

НЕРУЙНІВНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ НА БАЗІ ПОЄДНАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ ТА ЕЛЕКТРОННОЇ СПЕКЛ-ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

Л.М. Лобанов¹, В.В. Книш¹, М.О. Пашин¹, В.Г. Кот¹, О.Л. Міходуй¹, Є.Д. Пекар¹,
Luyi Huang², А.О. Альошин³

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: svarka2000@ukr.net

²Zhejiang Special Equipment Research Institute. 211 Kaixuan Road, Hangzhou, China. E-mail: yuxf@zjtj.org

³ТОВ «Зовнішньоекономічне представництво Китайсько-українського Інституту зварювання ім. Є.О. Патона». 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: ft.cupiw.pwi@gmail.com

Встановлено, що поєднання переваг ультразвукового методу та електронної спекл-інтерферометрії при усуненні їх недоліків є підставою для розробки методу неруйнівного визначення залишкових зварювальних напружень у натурних конструкціях. Розроблено методику неруйнівного визначення розподілу залишкових зварювальних напружень розтягу в зоні шва стикового з'єднання, яка базується на сумісному застосуванні ультразвукового методу і електронної спекл-інтерферометрії та дотриманні умови «рівності площ» епюр зрівноважених залишкових напружень стиску та розтягу. Методику запропоновано для використання на зразках однопрохідних зварних з'єднань тонколистових конструкцій з металевих матеріалів зі стабільною структурою. Предметом дослідження є залишкові зварювальні напруження у зразку стикового з'єднання зі структурно стабільного алюмінієвого сплаву 1561, який було виконано зварюванням MIG. Проведено оцінювання поздовжньої по відношенню до зварного шва компоненти σ_x залишкових зварювальних напружень на центральній ділянці пластини. Встановлено, що розходження значень залишкових зварювальних напружень біля центру зварного з'єднання алюмінієвого сплаву 1561 становить близько $0,1\sigma_{0,2}$ для даного матеріалу, що відповідає заявленій точності методів. За результатами досліджень запропоновано низку методик неруйнівного визначення залишкових зварювальних напружень у натурних зварних конструкціях на базі поєднання ультразвукового методу та електронної спекл-інтерферометрії. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: залишкові зварювальні напруження, ультразвуковий метод (УЗ-метод), електронна спекл-інтерферометрія (ESPI-метод), зразок стикового з'єднання, зварювання MIG, напруження стиску та розтягу, поздовжня компонента напружень, алюмінієвий сплав, методика неруйнівного визначення напружень

Вступ. Актуальність та мета роботи. Залишкові зварювальні напруження (ЗЗН), що виникають після зварювання в елементах конструкцій, є одним з факторів, які визначають міцність, надійність і довговічність виробів. Для інженерної практики традиційно актуальною є розробка та вдосконалення експериментальних методів визначення напружень, які поділені на дві групи – руйнівні та неруйнівні [1].

Руйнівні методи базуються на вимірюванні деформацій, що виникають при повному або частковому руйнуванні елемента зварної конструкції. Вони є досить поширеними у наукових дослідженнях. Але на натурних виробках з високою собівартістю та на конструкціях, що експлуатуються, застосування руйнівних методів не завжди є доцільним. Тому в інженерній практиці використовуються неруйнівні методи оцінки ЗЗН, при реалізації яких конструкція, що досліджується, за-

лишається неушкодженою. Це є основною перевагою неруйнівних методів перед руйнівними.

З неруйнівних методів найвідомішими є рентгенівський, магнітний та ультразвуковий (УЗ-метод) [2]. Останній застосовується в теперішній час як в промисловості України, так і за кордоном для вимірювання усереднених за товщиною матеріалу залишкових напружень [3–5]. Але для коректної оцінки ЗЗН УЗ-метод має певні обмеження, які пов'язані з особливостями формування зварних з'єднань. Так, зону розтягу (активну) ЗЗН у зварному шві та на ділянці навколо нього формує поле пластичних деформацій стиску, значення яких характеризуються досить високим градієнтом. Достовірне оцінювання компонент плоского напруженого стану при застосуванні УЗ-методу, що базується на розповсюдженні пружних хвиль у металевих матеріалах, можливе лише в полі пружних напружень [1]. У зоні розтягуючих ЗЗН, які сформувалися внаслідок пластичного деформу-

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Книш В.В. – <https://orcid.org/0000-0003-1289-4462>,

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>, Luyi Huang – <https://orcid.org/0000-0003-4155-2824>,

Альошин А.О. – <https://orcid.org/0000-001-9696-6800>

© Л.М. Лобанов, В.В. Книш, М.О. Пашин, В.Г. Кот, О.Л. Міходуй, Є.Д. Пекар, Luyi Huang, А.О. Альошин, 2023

вання металу шва та пришовної зони при усадці наплавленого металу, значення пружно-акустичних коефіцієнтів відрізняються від їх значень у пружно-деформованому металі [6]. Це знижує достовірність оцінки ЗЗН у пластично-деформованій зоні металу без встановлення їх значень для цієї зони [7].

