

ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ПАКЕТНИХ ІМПУЛЬСІВ ХВИЛЬ РЕЛЕЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТВЕРДОСТІ ПОВЕРХНЕВО ЗАГАРТОВАНИХ МЕТАЛІВ

С.Ю. Плєснецов, Г.М. Сучков, Р.П. Мигущенко, О.Ю. Кропачек, Ю.О. Плєснецов, А.В. Донченко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.
E-mail: Serhii.Pliesnetsov@khpi.edu.ua

Встановлено можливість неруйнівного контролю безконтактним ультразвуковим електромагнітно-акустичним методом твердості поверхнево загартованих металовиробів шляхом застосування ультразвукових поверхневих хвиль різної частоти. Наведено загальну характеристику механізму роботи електромагнітно-акустичного перетворювача при збудженні і прийомі ультразвукових хвиль з урахуванням можливого впливу зсувних і поздовжніх хвиль. Розглянуто особливості конструкції перетворювачів при збудженні хвиль Релея, які забезпечують проведення контролю твердості. Виготовлено стенд для проведення експериментальної перевірки результатів теоретичного та модельного досліджень. Експериментальні дослідження підтвердили можливість проведення неруйнівного контролю твердості з використанням електромагнітно-акустичних перетворювачів. Бібліогр. 9, рис. 4.

Ключові слова: твердість металу, загартований шар, ультразвуковий контроль, хвилі Релея, частота ультразвукових хвиль, електромагнітно-акустичний перетворювач

Вступ. Для підвищення експлуатаційних можливостей значна частина металургійної та машинобудівної продукції піддається зміцненню різними методами. Основною характеристикою зміцнення є твердість. Її величина повинна знаходитися в заданих межах, оскільки надмірна твердість призводить до підвищеної крихкості виробу, а недостатня твердість – до зниження терміну його експлуатації. Для контролю твердості застосовують методи та прилади, що використовують різні фізичні ефекти: вдавлювання в поверхню інденторів різної форми, відскок кульки, зміну швидкості поширення ультразвукових хвиль чи імпедансу, вимір залишкової намагніченості та ін. Згадані відомі методи контролю мають ряд суттєвих недоліків: порушують поверхневий шар металу; не враховують вплив низьковуглецевого поверхневого шару; схильні до впливу на результати контролю властивостей структури, особливо при високій локальності виміру; не визначається градація твердості за товщиною контрольованого шару та ін. Особливо яскраво відзначені недоліки проявляються при контролі твердості поверхнево зміцнених металовиробів.

Досить ефективним методом визначення фізико-механічних характеристик матеріалів з перерахованих, у тому числі контролю твердості, є ультразвуковий [1–4]. Проте традиційні електроакустичні перетворювачі вимагають застосування контактної рідини, яка істотно впливає на результати контролю, особливо при контролі твердості

поверхнево зміцнених металовиробів, наприклад рейок, труб, валів та ін. Потрібна зачистка поверхні виробів, що також спотворює результати вимірів.

Менш схильними до впливу факторів, що заважають (наявності контактної рідини, стану поверхні металу, зміни відстані між перетворювачем і металом тощо) є електромагнітно-акустичні (ЕМА) перетворювачі (ЕМАП) [5–9]. Вони дозволяють виконувати високоточний контроль швидкості поширення ультразвукових хвиль, у тому числі поверхневими хвилями Релея, які доцільно застосувати для пошарового контролю твердості металовиробів як на локальних, так і на протяжних ділянках. Істотною перевагою таких ЕМАП є можливість автоматизованого потокового контролю твердості, наприклад при виробництві поверхнево загартованих металовиробів.

Постановка задачі. Модель роботи ЕМАП під час збудження та прийому імпульсів хвиль Релея пояснюється на рис. 1. Основу такого перетворювача складає плоска котушка I індуктивності (індуктор), намотана зигзагоподібно так, що сусідні паралельні робочі витки, пронумеровані $1, 2, \dots, m$, розташовані на розрахунковій відстані, що дорівнює половині довжини ультразвукової поверхневої хвилі ($\lambda_0/2$). Котушка I розташовується над поверхнею об'єкта контролю (ОК) і живиться імпульсами струму у вигляді пакета із заповненням з певною кількістю періодів високої частоти. У поверхневому скін-шарі ОК формується вихро-

