

# СИСТЕМА UltraMARS ДЛЯ НЕРУЙНІВНОГО ВИМІРЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ: НОВІ РОЗРОБКИ

Я. Клейман

Structural Integrity Technologies, Inc. (Sintec). 80 Есна Парк Драйв, Маркхам, Онтаріо, Канада.  
E-mail: [jkleiman@itlinc.com](mailto:jkleiman@itlinc.com)

Одним із ефективних методів неруйнівного контролю залишкових і експлуатаційних напружень є акустичний метод, який базується на поширенні пружних ультразвукових коливань всередині твердого тіла. Переносний комплекс для вимірювання діючих і залишкових напружень у твердих матеріалах із використанням акустичного неруйнівного методу контролю напружень у твердих матеріалах був розроблений на початку 2000 р. командами науковців Integrity Testing Laboratory, Sintec та Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона. На основі раннього прототипу розроблено вдосконалений комплекс UltraMARS, який дозволяє вимірювати величину та знак діючих і залишкових напружень у лабораторних і польових умовах, як усереднених по товщині, так і в поверхневих і приповерхневих шарах, а також контролювати напруження в металевих елементах конструкцій під час їх виготовлення, ремонту та експлуатації. Комплекс ефективний для оцінки якості зварних з'єднань у результаті післязварювальної обробки, проведеної з метою перерозподілу залишкових напружень, та успішно використовується в морській, аерокосмічній, будівельній та інших галузях промисловості. Чотириполюсний перетворювач був розроблений для покращення експлуатаційних характеристик комплексу UltraMARS під час моніторингу напружень на поверхні та в приповерхневих шарах матеріалу. Він відрізняється від використовуваних двополюсних перетворювачів поверхневих хвиль (Surface-Rayleigh Wave – Transducer RF12) і підповерхневих хвиль (Subsurface – Transducer SF12) тим, що має дві пари передавач–приймач, розташованих під кутом 90° одна до одної. Ця зміна дозволила вимірювати швидкість ультразвукових хвиль одночасно в обох ортогональних напрямках без повороту передавача–приймача на 90°. Для використання цих перетворювачів з комплексом UltraMARS було розроблено програму перемикання передавача–приймача. Також розроблено перетворювач зі змінною міжполюсною відстанню для вимірювання залишкових напружень у приповерхневих шарах матеріалів, що дозволяє визначати одновісні наведені напруження на глибину від 0 до 8...10 мм шляхом зміни базової відстані між випромінювачем і приймачем. На даний момент методика контролю напружень знаходиться в стадії розробки. Бібліогр. 22, рис. 10.

*Ключові слова:* залишкові напруження, неруйнівний ультразвуковий контроль залишкових напружень, UltraMARS, перетворювач зі змінною базою, чотириполюсний перетворювач

**Вступ.** Залишкові напруження (ЗН) відіграють дуже важливу роль у цілісності елементів конструкцій, оскільки вони можуть суттєво змінювати механічні властивості матеріалів і, таким чином, впливати на втомну довговічність, деформацію, стабільність розмірів, корозійну стійкість тощо. Вимірювання робочих (діючих) напружень і ЗН стає першочерговим завданням у багатьох галузях промисловості [1–3].

В останні кілька десятиліть все більше досліджень було проведено щодо використання ультразвуку для вимірювання ЗН у матеріалах різноманітних конструкцій та для вимірювання пружно-акустичних констант матеріалів. Численні приклади вимірювань напружень в об'ємних (середніх по товщині) і поверхневих шарах (середніх по товщині) показали, що ультразвукові методи можуть бути використані для неруйнвної оцінки напружень у різних матеріалах, будучи особливо придатними для вимірювання профілів напружень та оцінки розподілу напружень в одній і тій же точці після різних умов обробки [4–9].

Я. Клейман – <https://orcid.org/0000-0003-1011-7504>  
© Я. Клейман, 2025

За останні роки ми досягли значного прогресу в модернізації комплексу UltraMARS, що дає можливість вимірювати робочі та залишкові напруження не тільки в об'ємі (середні по товщині), але й в поверхневих і приповерхневих шарах матеріалів. Використовуючи метод визначення напружень, розроблений Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона (ІЕЗ) [5], ми спроектували апаратну частину та розробили програмне забезпечення, що дозволяє вимірювати всі три типи відбитих ультразвукових сигналів в одній точці неруйнвним методом [6, 10].

