

# УДОСКОНАЛЕННЯ НЕРУЙНІВНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ІЗ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

М.О. Пашин, В.Г. Кот, О.Л. Міходуй, Є.Д. Пекар, О.О. Храмков, Д.М. Кражановський

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: svarka2000@ukr.net

Запропоновано заходи, що направлені на вдосконалення ультразвукового методу (УЗ-хвиль) визначення залишкових зварювальних напружень (ЗЗН), які базуються на умові «рівноваженості» епюр стиску та розтягу ЗЗН. Це, на відміну від традиційного застосування методу УЗ-хвиль, дозволяє використовувати останній для визначення ЗЗН розтягу в зоні пластичних деформацій. Розроблено умови реалізації методу з урахуванням особливостей формування напружено-деформованого стану зварних з'єднань із низьколегованих і низьковуглецевих сталей, які можуть бути застосовані для експрес-визначення ЗЗН у натурних конструкціях. Проведено апробацію удосконаленого методу при визначенні компоненти  $\sigma_x$  ЗЗН уздовж зварного шва в зразку стикового з'єднання із низьковуглецевої сталі 09Г2С завтовшки 12 мм. Верифікацію результатів розподілу  $\sigma_x$  отриманих методом УЗ-хвиль, проводили на базі електронної спекл-інтерферометрії (ESPI). Встановлено задовільну достовірність отриманих значень ЗЗН розтягу в зоні шва зварних з'єднань дослідного зразка. Отримані результати можуть бути застосовані при розробленні експрес-методики визначення ЗЗН у натурних зварних конструкціях у процесі їхнього виготовлення та експлуатації. Бібліогр. 11, рис. 4.

*Ключові слова:* залишкові зварювальні напруження, ультразвуковий метод (УЗ-хвиль), електронна спекл-інтерферометрія (ESPI), зразок стикового з'єднання, епюри стиску та розтягу, поздовжня компонента напружень, низьколегована сталь, метод визначення напружень, рівноваженість епюр напружень

**Вступ та актуальність роботи.** Залишкові зварювальні напруження (ЗЗН), що виникають у зварних з'єднаннях, негативно впливають на точність, довговічність та корозійну стійкість конструкцій. Для сучасного виробництва актуальною є проблема моніторингу ЗЗН у конструкціях як на стадії їх виготовлення, та і в процесі експлуатації. Це спонукає до розробки надійних і простих у використанні неруйнівних методів визначення ЗЗН [1]. У сучасній науці та виробництві використовуються такі неруйнівні методи оцінки ЗЗН як: рентгівівський, магнітний, ультразвуковий (УЗ-хвиль), електроімпульсний [2, 3].

Метод УЗ-хвиль забезпечує визначення мембранних ЗЗН, тобто таких, що є усередненими по товщині металу [4]. При цьому результати вимірювання пружних напружень методом УЗ-хвиль є достовірними за умови відсутності пластичних деформацій на дослідній ділянці [1]. Також метод УЗ-хвиль є неруйнівним і досить простим у реалізації. Тому його використання для експрес-моніторингу ЗЗН у натурних зварних конструкціях (за умови виключення негативного впливу залишкових пластичних деформацій від зварювання) є актуальним завданням інженерної практики.

**Основні положення та мета роботи.** Як відомо, особливістю ЗЗН є наявність епюр розтягу

та стиску, які мають рівні площі, тобто взаємно «урівноважені» (рис. 1, а, в). При цьому, якщо на ділянці стиску має місце виключно пружний стан, то на ділянці розтягу – пружно-пластичний, який є наслідком формування залишкових пластичних деформацій  $\epsilon_{пл}$  стиску металу зварного з'єднання (рис. 1, а, б). Формування  $\epsilon_{пл}$  є результатом усадкового скорочення металу шва при його вистиганні, а наявність  $\epsilon_{пл}$  вносить похибку в значення пружно-акустичного коефіцієнта пропорційності (ПАКП), на застосуванні якого базується метод УЗ-хвиль. При наближенні до центру шва значення  $\epsilon_{пл}$  різко зростають (рис. 1, б). Це збільшує похибку значень ПАКП при наближенні до центру шва та ускладнює отримання достовірних значень ЗЗН розтягу в зварному шві методом УЗ-хвиль. Враховуючи наведене вище, достовірність результатів оцінювання ЗЗН розтягу в зварному шві та на лінії сплавлення методом УЗ-хвиль є дискусійним питанням. Це можна бачити на прикладі вимірювання ЗЗН у зварних з'єднаннях із алюмінієвого сплаву АМг6 методом УЗ-хвиль [1]. Таким чином, застосування УЗ-хвиль для коректного визначення ЗЗН розтягу є доцільним за умови урахування впливу  $\epsilon_{пл}$ .