Плєснецов С.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-8428-5426>, Сучков Г.М. – <https://orcid.org/0000-0002-1805-0466>, Мигущенко Р.П. – <https://orcid.org/0000-0002-3287-9772>, Кропачек О.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-5899-0252>, Плєснецов Ю.О. – <https://orcid.org/0000-0002-4782-263X>

© С.Ю. Плєснецов, Г.М. Сучков, Р.П. Мигущенко, О.Ю. Кропачек, Ю.О. Плєснецов, А.В. Донченко, 2023

вий струм із конфігурацією, що повторює форму котушки l [7]. На цю ж ділянку поверхневого шару ОК діє магнітне поляризує поле, область 2 дії якого оконтурена рисками на рис. 1. Унаслідок взаємодії вихрового струму та поляризуєчного магнітного поля в скін-шарі металу на електроні діє осцилюєча сила Лоренца. За допомогою електронів цей вплив передається кристалічній решітці матеріалу. У разі феромагнітного матеріалу виробу у формуванні акустичного поля бере участь магнітострикційний ефект. Під кожним витком котушки l у поверхневому скін-шарі ОК відбувається складення амплітуд механічних коливань кристалічної решітки металу. У результаті вздовж поверхні в двох взаємно протилежних напрямках поширюються імпульси хвилі Релея (на рис. 1 стрілками показано тільки один напрям) з частотою, що збігається [6, 7] з частотою збуджуючого високочастотного струму в індукторі l . Цифрою 3 схематично позначено індуктор приймального ЕМАП.

На рис. 1 наведено схему, що встановлює основні положення моделювання механізму збудження хвиль Релея, яка реалізується для матеріалу ОК з відомою величиною швидкості C_r поширення поверхневої ультразвукової хвилі (наприклад, для калібрувального зразка). При цьому $\lambda = C_r/f$, де f – частота збуджених ультразвукових коливань (УЗК). Зміцнення металу призводить до зміни його пружних констант і, відповідно, до зміни C_r . Тоді $\lambda_x = \lambda \pm \Delta\lambda = (C_r \pm \Delta C_r)/f$, тобто змінюється довжина λ_x хвилі пружних коливань і її величина не буде відповідати розрахунковій відстані (кроку $a = \lambda_0/2$) між сусідніми робочими ділянками індуктора ЕМА перетворювача. Отже може виникнути необхідність або зміни конструкції індуктора ЕМАП, або зміни частоти f . Здійснити зміну f досить легко шляхом апаратної реалізації. Проте при цьому може змінюватись товщина контрольного шару металу $(1...1,5)\lambda$ [7], у якому поширюються УЗК. Це може бути неприпустимим, наприклад при діагностиці твердості поверхнево зміцнених ОК (на заданій товщині шару металу). Зміна конструкції індуктора ЕМАП шляхом регу-

лювання відстаней між робочими ділянками індуктора є складною і коштовною. Необхідно виготовляти набір перетворювачів із різною відстанню між робочими ділянками. Зазначене протиріччя необхідно дослідити, оцінити та розробити пропозицію, що дозволяє реалізувати переваги ЕМА способу.

У подальшому при теоретико-математичному моделюванні прийнято, що початкова амплітуда збуджуваного ультразвукового сигналу в поверхневому шарі металу під кожною робочою ділянкою індуктора збуджуючого ЕМАП складає A_0 . Прийmemo, що коефіцієнт послаблення хвиль Релея при розповсюдженні вздовж поверхні виробу дорівнює δ .

Зміст та результати розробки. На першому етапі роботи було виконано теоретичні дослідження процесів, які мають місце при збудженні та прийомі імпульсів поверхневих хвиль в металах. При теоретичному дослідженні розглянуто наступне. При встановленні збуджуючого ЕМАП на поверхню контрольного зразка під кожним його провідником одночасно збуджуються поверхневі, зсувні та поздовжні хвилі [8]. Механізми перетворення електромагнітних полів у пружні коливання різного типу як при збудженні, так і при прийомі, широко відомі та описані в працях багатьох науковців світу, наприклад в огляді [9].