У загальному випадку зміна швидкості ультразвукової хвилі в матеріалах під дією напружень становить лише десяті частки відсотка. Тому обладнання для практичного застосування ультразвукового методу для вимірювання ЗН повинно мати високу роздільну здатність і бути повністю комп'ютеризованим. Розроблений комплекс UltraMARS (рис. 1) включає в себе: вимірювальний блок; попередній підсилювач для збудження та прийому відбитих ультразвукових сигналів (REW) перед надсиланням їх у вимірювальний блок для

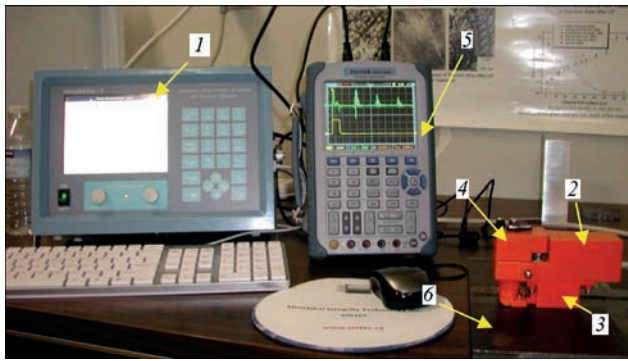


Рис. 1. Ультразвуковий комп'ютеризований комплекс для вимірювання залишкових і прикладених напружень: 1 – вимірювальний блок з програмним забезпеченням; 2 – попередній підсилювач (компонент REW); 3 – магнітний тримач; 4 – перетворювач; 5 – осцилограф (20 МГц); 6 – зразок

подальшої обробки; тримач перетворювача, який може бути як магнітним або електромагнітним, так і механічним; набір змінних ультразвукових перетворювачів, які використовуються для збудження та прийому поздовжніх (XF3) і поперечних (YF12) хвиль, а також для збудження та прийому поверхневих (RF12) і підповерхневих (SF12) хвиль. Осцилограф зазвичай використовується для візуального контролю отриманих відбитих сигналів. Як правило, осцилограф потрібен для вибору та налаштування на відбиту форму сигналу при використанні ручного методу.

Розроблений комплекс UltraMARS дозволяє визначати одно- та двовісні робочі (прикладені) та залишкові напруження в різних матеріалах і конструкціях. У цій статті буде зроблено огляд останніх досягнень у розробці та застосуванні неруйнівного ультразвукового методу вимірювання ЗН у матеріалах і конструкціях, наведено приклади вимірювання напружень у різних матеріалах і конструкціях, а також представлено нові перетворювачі, які знаходяться на різних стадіях розробки, а саме: чотириполюсний перетворювач і перетворювач зі змінною базою для вимірювання напружень на різній глибині в матеріалах.

**Вимірювання залишкових напружень ультразвуковим методом.** Вимірювання ЗН за допомогою ультразвуку базуються на ґрунтовній теорії [11–13] та оригінальній методиці із використанням прецизійних приладів [5, 10, 12]. Можна використовувати ультразвук для вимірювання напружень у матеріалах, оскільки, згідно з акустико-пружною теорією взаємодії ультразвуку з матеріалами, зміна швидкості (або частоти) ультразвуку в матеріалі лінійно залежить від напружень в матеріалах у певному діапазоні напружень (рис. 2). Інтенсивність і характер таких змін можуть варіюватися в залежності від фізичних і механічних властивостей матеріалу. При відомих

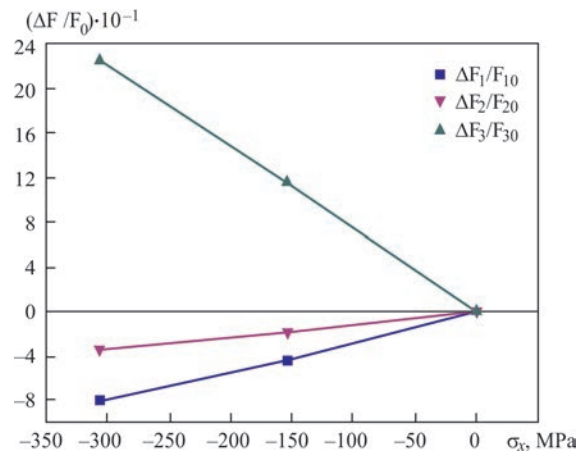


Рис. 2. Зміна швидкостей ультразвукових хвиль у зразку матеріалу під дією прикладених напружень

акустико-пружних властивостях матеріалу визначення напружень зводиться до вимірювання швидкостей (пропорційних частоті) поздовжніх і поперечних хвиль, коли вони поширюються в основних напрямках дії напружень. Акустико-пружні властивості матеріалу входять у рівняння, що пов'язують швидкості поширення ультразвукових хвиль з напруженнями в матеріалі у вигляді коефіцієнтів пропорційності. Вони визначаються константами пружності другого та третього порядків і можуть бути розраховані або виміряні [13, 18, 19].

Для визначення констант пружності використовують контрольні зразки, в яких при одновісному або двовісному навантаженні вимірюється зміна швидкості поздовжніх і поперечних ультразвукових хвиль і проводиться розрахунок акустико-пружних коефіцієнтів на основі цих вимірювань.

Ці вимірювання виконує комплекс UltraMARS, а обчислені значення акустико-пружних коефіцієнтів зберігаються в пам'яті для подальшого розрахунку напружень [3 і посилання на нього]. Похибка вимірювання робочих напружень у пружній області становить ~15 МПа, а для залишкових напружень – ± 0,1σ<sub>r</sub>, де σ<sub>r</sub> – границя міцності матеріалу на розтяг.