На відміну від ЗЗН розтягу, ЗЗН стиску мають суттєво менший градієнт і розподілені на ділянці поперечного перерізу зварного з'єднання, де відсутні  $\epsilon_{пл}$  [5, 6] (рис. 1, в). Тобто при вимірюванні ЗЗН стиску методом УЗ-хвиль на результати їх оцінювання виключено негативний вплив  $\epsilon_{пл}$ . Та-

Авторське право © Автор(и)  
 © Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026  
 Це стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

ким чином, застосовуючи даний метод, можна із заявленою точністю [1, 2] визначити розподіл ЗЗН стиску, які при наближенні до шва досягають нульового значення з наступним переходом у розтяг [7, 8] (рис. 1, в).

Якщо розглядати напівширину зварного з'єднання з урахуванням умови «врівноваженості» епюр, то площа епюри стиску має дорівнювати площі епюри розтягу. Епюра поздовжньої (вздовж шва) компоненти  $\sigma_x$  ЗЗН розтягу в зварному з'єднанні із низьколегованих сталей має геометричну форму трапеції (рис. 1, в, крива 1), яку (враховуючи високий градієнт  $\sigma_x$  ЗЗН розтягу) можна (при експрес-оцінці) навести у формі прямокутника (рис. 2), на відміну від сплавів на основі Al, де  $\sigma_x$  ЗЗН розтягу мають складніший характер (рис. 1, в, крива 2).