При розповсюдженні поверхневих хвиль вздовж поверхні ОК вони поступають під сусідню робочу ділянку індуктора перетворювача, змінивши знак фази на π . Оскільки сусідня робоча ділянка включена за напругою зустрічно, то збуджені ультразвукові імпульси в поверхневому шарі складаються по амплітуді. У результаті з моменту подачі живлення на збуджуючий індуктор перетворювача при поширенні збудженої поверхневої хвилі від кожного робочого елемента індуктора під всі сусідні сумарна амплітуда сигналу буде поступово збільшуватися до деякого фіксованого максимального значення A_1 . Якщо в цей момент відключити живлення індуктора, то амплітуда збуджуваного УЗ сигналу буде поступово зменшуватися до нульового значення за рахунок зменшення

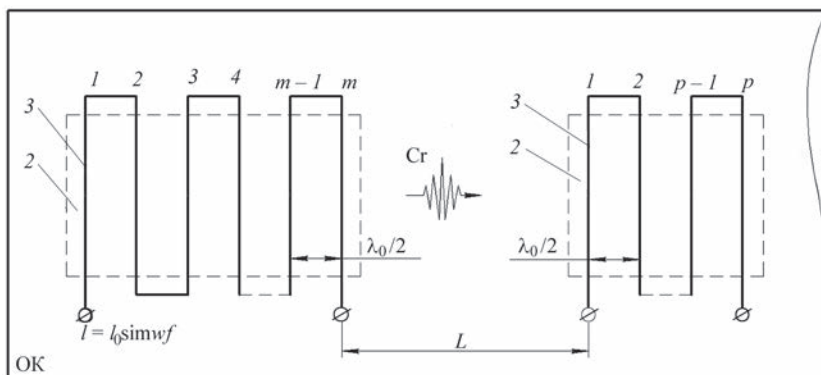


Рис. 1. Спосіб збудження та прийому ультразвукових хвиль Релея

кількості сигналів, що складаються. У результаті формується огинаюча дзвоноподібної форми збудженого ультразвукового імпульсу, який поширюється вздовж поверхні зразка. Отже, при $a = \lambda_0/2$ сумарне максимальне значення амплітуди A_1 змишень пружних коливань, що збуджуються, буде визначатися виразом:

$$A_1 = mA_0K_1 \cos(\omega t) \sum_{n=1}^m \exp\left(-\delta(m-n)\frac{\lambda_0}{2}\right) \quad (1)$$

де A_0 – початкова амплітуда пружних коливань, що збуджена одною ділянкою індуктора; K_1 – коефіцієнт перетворення електромагнітної енергії в акустичну для даного ЕМАП і матеріалу ОК; ω_0 – кругова частота збуджених ультразвукових коливань; t – час; δ – коефіцієнт послаблення УЗК в матеріалі калібрувального зразка; λ_0 – розрахункова довжина хвилі УЗК для калібрувального зразка; m – кількість робочих ділянок індуктора ЕМАП.

Очевидно, що для забезпечення максимальної амплітуди збудженого імпульсу поверхневої хвилі необхідно живити індуктор I ЕМАП струмом з кількістю періодів частоти заповнення імпульсів струму, що перевищує половину числа робочих ділянок індуктора перетворювача.

У той же час зсувні і поздовжні хвилі, що збуджуються сусідніми ділянками індуктора ЕМАП і розповсюджуються нормально до поверхні металу, мають протилежну фазу і в результаті компенсуються. Сумарні амплітуди таких імпульсів є мінімальними. У порівнянні з амплітудою поверхневих хвиль вони менші в десятки і сотні разів. Тобто вплив зсувних та поздовжніх хвиль можна не враховувати.

Прийом імпульсів поверхневих хвиль здійснюється одним або декількома ЕМА-перетворювачами, наприклад індуктором 3 (рис. 1), також виконаним у вигляді зигзагу. Механізм перетворення при прийомі поверхневих пружних коливань з металів через електромагнітні поля в електричні імпульси широко відомий і описаний у працях багатьох науковців світу, наприклад в огляді [9]. Крок між робочими ділянками кожного приймального індуктора, так само як і для збуджуючого, повинен дорівнювати $a = \lambda_0/2$. Індуктори збуджуючого та приймаючих ЕМАП встановлюються на фіксованих відстанях один від одного. Після проходження відстані L від збуджуючого індуктора I ЕМАП до першої ділянки приймального індуктора 3 амплітуда хвилі Релея зменшиться за рахунок ослаблення. Отже при вході під приймальний індуктор 3 буде поширюватися хвиля, яка описується виразом:

$$A_2 = A_1 \exp(-\delta L) \quad (2)$$

Далі поверхнева хвиля з амплітудою (2) поступово переміщується під кожною робочою ділянкою (номери $1, 2, \dots, p$) індуктора 3 приймального