Рис. 3–5 наведено як приклади типи інформації про залишкові напруження, які можна отримати за допомогою системи UltraMARS із різними перетворювачами. Зразок, зварений встик (рис. 3), розміром 200×150 мм і завтовшки 12 мм, використовувався для вимірювання ЗН. Розподіл поздовжніх і поперечних ЗН (відповідно паралельних і перпендикулярних до напрямку зварного шва) були виміряні вздовж *Ліній 1* і *2* (рис. 3). Напруження вимірювали починаючи з точки 1 (як позначено на рис. 3) і просуваючись до точки, позначеної як N. Вимірювана точка 1 на *Лінії 1* була розташована на відстані ~ 3 мм від зони сплавлення. Усі вимірювання вздовж *Лінії 2* проводилися на відстані

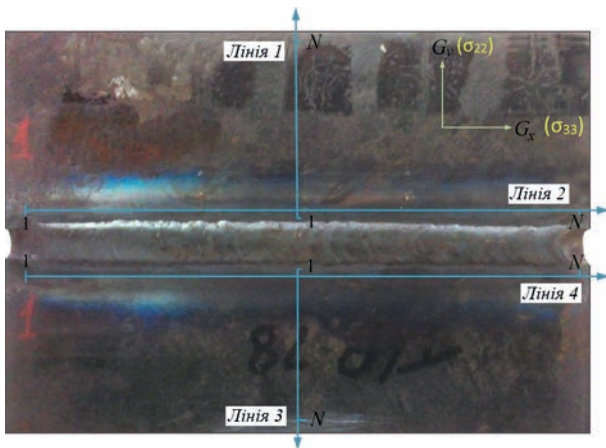


Рис. 3. Зварений зразок (низьковуглецева сталь) з позначеними Лініями 1–4, що вказують на місця проведення вимірювань УЗД

~5 мм від зони сплавлення. Для вимірювання ЗН максимально близько або в самому зварному шві необхідна спеціальна підготовка поверхні зварного шва, яка може передбачати видалення зварного шва або зняття зварювального підсилення.

На рис. 4 представлені результати вимірювання середніх наскрізних ЗН по товщині вздовж Ліній 1 і 2, отримані за допомогою об’ємних перетворювачів. У всіх випадках вимірювалися дві складові ЗН,

$\sigma_{22}$  і  $\sigma_{33}$  (позначені на рисунках як  $\sigma_x$  і  $\sigma_y$  відповідно). У технічній літературі використовуються різні символи для позначення розподілу ЗН і швидкості поширення ультразвукових хвиль [13, 18, 19]. Серед найпоширеніших можна назвати наступні:

- символ  $\sigma_{33}$  (або  $\sigma_x$ ) – позначає головне поздовжнє напруження, яке діє вздовж прикладання зовнішньої сили або вздовж зварного шва (див. рис. 3 і 4);
- символ  $\sigma_{22}$  (або  $\sigma_y$ ) – позначає головне поперечне напруження, яке діє перпендикулярно до прикладеної зовнішньої сили або в напрямку зовнішнього зусилля, або в напрямку, перпендикулярному до зварного шва (див. рис. 3 і 4);
- символ F3 (або F1) – позначає частоту (швидкість поширення  $V_{sx3}$ ) відбитої (знизу) зсувної ультразвукової хвилі, що збуджується та приймається назад Y-подібним п’єзоперетворювачем. Вектор поляризації п’єзоелектричного перетворювача спрямований вздовж дії напруги  $\sigma_{33}$  ( $\sigma_x$ ), а площина, в якій коливаються частинки в елементі, спрямована перпендикулярно до поширення хвилі (вздовж товщини матеріалу);
- символ F2 – позначає частоту (швидкість поширення швидкість поширення  $V_{sx2}$ ) відбитої (донної)

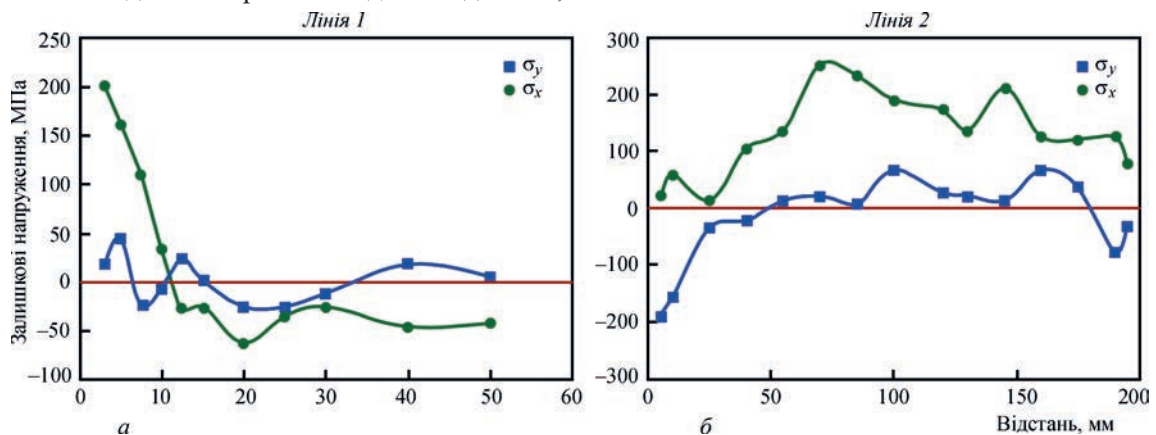


Рис. 4. Розподіл середніх наскрізних по товщині (об’ємні ультразвукові хвилі) залишкових напружень у зразку вздовж Лінії 1 (а) (нормаль до напрямку зварного шва) та вздовж Лінії 2 (б) (вздовж напрямку зварного шва)