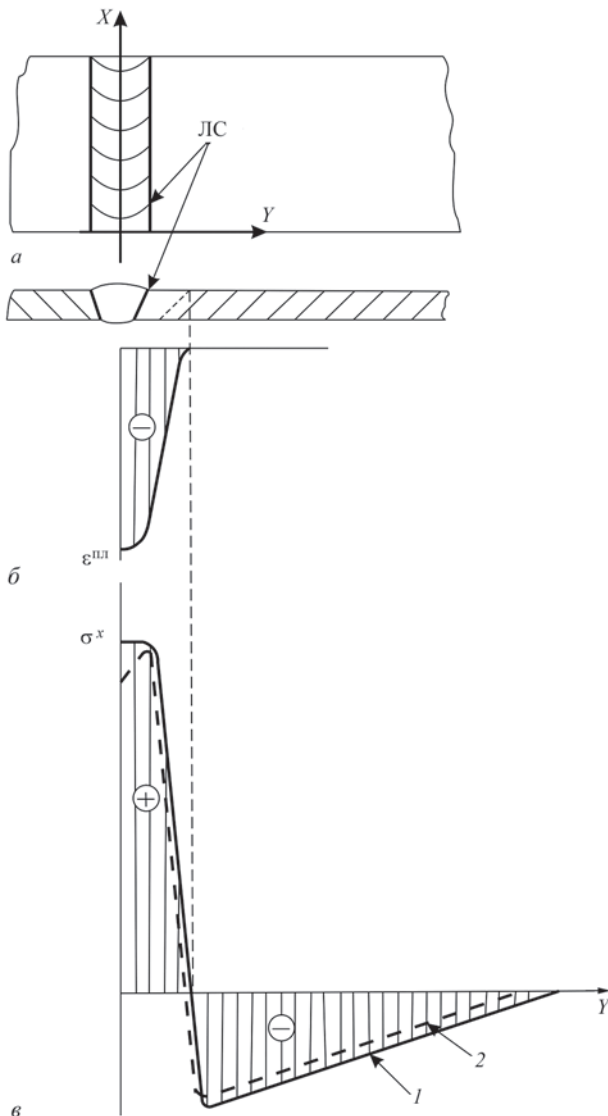


Рис. 1. Залишкові зварювальні напруження (ЗЗН): а – схема зварного з'єднання (ЗЗ), де  $X$  і  $Y$  – напрямки компонент ЗЗН, ЛС – лінія сплавлення; б – розподіл пластичних деформацій  $\epsilon_x^{pl}$  у ЗЗ; в – типові форми епюр поздовжньої компоненти  $\sigma_x$  ЗЗН, де 1 –  $\sigma_x$  у ЗЗ із низьколегованих сталей, 2 –  $\sigma_x$  у ЗЗ зі сплавів на основі Al

Знаючи площу  $S4$  епюри  $\sigma_x$  ЗЗН стиску (рис. 2) за умови  $S3 = S4$ , де  $S3$  – площа епюри ЗЗН розтягу (у формі прямокутника), можна визначити розподіл ЗЗН розтягу в зварному з'єднанні із низьколегованої (низьковуглецевої) сталі виключно застосуванням методу УЗ-хвиль із урахуванням умови «врівноваженості» епюр ЗЗН стиску та розтягу.

Також методом УЗ-хвиль можна із заявленою точністю [1, 2] визначити розмір ділянки  $AB$  на осі  $Y$  (рис. 2), де діють ЗЗН стиску і, відповідно, розмір ділянки  $OA$ , де діють ЗЗН розтягу. Достовірність отримання методом УЗ-хвиль значення  $AB$  базується на тому факті, що на даній ділянці відсутній вплив  $\epsilon_{pl}$  на ПАКП.

Із дотриманням розглянутих вище положень запропоновано експрес-методику неруйнівного визначення ЗЗН методом УЗ-хвиль, яка може бути застосована до зварних з'єднань із низьколегованих і низьковуглецевих сталей. Дана експрес-оцінка дозволяє швидко провести неруйнівне визначення ЗЗН не тільки в зразках зварних з'єднань, але й в натурних конструкціях [9].

**Мета роботи** – розробка експрес-методики неруйнівної оцінки мембранних ЗЗН, яка базується на застосуванні методу УЗ-хвиль за умови «врівноваженості» епюр стиску та розтягу. У даній роботі розглядали визначення поздовжньої компоненти  $\sigma_x$  ЗЗН, але розроблена методика може бути застосована й для визначення поперечної (по нормалі до шва) компоненти ЗЗН –  $\sigma_y$ .

**Опис етапів реалізації методики.** При застосуванні експрес-методики приймаються наступні допущення:

1. Значення ЗЗН у зоні розтягу є однаковими від точки  $O$  до точки  $A$  – переходу ЗЗН від стиску до розтягу (рис. 2).
2. Епюра ЗЗН розтягу має геометричну форму прямокутника  $AODE$ .

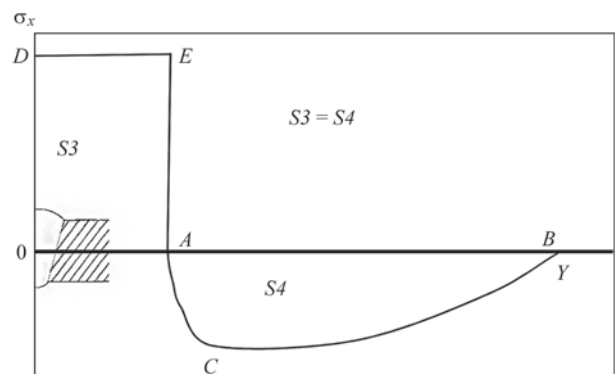


Рис. 2. Епюра мембранних ЗЗН, де  $S3$  і  $S4$  – площі епюр розтягу та стиску відповідно, відрізки  $OD$  і  $OA$  – значення максимальних мембранних ЗЗН розтягу та довжина ділянки дії напружень розтягу відповідно [9]

3. Висота  $OD$  прямокутника  $AODE$  дорівнює максимальному значенню ЗЗН розтягу.