Для інженерної практики актуальним є отримання достовірних значень ЗЗН розтягу, які (на відміну від ЗЗН стиску) чинять негативний вплив на довговічність зварних конструкцій. До того ж, значення ЗЗН при застосуванні УЗ-методу усереднюються на вимірвальній базі $V_{УЗ}$ давача УЗ-хвиль, яка становить 10 мм. Напівширина розподілу ЗЗН розтягу в зоні шва, які мають високий градієнт, є співставною з величиною $V_{УЗ}$. Тому використання УЗ-методу не дозволяє встановлювати пікові значення ЗЗН у центрі шва та близько до нього. Проте визначення ЗЗН УЗ-методом у реактивній зоні стиску, яка характеризується незначним градієнтом напружень, відсутністю пластичних деформацій та усадки металу шва, реалізується із задовільною точністю (табл. 1).

У сучасних дослідженнях для визначення ЗЗН застосовують метод електронної спекл-інтерферометрії (ESPI-метод), що базується на пружному розвантаженні ЗЗН унаслідок висвердлювання отворів діаметром $d_{отв}$ і глибиною $h_{отв}$ до 1 мм на поверхнях досліджуваних ділянок зварного з'єднання, і може вважатися умовно неруйнівним [8]. ЗЗН розтягу при вимірюванні ESPI-методом усереднюються на базі $V_{ESPI} = d_{отв}$. Це реалізує локалізоване визначення ЗЗН, тобто мінімізує їх усереднення за рахунок малої бази вимірювання, наслідком чого є висока достовірність оцінки пікових значень напружень у центрі шва (на відміну від УЗ-методу).

Характеристики, переваги та недоліки обох методів оцінки ЗЗН узагальнено у табл. 1, з даних

Таблиця 1. Характеристики методів оцінки ЗЗН

Номер	Метод визначення ЗЗН/Наявність стандарту	Товщина металу із ЗЗН δ , мм	База вимір. V , мм	Точність методу	Переваги методу	Недоліки методу
1	ESPI-метод/ДСТУ 8852:2019	≥ 2	1,0	$\pm 0,1\sigma_{0,2}$ на усіх ділянках ЗЗН	1. Можливість реєстрації ЗЗН на поверхні металу і мембранних. 2. Можливість реєстрації ЗЗН на базі $V_{ESPI} = 1$ мм.	1. Локальне пошкодження поверхні при свердленні. 2. Труднощі при свердленні твердих матеріалів.
2	УЗ-метод/Немає	≥ 3	10,0	$\pm 0,1\sigma_{0,2}$ у зонах з'єднань, у яких експериментально встановлені значення пружно-акустичних коефіцієнтів	1. Відсутня потреба в руйнуванні металу при реєстрації ЗЗН. 2. Можливість застосування методу на натурних конструкціях.	1. Неможливість отримання ЗЗН на поверхні металу. 2. Усереднення ЗЗН на базі вимірювання $V_{УЗ} = 10$ мм. 3. Необхідність визначення пружно-акустичних коефіцієнтів різних зон зварного з'єднання.

якої можна бачити, що поєднання переваг обох методів при виключенні їх недоліків дозволить підвищити достовірність неруйнівного визначення ЗЗН у натурних зварних конструкціях.

Метою роботи є розробка методики оцінки ЗЗН, яка базується на поєднанні переваг УЗ- і ESPI-методів.

Методика, об'єкт та предмет досліджень. У якості об'єкта досліджували процеси визначення ЗЗН у зразку стикового з'єднання при застосуванні УЗ- та ESPI-методів.

Досліджували ЗЗН у зварних з'єднаннях з алюмінієвого сплаву зі стабільною структурою, при зварюванні якого в зоні плавлення і ЗТВ не відбуваються мікроструктурні фазові перетворення, які пов'язані з об'ємними ефектами та можуть призвести до зміни залишкових напружень з розтягуючих до стискаючих.

Розгляд залишкового напруженого стану зварного з'єднання при порівнянні мембранних і поверхневих напружень є коректним для малих товщин і при зварюванні за один прохід. Тому предметом дослідження були ЗЗН у пластині із структурно стабільного алюмінієвого сплаву 1561 розмірами $320 \times 205 \times 5$ мм з поздовжнім стиковим швом (рис. 1, а), який було виконано зварюванням MIG за один прохід. Зовнішній вигляд макрошліфа зварного з'єднання показано на рис. 1, б. Режим зварювання MIG, залишкові поздовжні f_1-f_3 і поперечні Δ_1, Δ_2 прогини пластини після зварювання представлено в табл. 2.

Можна бачити, що величини f_1-f_3 і Δ_1, Δ_2 є незначними і не перевищують 1,5 мм, що виключає значні відмінності між величинами мембранних ЗЗН і на поверхнях пластини.