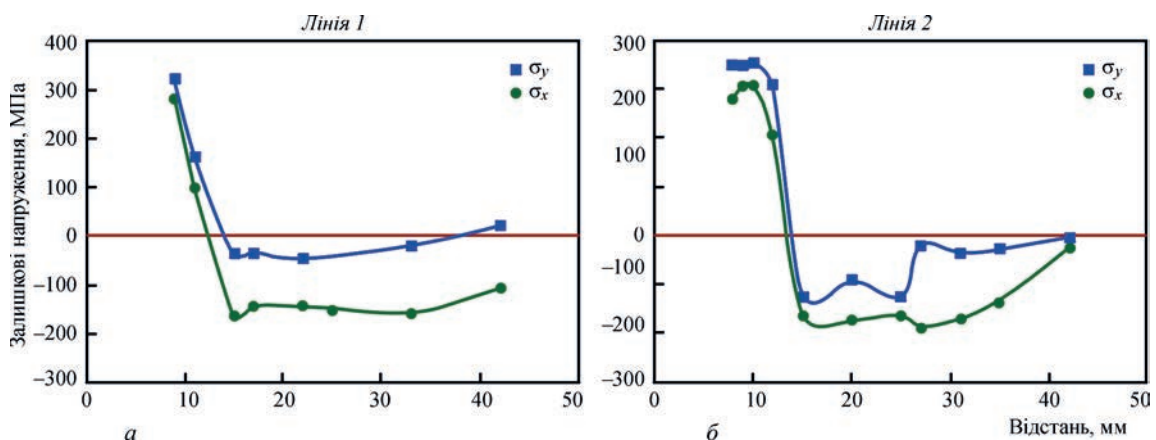


Рис. 5. Розподіл поверхневих залишкових напружень у зразку, виміряних вздовж Лінії 1 за допомогою поверхневого (а) та підповерхневого (б) ультразвукових хвильових перетворювачів (в обох випадках вимірювалися напруження, нормальні до напрямку зварного шва)

зсувної ультразвукової хвилі. Вектор поляризації п'єзоелектричного перетворювача спрямований вздовж дії напруження  $\sigma_{22}$  (або  $\sigma_y$ ) або перпендикулярно до дії напруження  $\sigma_{33}$  (або  $\sigma_x$ ), а площина, в якій коливаються частинки в елементі, спрямована перпендикулярно до поширення хвилі (вздовж товщини матеріалу);

- символ F1 (або F3) – частота (швидкість поширення  $V_{\text{хв}}$ ) відбитої (донної) поздовжньої ультразвукової хвилі, збудженої і прийнятої X-подібним п'єзоперетворювачем. Вектор поляризації п'єзоперетворювача може бути під будь-яким кутом до напрямку напруження  $\sigma_{33}$  (або  $\sigma_x$ ), а частинки в елементі коливаються у напрямку поширення хвилі (вздовж товщини матеріалу).

На рис. 5 показано розподіл поверхневих (а) і підповерхневих (б) ЗН у зразку, виміряних вздовж Лінії 1 за допомогою поверхневого (RF12) та підповерхневого (SF12) ультразвукових хвильових перетворювачів (в обох випадках вимірювалися напруження, нормальні до напрямку зварного шва). Використання поверхневого ультразвукового перетворювача дозволяє вимірювати ЗН у поверхневих шарах матеріалу, причому глибина проникнення для цього застосування становить  $\sim 0,7$  мм (визначено експериментально). Використовуючи підповерхневі перетворювачі, можна вимірювати напруження до глибини  $\sim 6$  мм. Для цього був обраний стандартний перетворювач  $9 \times 4$  мм.

Аналіз отриманих ЗН профілів показав, що результати ультразвукових ЗН у зразку відповідають існуючим уявленням про розподіл УЗК у зварних елементах і конструкціях [14, 15]. При дослідженні ЗН у великомасштабній зварній панелі, призначеній для моделювання конструктивних елементів судна, виявлено гарний збіг між виміряними напруженнями та розрахунками з використанням методом FEA [16, 17].