Значення ЗЗН розтягу визначається із застосуванням методики [9] у наступній послідовності:

1. Методом УЗ-хвиль визначається розподіл ЗЗН (у поперечному перерізі на ділянці дії напружень стиску (вздовж лінії  $AB$ )) на осі  $Y$  (рис. 2).

2. Із застосуванням, наприклад, середовища PTC MathCad розраховується значення площі епюри  $S4$  стиску (рис. 2) наступним чином [10]:

2.1. Проводиться інтерполяція нормованих даних локалізованою поліноміальною регресією (функція loess, параметр span = 0,75);

2.2. Чисельно інтегрується отримана функція для значень  $\sigma_t < 0$ ;

3. Приймали, за умови «врівноваженості» епюр, рівність площ  $S3$  і  $S4$  (рис. 2):  $S3 = S4$  (1).

Тоді для прямокутника  $AODE$  справедливим є вирази (2) і (3):  $OD \cdot AO = S4$  (2);  $OD = S4 / AO$  (3), де значення  $OD$  висоти прямокутника  $AODE$  дорівнює максимальній величині поздовжньої компоненти  $\sigma_x$  ЗЗН розтягу (рис. 2).

**Методика досліджень.** Визначали достовірність методики при оцінюванні ЗЗН, де об'єктом досліджень був модифікований метод УЗ-хвиль. В якості предмета досліджень використовували зразок зварного стикового з'єднання пластин із низьколегованої сталі 09Г2С ( $\sigma_{0,2} = 345$  МПа) загальними розмірами  $255 \times 200 \times 12$  мм (рис. 3).

З'єднання (рис. 3) виконували ручним механізованим зварюванням із застосуванням порошко-

вого дроту марки ППС-АН1 на режимі при напрузі, струмі та швидкості процесу відповідно  $U_{зв} = 30$  В,  $I_{зв} = 180$  А і  $V_{зв} = 2,2$  мм/с. Проводили визначення компоненти  $\sigma_x$  ЗЗН на ділянці центрального поперечного перерізу зразка методом УЗ-хвиль. Рух давача УЗ-хвиль по поверхні пластини з боку кореня шва здійснювали у напрямках, що вказані стрілками 12 і 13 на рис. 3.

**Результати досліджень та їх обговорення.** На рис. 4 наведено розподіл  $\sigma_x$  ЗЗН вздовж лінії 13 на рис. 3. Слід зазначити, що характеристики ЗЗН стиску вздовж ліній 12 і 13, які визначені методом УЗ-хвиль, є аналогічними, тому в подальшому розглядали виключно ЗЗН вздовж лінії 13. За умови «врівноваженості» епюр площа  $S4$  зони стиску, що є ділянкою, яку окреслено прямою  $AB$  на осі  $Y$  і кривою  $ACB$ , дорівнює площі  $S3$  епюри розтягу, яка має форму прямокутника  $ODEA$ . Умова рівності площ  $S3$  і  $S4$  дозволяє визначити висоту  $OD$  прямокутника  $ODEA$ , яка дорівнює величині  $\sigma_x$  розтягу ЗЗН. Таким чином, маючи величину площі  $S4$  і дотримуючись умови  $S3 = S4$ , із використанням середовища PTC MathCad розраховували значення  $\sigma_x$  ЗЗН розтягу в дослідному зразку (рис. 3), яке не перевищує 280 МПа.

Верифікацію результатів, отриманих методом УЗ-хвиль, здійснювали методом електронної спекл-інтерферометрії (ESPI), що базується на пружному розвантаженні напружень у результаті висвердлювання отворів діаметром та глибиною відповідно 1,0 і 0,5 мм на поверхнях дослідних