перетворювача. Кристалічна решітка металу коливається в магнітному полі (області 2 на рис. 1) під кожною сусідньою робочою ділянкою індуктора 3 протифазно для довжини хвилі λ_0 збуджених УЗК. Враховуючи, що кожен сусідній робочі ділянки включені за електричною напругою протифазно, у результаті амплітуди прийнятих імпульсів складаються максимально (тільки для довжини хвилі λ_0 збудженої УЗК). Сумарна наведена ЕРС в індукторі 3 дорівнюватиме:

$$A_3 = pA_2K_2 \sum_{q=1}^p \exp\left(-\delta(p-q)\frac{\lambda_0}{2}\right), \quad (3)$$

де K_2 – коефіцієнт перетворення акустичної енергії в електричну для даного ЕМАП та матеріалу ОК; p – кількість робочих ділянок індуктора приймального ЕМАП.

Аналіз (3) показує, що максимальна прийнята амплітуда імпульсу поверхневої хвилі в цьому випадку буде залежати тільки від кількості робочих ділянок збуджуючого та приймального індукторів, коефіцієнтів перетворення електричної енергії в акустичну і навпаки, а також від ослаблення поверхневої хвилі. При незначному ослабленні амплітуди імпульсів УЗК, малих величинах L і λ_0 вираз (3) набуде вигляду: $A_3 \approx A_0 mpK_1K_2 \cos(\omega t)$.

При контролі твердості ОК збуджуючий і приймальні ЕМАП встановлюються на виріб з невідомими пружними характеристиками і, відповідно, з невідомою швидкістю поширення поверхневих УЗ коливань. При цьому довжина збуджуваних поверхневих хвиль не буде співпадати з розрахунковою λ_0 і максимальне значення випромінюваної амплітуди поверхневої хвилі буде мати вигляд:

$$A'_1 = mA_0K_1 \times \sum_{n=1}^m \exp\left(-\delta(m-n)\frac{\lambda_0}{2}\right) \cos(\omega t + (m-n)\pi\lambda_0 / \lambda_x), \quad (4)$$

де $\omega_0 = 2\pi f_0$ – кругова частота УЗК при налаштуванні приладу на контрольному зразку; f_0 – частота пружних коливань, що збуджуються; t – час; K_1 – коефіцієнт перетворення електромагнітної енергії в акустичну для даного ЕМАП та матеріалу ОК; m – кількість робочих ділянок збуджуючого індуктора ЕМАП; λ_0 – довжина хвилі ультразвукових коливань у матеріалі поверхневого шару контрольного зразка; λ_x – довжина хвилі УЗК у матеріалі досліджуваного ОК; $\pi = 3,14$.

При підсумовуванні в (4) значень величин їх необхідно брати зі знаком плюс, оскільки це обумовлено конструкцією індуктора перетворювача з протифазним включенням сусідніх робочих ділянок, розташованих на відстані $\lambda_0/2$ одна від одної.

На відміну від випадку (1) аналіз (4) показує, що фази пружних коливань під сусідніми ділянками

ми індуктора l не будуть кратними π . У результаті невідповідності довжини хвилі, що збуджується, розрахунковому кроку робочих ділянок індуктора ($\lambda_x/2 \neq a = \lambda_0/2$) виникає зсув часового положення максимуму амплітуди збудженого інформаційного сигналу та його фази. У (4) $\phi_x = (m - n)\pi\lambda_0/\lambda_x$ – фаза хвиль УЗК, що переміщуються у поверхневому шарі ОК під робочими ділянками індуктора. Простий розрахунок показує, що зміни фази УЗ коливань через зміни твердості для загартованих сталей можуть досягати декількох градусів. Це може призвести до суттєвих помилок у результатах контролю твердості металу.

