoelasticity. Experience of practical application*. Nizhny Novgorod, Talam [in Russian].
14. Truel, R., Elbaum, C., Chick, B. (1972) *Ultrasonic methods in solid state physics*. Moscow, Mir [in Russian].

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ ФЕРРИТНО-ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ ПО ВЕЛИЧИНЕ ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ПРОДОЛЬНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ

В. Р. СКАЛЬСКИЙ, О. М. МОКРЫЙ

Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5 E-mail: skalsky.v@gmail.com, mokomo@lviv.farlep.net

Получена количественная характеристика изменения скорости продольной акустической волны и плотности в ферритно-перлитной стали в результате пластической деформации. Показана возможность оценивать величину поврежденности, которая возникла в результате пластической деформации, по изменению скорости акустической волны. На основе экспериментальных данных установлена корреляционная зависимость между изменением скорости и поврежденности в виде полинома третьей степени. Библиогр. 14, рис. 3.

Ключевые слова: пластическая деформация, поврежденность, скорость акустической волны, плотность

EVALUATION OF DAMAGE LEVEL IN FERRITIC-PEARLITIC STEELS BY THE VALUE OF THE CHANGE OF LONGITUDINAL ACOUSTIC WAVE VELOCITY

V. R. SKALSKYI, O. M. MOKRYI

G. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine E-mail: skalsky.v@gmail.com, mokomo@lviv.farlep.net

Quantitative characteristic of the change of velocity of a longitudinal acoustic wave and density in ferritic-pearlitic steel as a result of plastic deformation was obtained. Possibility of evaluation of the level of damage that is due to plastic deformation by the change of acoustic wave velocity is demonstrated. Experimental data were the base for correlating the change of velocity and damage level in the form of a third-degree polynomial. 14 References, 3 Figures.

Keywords: plastic deformation, damage level, acoustic wave velocity, density

Надійшла до редакції
22.01.2018



Национальная академия наук Украины
Институт электросварки им. Е.О. Патона НАНУ
АО «Мотор Сич»
ПАО «Институт титана»
Запорожский национальный технический университет
Международная Ассоциация «Сварка»



Международная конференция

«Титан 2018. Производство и применение в Украине»

Посвящается 100-летию Национальной академии наук Украины

Киев, ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины

11–13 июня 2018

www.pwi-scientists.com/rus/titan2018