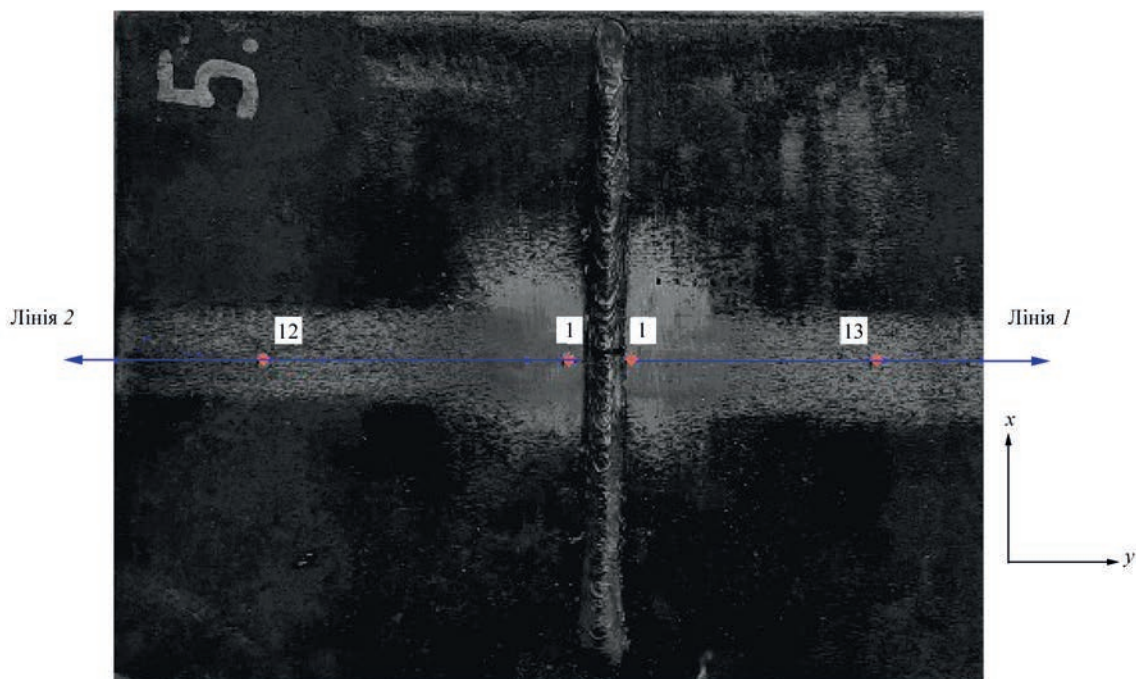


Рис. 3. Зовнішній вигляд зразка стикового з'єднання пластин зі сталі 09Г2С, де стрілками 12 і 13 показано напрямок реєстрації компоненти  $\sigma_x$  ЗЗН із застосуванням методу УЗ-хвиль, осі  $X$  і  $Y$  – напрямки компонент ЗЗН

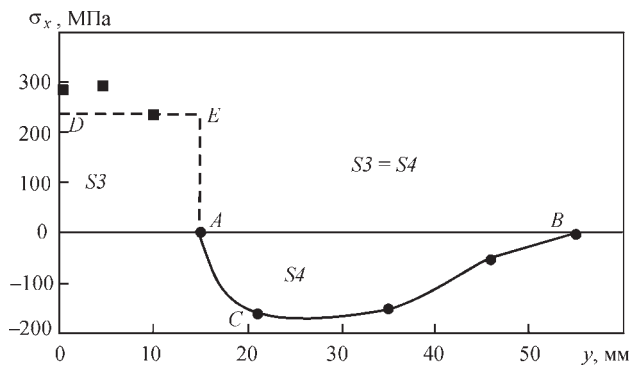


Рис. 4. Розподіл компоненти  $\sigma_x$  ЗЗН у зразку зварного з'єднання зі сталі 09Г2С (рис. 3), де ● – метод УЗ-хвиль, ■ – ESPI метод, S3 і S4 – відповідно площі епюр розтягу та стиску ЗЗН, точки A, B, C, D, E – пояснення в тексті

зразків [11]. Значення  $\sigma_x$  ЗЗН отримували з обох боків пластини вздовж лінії 13 на рівновіддалених ділянках біля центру шва. Мембранні  $\sigma_x$  розраховували як усереднені по товщині значення  $\sigma_x$  у рівновіддалених від центру шва точках, які були отримані на зовнішній і зворотній поверхнях зразка. Можна бачити, що значення мембранних  $\sigma_x$ , отриманих в околі точок D (центр шва) та E (навколо шва) дорівнюють 287 і 285 МПа відповідно, що задовільно узгоджується з розрахованими на умові «врівноваженості» епюр (лінія DE).