При поширенні збуджених УЗК (4) у поверхні досліджуваного ОК під індуктором 3 приймального ЕМАП (рис. 1) наведена ЕРС буде мати вигляд:

$$A'_2 = pmA_0K_1K_2 \exp(-\delta L) \sum_{q=1}^p (-\delta(p-q)) \times \sum_{n=1}^m \exp(-\delta(m-n)\lambda_0/2) \cos(\omega t + (p+m-n-q)\pi\lambda_0/\lambda_x), \quad (5)$$

де p – кількість робочих ділянок приймального індуктора 3.

Аналіз (5) показує, що за відмінності довжини хвиль поверхневих УЗК в контрольному зразку і в ОК інформаційний сигнал буде спотворюватися як при збудженні, так і при прийомі, що може призвести до істотного збільшення величини помилки контролю твердості металу.

З наведених теоретичних досліджень випливає необхідність формування інформаційного гармонійного сигналу, який збуджуватиме УЗК з довжиною хвилі, відповідної до розрахункового кроку робочих ділянок збуджувача індуктора і котушок індуктивності приймальних ЕМАП. Тобто необхідно виконати рівність $\lambda_x = \lambda_0$ або $C_x/f_x = C_0/f_0$. Цього можна досягти шляхом регулювання частоти збуджуваних УЗК до отримання максимального прийнятого сигналу, що легко реалі-

зувати автоматично. У цьому випадку (5) набуде вигляду:

$$A'_2 = pmA_0K_1K_2 \exp(-\delta L) \cos \omega t \times \sum_{q=1}^p \exp(-\delta(p-q)\lambda_0/2) \sum_{n=1}^m \exp(-\delta(m-n)\lambda_0/2). \quad (6)$$

Згідно з (6) ЕРС, наведена в індукторі 3, буде максимальною через складання амплітуд імпульсів поверхневих хвиль, що збуджуються і приймаються. При цьому форма прийнятого сигналу буде гармонійною. Такий підхід у результаті дасть можливість з високою точністю вимірювати часові проміжки, наприклад при переході сигналу через нуль і, як наслідок, підвищити точність контролю твердості поверхневого шару ОК.

При надходженні під індуктор об'ємних зсувних або поздовжніх хвиль ЕРС, що наводиться на сусідніх ділянках індуктора 3 (рис. 1), відрізняється на π і в результаті віднімається. Тому вплив об'ємних зсувних та поздовжніх хвиль при прийомі також можна не враховувати. Підтвердженням такого висновку є результати експериментальних досліджень (рис. 2) розповсюдження поверхневих хвиль Релея по периметру зразка труби, що була в експлуатації, та по периметру зразка цільнометалевої заготовки діаметром 220 мм.

Аналіз даних, наведених на рис. 2, підтверджує, що, крім поверхневих хвиль, додаткові імпульси хвиль іншого типу не збуджуються і не приймаються.

На другому етапі для оцінки результатів теоретичних досліджень, наведених у виразах (5) та (6), виконано математичне моделювання впливу твердості поверхневого шару металовиробу на характеристики хвиль Релея, тобто для випадків $\lambda_x = \lambda_0$ і $\lambda_x \neq \lambda_0$. Результати моделювання наведено на рис. 3.

При моделюванні прийнято: $\lambda_0 = 3$ мм; $\lambda_0/\lambda_x = 1, 2, 3, 4$ і 5 %; $\delta = 0,1$ Нп/мм; $A_0 = 1$; $k = 6$; $p = 4$; $K_1 = 0,001$; $K_2 = 0,001$. Вплив частоти на ве-

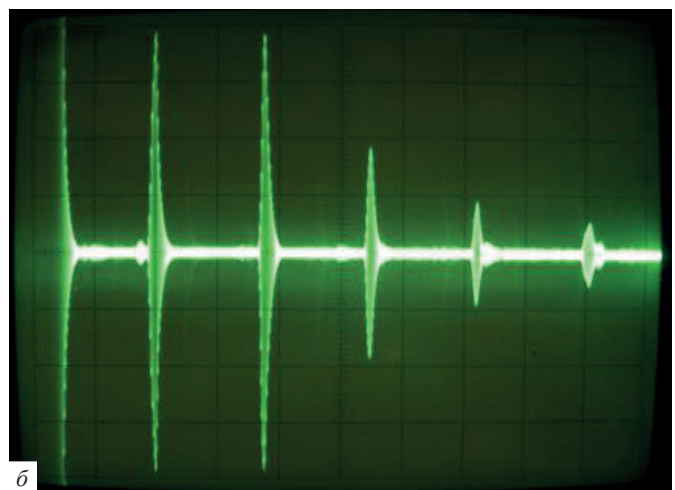


Рис. 2. Часові розгортки з імпульсами поверхневих хвиль, що багаторазово оббігають по периметру трубу діаметром 76 мм з товщиною стінки 4,2 мм (а) та по периметру заготовки діаметром 220 мм (б)