Нещодавно комплекс UltraMARS був модифікований і доопрацьований, у тому числі впроваджено низку нових технічних рішень, що робить роботу комплексу стабільнішою та зручнішою для користувача. Символи, що позначають основні напруження та частоти, були замінені. Таким чином,  $\sigma_1$  визначає вектор головного напруження, що діє вздовж прикладеної сили до конструкції або зварного шва;  $\sigma_2$  визначає вектор головного напруження, що діє перпендикулярно до сили, прикладеної до конструкції або зварного шва. Символи позначення частот також були також змінені, прив'язавши їх до нових символів напружень. Використання нових електронних елементів дозволило покращити налаштування на хвилю в автоматичному режи-

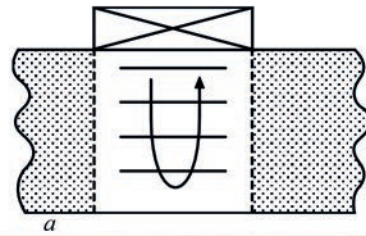


Рис. 6. Принцип вимірювання середніх наскрізних по товщині (об'ємних) напружень (ехо-імпульсних) і перетворювачі для вимірювання поздовжньої та поперечної складових середніх наскрізних товщинних (об'ємних) напружень

мі та підвищити точність ідентифікації прийнятих відбитих сигналів. Також були внесені зміни в розрахунки напружень при використанні поверхневих і підповерхневих хвильових перетворювачів.

**Ультразвукові перетворювачі.** У даний час вимірювання середніх наскрізних по товщині поздовжніх і поперечних ЗН у зразку виконуються (паралельно та перпендикулярно до напрямку зварювання відповідно) у кожній точці двома типами ультразвукових перетворювачів (рис. 6). Щоб збуджувати об'ємні ультразвукові хвилі, використовувалися кварцові п'єзоелектричні пластини з поляризацією векторного Y-розрізу (розрізані вздовж оптичної осі Y) і X-розрізу (вирізані вздовж оптичної осі X) з резонансною частотою 5 МГц. Це оптимальна частота коливань кварцу, на якій механічні ультразвукові коливання реагують на зміни в кристалах матеріалу від напружень і не затухають при відбитті від нижньої поверхні зразка. П'єзоелектричні пластини PZT з резонансною частотою 4 МГц використовуються для збудження та прийому релеївської поверхневої ультразвукової хвилі (рис. 7, а–д). Пластини приклеєні до демпфера, виготовленого з твердого поліамідного матеріалу з хорошою зносостійкістю [20, 21]. Кути розвалу випромінювача та приймача для поверхневої хвилі становлять  $70^\circ$  [20–22]. Демпфер з наклеєними п'єзокерамічними пластинами захищений металевим ковпаком.

Для збудження та прийому в приповерхневих шарах матеріалу використовуються п'єзоелектричні пластини PZT з резонансною частотою 4 МГц. Пластини наклеєні на демпфер з випромінювачем і приймачем кутами клину  $29^\circ$  (рис. 7, в–е) [20–22], що дозволяє отримати максимальну амплі-

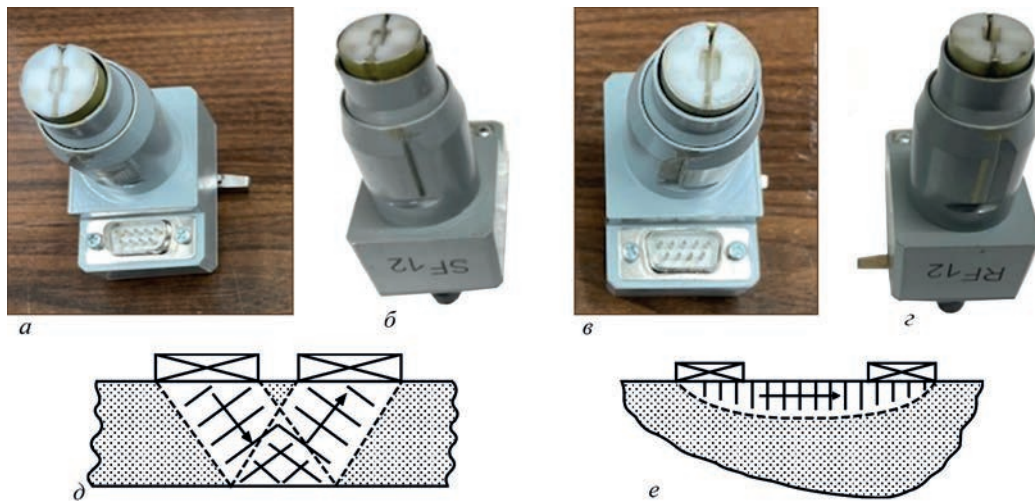


Рис. 7. Принцип вимірювання підповерхневих (а–д) і поверхневих (е–е) напружень (pitch-catch) та перетворювачі для вимірювання двох поперечних компонент напружень

літуду прийнятих ультразвукових хвиль для різних металів. Демпфер з наклеєними п'єзокерамічними пластинами захищений металевим ковпачком.