Таким чином, при порівнянні значень  $\sigma_x$  ЗЗН, отриманих методами УЗ-хвиль і ESPI, можна бачити задовільне узгодження результатів, отриманих обома методами на ділянці біля шва (рис. 4). Визначення ЗЗН на базі УЗ-методу за умови рівності площ – «врівноваженості» епюр стиску та розтягу може бути використано для неруйнівної діагностики напружених станів натурних зварних конструкцій із низьколегованих сталей.

### Висновки

1. Розроблено методику неруйнівного визначення ЗЗН у зварних з'єднаннях із низьколегованих сталей, яка базується на застосуванні УЗ-методу при дотриманні умові «врівноваженості» епюр ЗЗН стиску та розтягу.

2. Встановлено, що значення ЗЗН розтягу біля центру зварного з'єднання низьколегованої сталі 09Г2С, отримані УЗ-методом, є близькими до величин ЗЗН, що визначені методом електронної спекл-інтерферометрії (ESPI), який узятो в якості еталонного.

3. Встановлено, що визначення ЗЗН на базі УЗ-методу за умови рівності площ – «врівноваженості» епюр стиску та розтягу може бути використано для неруйнівної діагностики напружених станів натурних зварних конструкцій із низьколегованих сталей.

### Список літератури

1. Гузь А.Н. (1986) *Упругие волны в телах с начальными напряжениями. Т. 2. Закономерности распространения*. Киев, Наукова думка.
2. Касаткин Б.С. и др. (1981) *Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений*. Киев, Наукова думка.
3. Lobanov, L.M., Savitsky, V.V., Shutkevych, O.P., Shyan, K.V., Kyanets, I.V. (2024) Nondestructive method of residual stress determination in welded joints based on application of high-density current pulses and speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, 1, 51–56. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.01.08>
4. Луценко Т.М. (20232) Нові системи та технології неруйнівного контролю для промисловості України за поточних умов. *Тези допов. наук. конф. «Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України»*. Під ред. О.Т. Зельніченка. Київ, Міжнародна Асоціація «Зварювання», с. 66.
5. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуща О.Й. (1977) *Введение в акустоупругость*. Киев, Наукова думка.
6. Гуща О.Й., Махорт Ф.Г. (1995) Применение акустического метода определения остаточных напряжений в сварных конструкциях. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 4, 8–15.
7. Винокуров В.А. (1968) *Сварочные деформации и напряжения. Методы их устранения*. Москва, Машиностроение.
8. Masubuchi, K. (1980) *Analysis of welded structures*. Pergamon Press.
9. Лобанов Л.М., Книш В.В., Пашин М.О., Кот В.Г., Миходуй О.Л., Пекар Є.Д., Луи Huang, Альошин А.О. (2023) Неруйнівне визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях на базі поєднання ультразвукового методу та електронної спекл-інтерферометрії. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 2, 22–27. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.02.01>
10. PTS Math Prime. <https://www.mathcad.com/>
11. Лобанов Л.М., Пивторак В.А., Савицкий В.В., Ткачук Г.И. (2006) Методика определения остаточных напряжений в сварных соединениях и элементах конструкций с использованием электронной спекл-интерферометрии. *Автоматическая сварка*, 1, 25–30.