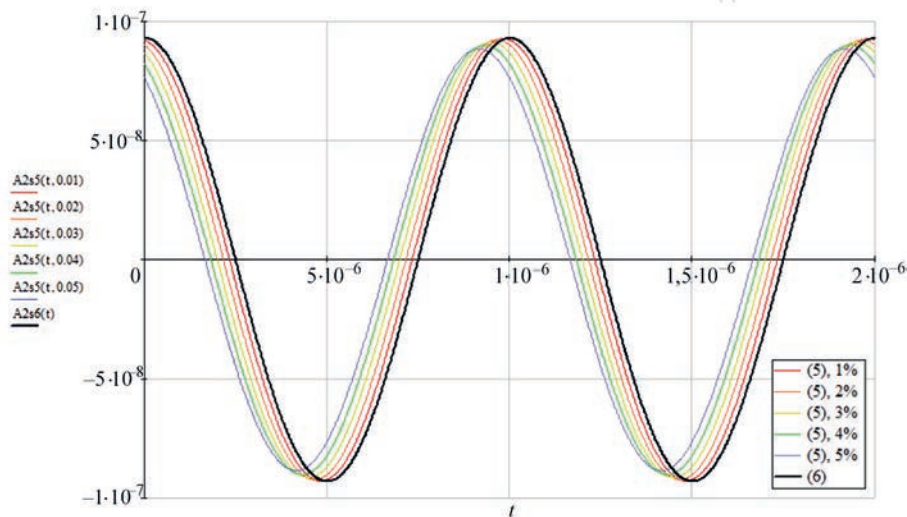


Рис. 3. Вплив відносної зміни довжини хвилі в ОК у контрольному зразку на зміну часу переходу прийнятого сигналу через нуль та положення в часі максимуму прийнятого сигналу

личину ослаблення УЗК та його розсіювання не враховували.

Аналіз результатів досліджень, наведених на рис. 3, підтверджує положення про можливість ефективного контролю твердості поверхнево загартованих ОК хвилями Релея з використанням електромагнітно-акустичних перетворювачів.

На основі теоретичних та модельних досліджень можна сформулювати наступні методики контролю твердості металовиробів імпульсами поверхневих хвиль з використанням ЕМАП.

Перший варіант методики контролю твердості поверхневого шару ОК має бути наступним. Розраховується крок збуджуючого індуктора та приймальної котушки індуктивності (одної або декількох) ЕМАП для відомої швидкості поширення ультразвукових коливань для заданого класу поверхнево загартованих металів. Потім ЕМАП встановлюється на контрольний зразок із відомим середнім значенням твердості в інтервалі, який визначається нормативно-технічною документацією, і за допомогою регулювання частоти отримують максимальне значення амплітуди прийнятого імпульсу. Отримані дані вносять у пам'ять контрольного приладу. Таку процедуру контролю повторюють на інших контрольних зразках з відомою твердістю в більшу та меншу сторону від середньої і отримані дані у відносних одиницях також вносять у пам'ять приладу. Отриману калібрувальну криву вводять в пам'ять контрольного приладу. Контроль твердості шару досліджуваного ОК роблять аналогічним чином, зіставляючи отримані значення частоти з раніше отриманою калібрувальною залежністю.

Другий варіант методики контролю твердості призначений для визначення відповідності твердості поверхневого шару ОК заданому інтервалу. Для цього калібрування виконують для двох кон-

трольних зразків, що мають крайні значення твердості. Далі за попередньою методикою виконують контроль. Деталі, які не відповідають встановленому інтервалу твердості, відсортовують. Такий варіант методики важливий для поточного експрес контролю ОК.