Для спрощення вимірювань поверхневих і підповерхневих напружень були розроблені чотириполюсні перетворювачі, які, на відміну від двополюсних, дозволяють вимірювання в двох напрямках без повороту головки перетворювача на 90°. Демпфери перетворювача виготовлені шляхом фрезерування із твердого поліамідного блоку, який має хорошу стійкість до стирання. Пластини PZT з резонансною частотою 4 МГц були прикріплені до передавачів і приймачів. Призми передавача та приймача для поверхневої хвилі мають кут 70°, а для підповерхневої – 29°, що дозволяє отримати максимальну амплітуду прийнятих хвиль для різних металів. Передавач і приймач розміщуються один навпроти одного на постійній базовій відстані. Другий комплект передавача–приймача розміщується під кутом 90° до першого. Для зменшення перешкод між передавачем і приймачем у корпусі демпфера зроблено квадратне заглиблення, яке не допускає впливу передавача на приймач. Корпус клапана з п'єзокерамічними пластинами захище-

ний металевим ковпачком. Весь демпфер у зборі вставляється в корпус перетворювача (рис. 8). Для проведення вимірювання чотириполюсний перетворювач вставляється в REW (поз. 3 на рис. 1) приладу UltraMARS-8.

Для перевірки глибини проникнення ультразвукових хвиль для двополюсного та чотириполюсного перетворювачів були виготовлені пластини із різних металів з вирізаними в них канавками. Глибину канавки робили зі зростаючим нахилом у кілька градусів, а до пластини була прикріплена лінійка, яка показувала зміну глибини канавки з відстанню, починаючи з 0 мм і далі, до досягнення товщини металу (рис. 9).

Наразі проводиться дослідження з метою оцінки глибини проникнення поверхневих (RW) і підповерхневих (SW) хвиль у двополюсних і чотириполюсних перетворювачах у сталевих і алюмінієвих пластинах, підготовлених, як описано вище, зі збільшенням нахилу щілин.

Нещодавно було розроблено перетворювач зі змінною базою між випромінювачем і приймачем. На рис. 10 показано розроблений перетворювач зі



Рис. 8. Чотириполюсні перетворювачі для вимірювання поверхневих і підповерхневих напружень

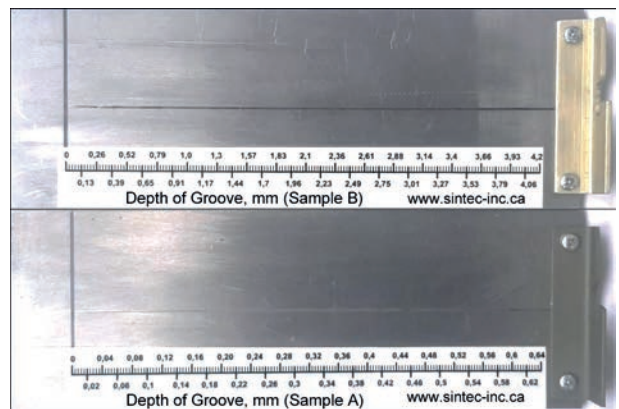


Рис. 9. Пластини із вирізаною щілиною для оцінки глибини поширення ультразвукової хвилі в матеріалах. До пластин прикріплені лінійки з позначеною глибиною щілини

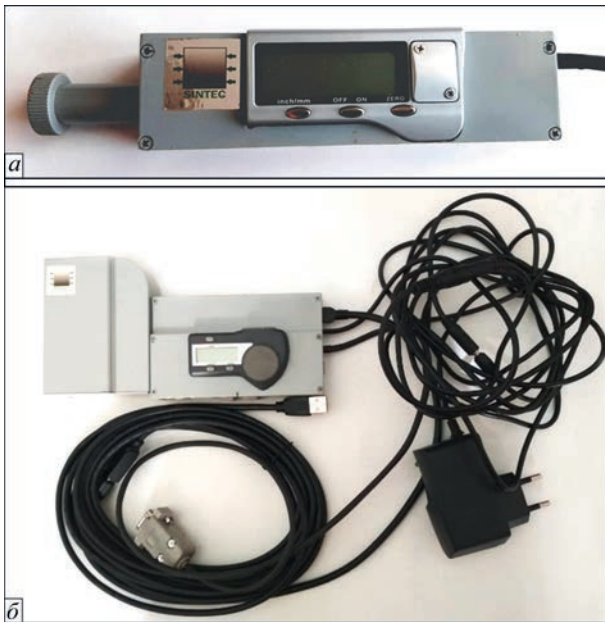


Рис. 10. LCR-перетворювачі зі змінною базою за ручної (а) та механізованої (б) зміни відстані між випромінювачем і приймачем (вид зверху)

змінною базою, який випромінює та приймає по-здовжні критично заломлені (LCR) хвилі. У цьому перетворювачі приймач і передавач можуть переміщатися один відносно одного. Відстань між ними (базу) можна змінювати або вручну, повертаючи ручку на бічній стороні перетворювача (рис. 10, а), або за командою з системи UltraMARS (рис. 10, б). Наразі ведеться робота з розробки програм для збору та обробки даних напружень і керування рухом випромінювача та приймача в перетворювачі. Перетворювач кріпиться до зразка за допомогою постійних магнітів, що забезпечує хороший контакт між перетворювачем і зразком. Мазило для з'єднання використовується для забезпечення ефективної передачі сигналу від кристалів PZT до зразка. У цій конструкції базова відстань між передавачем і приймачем варіюється від 10 до 50 мм.