### References

1. Guz, A.N. (1986) *Elastic waves in bodies with initial stresses. Vol 2. Patterns of propagation*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
2. Kasatkin B.S. et al. (1981) *Experimental methods for studying deformations and stresses*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
3. Lobanov, L.M., Savitsky, V.V., Shutkevych, O.P., Shyan, K.V., Kyanets, I.V. (2024) Nondestructive method of residual stress determination in welded joints based on application of high-density current pulses and speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, 1, 51–56. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.01.08>
4. Lutsenko, T.M. (20232) New systems and technologies of non-destructive testing for Ukrainian industry under current conditions. In: *Abstr. of papers of the scientific conf. on Welding and Technical Diagnostics for the Recovery of Ukraine's Economy*. Ed. by O.T. Zelnichenko. Kyiv, IAW, 66 [in Ukrainian].
5. Guz, A.N., Makhort, F.G., Gushcha, O.Y. (1977) *Introduction to Acoustoelasticity*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
6. Guscha, O.Y., Makhort, F.G. (1995) Application of the acoustic method for determining residual stresses in welded structure. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, 4, 8–15 [in Russian].
7. Masubuchi, K. (1980) *Analysis of welded structures*. Pergamon Press.
8. Lobanov, L.M., Knysh, V.V., Pashchin, M.O., Kot, V.G., Mikhodui, O.L., Pekar, Ye.D., Luyi Huang, Alyoshyn, A.O. (2023) Nondestructive evaluation of residual stresses in welded joints on the base of a combination of ultrasonic

- testing and speckle-interferometry. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, 2, 22–27 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2023.02.01>
9. PTS Math Prime. <https://www.mathcad.com/>
10. Lobanov, L.M., Pivtorak, V.A., Savitsky, V.V., Tkachuk, G.I. (2006) Procedure for determination of residual stresses in welded joints and structural elements using electron speckle-interferometry. *The Paton Welding J.*, 1, 24–29.

## IMPROVEMENT OF NON-DESTRUCTIVE ULTRASOUND METHOD FOR DETERMINING RESIDUAL STRESSES IN WELDED JOINTS MADE OF LOW-ALLOY STEELS

M.O. Pashchin, V.G. Kot, O.L. Mikhoduy, E.D. Pekar, O.O. Khramkov, D.M. Krazhanovskyi

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [svarka2000@ukr.net](mailto:svarka2000@ukr.net)

Measures are proposed aimed at improving the ultrasonic method (ultrasonic waves) for determining residual welding stresses (RWS), which are based on the condition of ‘equilibrium’ between the compression and tension diagrams of RWS. This, unlike the traditional application of the US wave method, allows the latter to be used to determine tensile RSW in the plastic deformation zone. The conditions for implementing the method have been developed, taking into account the peculiarities of the stress-strain state of welded joints of low-alloy and low-carbon steels, which can be used for rapid determination of RWS in full-scale structures. The improved method has been tested in determining the  $\sigma_x$  component of RWS along a weld in a sample of a butt joint made of low-carbon steel 09G2S with a thickness of 12 mm. Verification of  $\sigma_x$  distribution results obtained by the ultrasonic wave method was carried out using electronic speckle interferometry (ESPI). The satisfactory reliability of the obtained values of tensile strength in the weld zone of the test sample welded joints was established. The results obtained can be used in the development of an express method for determining RWS in full-scale welded structures during their manufacture and operation. 11 Ref., 4 Fig.

*Keywords: residual welding stresses, ultrasonic method (US waves), electronic speckle interferometry (ESPI), butt joint sample, compression and tension diagrams, longitudinal stress component, low-alloy steel, stress determination method, stress diagram equilibrium*

### ORCID

Пашин М.О. – <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>, Кот В.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4759-9992>,  
 Міходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>, Пекар Є.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-5025-4445>,  
 Храмков О.О. – <https://orcid.org/0009-0003-1664-8362>, Д.М. Кражановський – <https://orcid.org/0000-0001-7292-7188>

### КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

### АВТОР ДЛЯ ЛІСТУВАННЯ

М.О. Пашин

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11 E-mail: [paschyn\\_m@ukr.net](mailto:paschyn_m@ukr.net)

### РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

М.О. Пашин, В.Г. Кот, О.Л. Міходуй, Є.Д. Пекар, О.О. Храмков, Д.М. Кражановський (2026) Удосконалення неруйнівного ультразвукового методу визначення залишкових напружень у зварних з'єднаннях із низьколегованих сталей. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, 01, 3–7. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2026.01.01>

### ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk>

Отримано 17.09.2025

Отримано у переглянутому вигляді 05.12.2025

Підписано до друку 10.04.2026

Оприлюднено 23.04.2026

November 2026

**NDT**online 

Free • Online • On-demand

Organized by

**NDT**net 

**International Online Conference on  
 Nondestructive Testing 2026**