Для експериментальної перевірки розробленої методики контролю твердості був виготовлений стенд (рис. 4), де 1 – приймальний перетворювач; 2 – збуджуючий перетворювач; 3 – генератор зондуючих імпульсів з вбудованим блоком управління; 4 – попередній підсилювач; 5 – блок візуалізації (осцилограф); ОК – об'єкт контролю.

У якості зразка для досліджень використано трубу з прямокутним перерізом зі сталі 45. Експеримент був проведений у три етапи: спочатку на зразку без спеціальної підготовки поверхні, потім після зачистки поверхні зі зняттям тонкого шару до 0,1 мм, і далі зі зняттям шару металу завтовшки 0,3 мм. Тобто частково або повністю видалявся шар металу, насичений вуглецем. Результати експериментів підтвердили, що різниця в результатах на різних ділянках зразка відрізняється на 20...30%. Тобто результати теоретичних і модельних досліджень можна вважати підтвердженими.

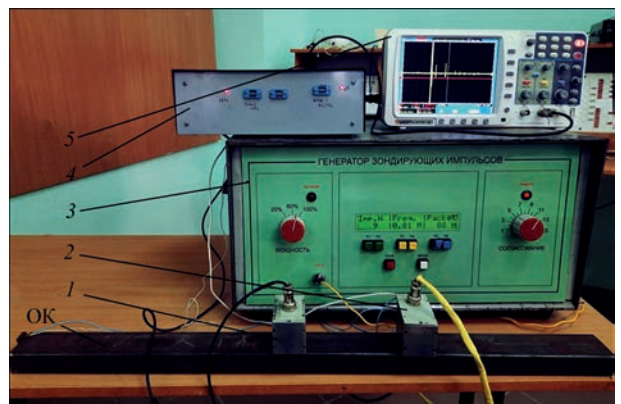


Рис. 4. Стенд для виконання експериментальних досліджень

Висновки

Виконано теоретичні та модельні дослідження можливості контролю твердості поверхнево загартованих металовиробів хвилями Релея, які збуджуються і приймаються електромагнітно-акустичними перетворювачами.

На основі виконаних досліджень розроблено дві методики контролю твердості поверхні металів, у тому числі експрес метод, для поточного контролю деталей, що є важливим для сортування виробів за твердістю поверхні в заданому діапазоні.

Згідно з методиками для забезпечення якісної діагностики твердості поверхнево зміцнених металовиробів необхідно калібрувати вимірювальний прилад за залежністю твердість-частота застосовуваних ультразвукових поверхневих коливань, встановленою за контрольними зразками із заданою твердістю. Такий підхід є зручним для реалізації у приладах контролю твердості.

Список літератури

1. Cole, P.T. (1988) *Series: The Capabilities and Limitations of NDT. Part 7. Acoustic Emission (INST087)*. British Institute of Non-Destructive Testing. ISBN 978-0-903132-08-4.
2. Christian U. Grosse, Masayasu Ohtsu (2008) *Acoustic Emission Testing*. Springer Verlag. ISBN 978-3-642-08937-4.
3. Sotirios J. Vahaviolos (1999) *Acoustic Emission: Standards and Technology Update*. Vol. STP-135, Philadelphia, PA: ASTM International (publishing), p. 81. ISBN 978-0-8031-2498-1.
4. Blitz, J., Simpson, G. (1991) *Ultrasonic Methods of Non-Destructive Testing*. Springer-Verlag New York, LLC. ISBN 978-0-412-60470-6.
5. Hirao, M., Ogi, H., Yasui, H. (2001) Contactless measurement of bolt axial stress using a shear-wave electromagnetic acoustic transducer. *NDT & E International*, 34, 3, 179–183, ISSN 0963-8695.
6. Suchkov, G.M., Taranenko, Yu.K., Khomyak, Yu.V. (2016) A Non-Contact Multifunctional Ultrasonic Transducer for Measurements and Non-Destructive Testing. *Measurement Techniques*, 59, 990–993. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-016-1081-3>
7. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.М. и др. (2017) Информационно-измерительные электроакустические преобразователи для оценки качества поверхности ферромагнитных металлоизделий ультразвуковыми

волнами Релея. *Техническая электродинамика*, 2, 70–76. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.02.070>