Змінюючи базову відстань, можна змінювати глибину поширення хвилі LCR, що дозволяє досліджувати різні шари зразка. Кут між передавачем і приймачем було обрано на рівні  $29^\circ$  [20–22], виходячи з максимальної амплітуди прийнятого сигналу для різних металів. Розроблені прототипи наразі проходять різноманітні випробування, результати яких будуть опубліковані пізніше.

## Висновки

На вибраних прикладах було показано, що акустичний метод, який базується на поширенні пружних ультразвукових коливань всередині твердого тіла, може бути ефективно використаний для неруйнівного контролю залишкових напружень у матеріалах. Комплекс UltraMARS був

розроблений і нещодавно модернізований для вимірювання величини та знаку робочих і залишкових напружень, як усереднених по товщині, так і в поверхневих або підповерхневих шарах матеріалів, у лабораторних і польових умовах. Розроблена технологія дозволяє контролювати напруження в металевих елементах конструкцій під час їх виготовлення, ремонту та експлуатації. Вона є також ефективною для оцінки якості зварних з'єднань, після післязварювальних обробок, проведених з метою перерозподілу залишкових напружень.

Чотириполюсний перетворювач був розроблений з метою покращення експлуатаційних характеристик комплексу UltraMARS при контролі напружень на поверхні та в приповерхневих шарах матеріалу, що дозволяє вимірювати швидкість ультразвукових хвиль одночасно в обох ортогональних напрямках без обертання передавача–приймача в перетворювачі на  $90^\circ$ .

Розроблено та виготовлено перетворювач зі змінною базою, який дозволяє вимірювати одновісні наведені залишкові напруження в приповерхневих шарах матеріалів на глибину до  $\sim 10$  мм шляхом зміни базової відстані між випромінювачем і приймачем.

Наразі триває робота із всебічної оцінки нових перетворювачів і розробки методики контролю напружень для перетворювача зі змінною базою.

## Список літератури/References

1. Kleiman, J., Kudryavtsev, Y. (2012) Residual stress management in welding: residual stress measurement and improvement treatments. In: *Proc. of ASME 2012 31<sup>st</sup> Inter. Conf. on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 6: *Materials Technology; Polar and Arctic Sciences and Technology; Petroleum Technology Symp.*, Rio de Janeiro, Brazil, July 1–6, 2012, 73–79. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2012-83177>
2. O'Brien, E. (2002) Crack tip residual stress and structural health monitoring. *Materials Sci. Forum*, **404–407**, 779–784. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.404-407.779>
3. Kleiman, J., Kudryavtsev, Y., Sugihara, H. (2018) Structural health monitoring (SHM) of residual and applied stresses using a non-destructive ultrasonic technique. In: *Proc. of the Twenty-eighth Inter. Ocean and Polar Engineering Conf.*, Sapporo, Japan, June 10–15, 2018, 1372–1376. ISBN: 978-1-880653-87-6
4. Bray, D.E. (2002) Ultrasonic stress measurement in pressure vessels, piping and welds. *J. of Pressure Vessel Technology*, **124(3)**, August, 326–335. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1480825>
5. Гуца О.Й., Кот В.Г., Сміленко В.М., Бродовий В.О. (2011) Акустичний спосіб контролю підповерхневих напружень в твердих середовищах. Патент на винахід UA93297 Україна, МПК G01N 29/04 (2006.01). № а200907056; заявл. 06.07.2009; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1. Huscha, O.Y., Kot, V.H., Smilenko, V.M., Brodovyi, V.O. (2011) Acoustic method for control of sub-surface stresses in solid media. Patent 93297 UA, Int. Cl. G01N 29/04, fill.06.07.2009; publ. 10.01.2011 [in Ukrainian].

6. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Gushcha, O. (2000) Residual stress measurement in welded elements by ultrasonic method. In: *Proc. of IX Inter. Cong. on Experimental Mechanics, Orlando, Florida, USA, June 5–8, 2000*, 954–957.
7. Rollins, F.R.Jr., Kobett, D.R., Jons, CMJ J.L. (1963) *Study of ultrasonic methods for nondestructive measurement of residual stress*: Technical Documentary Report, WA DD-TR-61-42, Pt II, January, 1–38.
8. Schneider, E. (2009) Evaluation of stress states of components using ultrasonic and micro magnetic techniques. In: *Proc. of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conf., PVP2009, July 26–30, 2009, Prague, Czech Republic*, 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1115/PVP2009-77219>
9. Uzun, F., Bilge, A.N., (2011) Investigation of total welding residual stress by using ultrasonic wave velocity variations. *GU J. Sci.*, 24(1), 135–141.
10. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Gushcha, O. et al. (2004) Ultrasonic technique and device for residual stress measurement. In: *Proc. of X Inter. Cong. and Exposition on Experimental and Applied Mechanics, Costa Mesa, California USA, June 7–10, 2004*, 1–7.
11. Hughes, D.S., Kelly, J.L. (1953) Second-order elastic deformation of solids. *Phys. Rev.*, 92(5), 1145–1149. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.92.1145>
12. Murnaghan, T.D. (1951) *Finite deformation of an elastic solid*. John Wiley, New York.
13. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуща О.И. (1977) Введение в акустопругость. Киев, Наукова думка.  
Guz, A.N., Makhort, F.G., Gushcha, O.I. (1977) *Introduction to acoustoelasticity*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
14. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Gushcha, O. (2000) Ultrasonic measurement of residual stresses in welded railway bridge. In: *Proc. of NDT Conf. on Structural Materials Technology, Atlantic City, NJ., February 28–March 3, 2000*, 213–218.
15. Bate, S.K., Green, D., Buttle, D. (1997) *A review of residual stress distributions in welded joints for the defect assessment of offshore structures*: HSE Books, OTH 482.
16. Polezhayeva, H., Kang, J.-K., Lee, J.-H. et al. (2010) A study on residual stress distribution and relaxation in welded components. In: *Proc. of the Twentieth Inter. Offshore and Polar Eng. Conf., Beijing, China, June 20–25, 2010*, 282–289.
17. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Polezhayeva, H. (2011) Ultrasonic measurement of residual stresses in welded elements of ship structure. In: *Proc. of Integrating Simulation and Experimentation for Validation (ISEV) on Inter. Conf. on Advances in Experimental Mechanics, Edinburgh, Scotland, September 7–9, 2011*. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.70.273>
18. Гуща О.И. (1994) Анализ неоднородных полей остаточных напряжений в сварных соединениях. Автоматич. сварка, 7–8, 3–5.  
Gushcha, O.I. (1994) Non-destructive analysis of inhomogeneous fields of residual stresses in welded joints. *Автоматич. Сварка*, 7–8, 3–5 [in Russian].
19. Гуща О. Й., Махорт Ф. Г. (1995) Применение акустического метода определения остаточных напряжений в сварных конструкциях. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 8–15.  
Gushcha, O.I., Makhort, F.G. (1995) Application of the acoustic method for determining residual stresses in welded structures. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, 4, 8–15 [in Russian].
20. Ермолов, И.Н., Разыграев, Н.П., Щербинский, В.Г. (1978) Использование акустических волн головного типа для ультразвукового контроля. *Дефектоскопия*, 1, 33–40.  
Ermolov, I.N., Razygraev, N.P., Shcherbinsky, V.G. (1978) The use of head-type acoustic waves for ultrasonic testing. *Defectoscopy*, 1, 33–40 [in Russian].
21. Razygraev, N.P. (2003) Head waves in non-destructive testing of metal structures. *World of Non-Destructive Testing*, 22(4), December.
22. Viktorov, I.A. (1966) *Physical foundations for the use of Rayleigh and Lamb ultrasonic waves in technology*, Science. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-5681-1>

## UltraMARS SYSTEM FOR NON-DESTRUCTIVE MEASUREMENT OF RESIDUAL STRESSES: NEW DEVELOPMENTS

J. Kleiman

Structural Integrity Technologies, Inc. (Sintec) Markham, Ontario, Canada. E-mail: [jkleiman@itlinc.com](mailto:jkleiman@itlinc.com)

One of the effective methods for non-destructive testing of residual and operating stresses is the acoustic method that is based on the propagation of elastic ultrasonic vibrations inside a solid body. A portable complex for measurement of applied and residual stresses in solid materials using an acoustic non-destructive stress control method was developed in the early 2000 by a team of scientists from Integrity Testing Laboratory, Sintec and E.O. Paton Electric Welding Institute (PWI). An advanced complex UltraMARS was developed based on the early prototype that allows measuring the magnitude and the sign of operating and residual stresses in laboratory and field conditions, either averaged through thickness, or in surface and subsurface layers, as well as monitoring stresses in metal structural elements during their manufacture, repair and operation. It is effective in assessing the quality of welded joints, after post-weld treatments carried out in order to redistribute residual stresses. It has been successfully used in various applications in marine, aerospace, construction and other industries. A four-pole transducer has been developed to improve the operational characteristics of the UltraMARS complex in monitoring stresses on the surface and in the near-surface layers of the material. It differs from the used two-pole transducers of the surface wave (Surface-Rayleigh Wave – Transducer RF12) and subsurface wave (Subsurface – Transducer SF12) in having two transmitter-receiver pairs located at 90° to each other. This change allowed measuring the velocity of ultrasonic waves simultaneously in both orthogonal directions without rotating the transmitter-receiver by 90°. To use these transducers with the UltraMARS complex, a transmitter-receiver switching program has been developed. A transducer with a variable pole distance was also developed for measurement of residual stresses in the near-surface layers of materials, making it possible to determine the uniaxial induced stresses to a depth from 0 to 8...10 mm by changing the base distance between the emitter and receiver. At the moment, a stress control technique is being developed. 22 Ref., 10 Fig.

*Keywords: residual stresses, non-destructive ultrasonic measurement of residual stresses, UltraMARS, variable base transducer, 4-pole transducer*

Отримано 28.04.25

Отримано у переглянутому вигляді 16.07.25

Прийнято 27.11.25