8. Мигущенко Р.П., Сучков Г.М., Петрищев О.М., Десятниченко О.В. (2016) *Теорія та практика електромагнітно-акустичного контролю. Частина 5. Особливості конструювання та практичного застосування ЕМА пристроїв ультразвукового контролю виробів*. Монографія. Харків, ТОВ «Планета-принт».
9. Плеснецов С.Ю., Сучков Г.М., Корж А.И., Суворова М.Д. (2018) Новые теоретические исследования и разработки в области электромагнитно-акустического преобразования (обзор). *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 2, 24–31. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2018.02.03>

References

1. Cole, P.T. (1988) *Series: The Capabilities and Limitations of NDT. Pt 7. Acoustic Emission (INST087)*. British Institute of Non-Destructive Testing. ISBN 978-0-903132-08-4.
2. (2008) *Acoustic Emission Testing*. Eds by Christian U. Grosse, Masayasu Ohtsu, Springer Verlag. ISBN 978-3-642-08937-4.
3. Sotirios J. Vahaviolos (1999) *Acoustic Emission: Standards and Technology Update*. Vol. STP-135, Philadelphia, PA: ASTM Int. 81. ISBN 978-0-8031-2498-1.
4. Blitz, J., Simpson, G. (1991) *Ultrasonic Methods of Non-Destructive Testing*. Springer-Verlag New York, LLC. ISBN 978-0-412-60470-6.
5. Hirao, M., Ogi, H., Yasui, H. (2001) Contactless measurement of bolt axial stress using a shear-wave electromagnetic acoustic transducer. *NDT & E Intern.*, Vol. 34, Issue 3, 179–183, ISSN 0963-8695.
6. Suchkov, G.M., Taranenko, Yu.K., Khomyak, Yu.V. (2016) A non-contact multifunctional ultrasonic transducer for measurements and non-destructive testing. *Measurement Techniques*, 12, Vol. 59, Issue 9, 990–993. DOI:<https://doi.org/10.1007/s11018-016-1081-3>
7. Migushchenko, R.P., Suchkov, G.M., Petrishchev, O.M., Bolyukh, V.F., Plesnetsov, S.Yu., Kocherga, A.I. (2017) Information-measurement electromechanical transducers for evaluation of surface quality of ferromagnetic metal products by ultrasonic Rayleigh waves. *Техническая Электродинамика*, 2, 70–76 [in Russian] DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2017.02.070>
8. Migushchenko, R.P., Suchkov, G.M., Petrishchev, O.M., Desyatnichenko, O.V. (2016) *Theory and practice of electromagnetic-acoustic control. Pt 5: Peculiarities of design and practical application of EMA devices for ultrasonic testing of products*. In: Monography. Kharkiv, Planeta-print [in Ukrainian].
9. Plesnetsov, S.Yu., Suchkov, G.M., Korzh, A.I., Suvorova, M.D. (2018) New theoretical investigations and developments in the field of electromagneto-acoustic transformation (review). *Tekh. Diagnost. i Nerazruch. Kontrol*, 2, 24–31 [in Russian] DOI:<http://dx.doi.org/10.15407/tdnk2018.02.03>

APPLICATION OF ULTRASONIC PACKET PULSES OF RALEIGH WAVES FOR TESTING THE HARDNESS OF SURFACE-HARDENED METALS

S.Yu. Pliesnetsov, G.M. Suchkov, R.P. Mygushchenko, O.Yu. Kropachek, Yu.O. Pliesnetsov, A.V. Donchenko

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». 2 Kyrpychova str., 61002, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: Serhii.Pliesnetsov@khp.edu.ua

The possibility of nondestructive testing of hardness of surface-hardened metal products by contactless ultrasonic electromagnetoacoustic method with application of waves of different frequency was established. General characterization of the mechanism of operation of the electromagnetoacoustic transducer at excitation and reception of ultrasonic waves is given, taking into account the possible influence of shear and longitudinal waves. The features of the transducer design at excitation of Raleigh waves are considered, which ensure performance of hardness control. A stand was made to conduct the experimental verification of the results of theoretical and model investigations. Experimental investigations confirmed the possibility of performance of nondestructive hardness control, using electromagnetoacoustic transducers. 9 Ref., Fig. 4.

Keywords: metal hardness, hardened layer, ultrasonic testing, Raleigh waves, ultrasonic wave frequency, electromagnetoacoustic transducer

Надійшла до редакції 16.01.2023