Проводили діагностику поздовжньої (вздовж зварного шва) компоненти σ_x ЗЗН на центральній ділянці пластини із застосуванням ESPI- та УЗ-методів [8, 9]. Вибір компоненти σ_x (рис. 1)

Таблиця 2. Режими зварювання MIG і прогини зразка стикового з'єднання зі сплаву 1561

Швидкість зварювання $V_{зв}$, мм/с	Струм зварювання $I_{зв}$, А	Напруга зварювання U , В	Марка/діаметр присадки $d_{пр}$, мм	$f_1^*/f_2/f_3$, мм	Δ_1/Δ_2 , мм	$\sigma_{0,2}$, МПа (для ОМ)
10	240	26,5	ER5356/1,6	1,0/1,5/1,2	1,5/1,5	180

Примітка. f_1^* і f_3 – прогини поздовжніх крайків пластини; f_2 – поздовжній прогин пластини вздовж зварного шва; Δ_1 і Δ_2 – прогини поперечних крайків пластини відповідно на початку та кінці зварного шва; ОМ – основний метал.

для оцінювання ЗЗН обумовлено її більшими значеннями на ділянці розтягу (у порівнянні з поперечною компонентою σ_y). Наслідком цього є вагомий вплив σ_x (у порівнянні з σ_y) на особливості навантаження з'єднань в умовах експлуатації.

При реєстрації значень напружень σ_x із використанням УЗ-методу здійснювали пересування давача УЗ-хвиль по поверхні пластини з боку кореня шва вздовж її центрального поперечного перерізу у напрямках, що вказані пунктирними стрілками на рис. 1, а.

При застосуванні ESPI-методу реєстрацію значень напружень на поверхні зразка σ_x виконували з обох боків пластини в центрі шва та на відстані 7 мм від нього у напрямках згідно з пунктирною стрілкою (рис. 1, а). Величини мембранних σ_x отримували усередненням за товщиною значень напружень на поверхні зразка на відповідних ділянках зовнішньої і зворотної поверхонь пластини.

Результати експериментів та їх обговорення. На рис. 2 представлено розподіли напружень σ_x (крива 1) у центральному поперечному перерізі зразка зварного з'єднання (рис. 1), які отримано УЗ-методом. Пряма 2 відображає градієнт збільшення ЗЗН розтягу в активній зоні.

З урахуванням того, що застосування УЗ-методу виключає визначення напружень у центрі шва, оцінювання величини σ_x на даній ділянці здійснювали ESPI-методом (точка D на рис. 2). Епю-

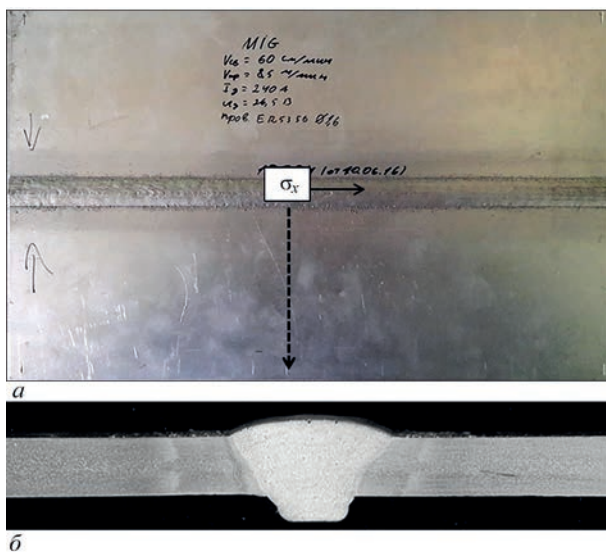


Рис. 1. Зразок стикового з'єднання зі сплаву 1561: а – зовнішній вигляд зразка стикового з'єднання, де суцільною стрілкою показано напрямком дії σ_x , пунктиром – напрямком реєстрації напружень методами дії УЗ та ESPI; б – макрошліф зварного з'єднання

ри ЗЗН розтягу та стиску повинні мати рівні площі, тобто бути «врівноваженими». Таким чином, площа $S1$ криволінійної поверхні між віссю 0–Y і кривою AB (зона стиску) повинна дорівнювати площі $S2$ чотирикутника $BCDO$ (зона розтягу) (рис. 2). Проте в цьому чотирикутнику положення точки C залишається невизначеним на прямій 2, оскільки УЗ-метод не дозволяє виконувати вимірювання розтягуючих напружень σ_x на ділянці, близькій до металу шва.

У чотирикутнику $BCDO$ є незмінними довжина сторони BO (розмір ширини зони розтягуючих напружень) і довжина сторони DO біля прямого кута, яка у вибраному масштабі осі ординат відповідає значенню розтягуючих напружень σ_x у центрі шва, що були отримані ESPI-методом. Таким чином, умова рівності площ $S1 = S2$ задається положенням точки C на прямій 2 (рис. 2). Координата цієї точки C на осі ординат (при виконанні умови $S1 = S2$) визначає величину напружень σ_x на ділянці біля зварного шва, а на осі абсцис 0–Y – центру шва. Таким чином, виконання умови $S1 = S2$ визначає положення точки C на прямій 2 (рис. 2).

Розподіл напружень σ_x у центральному поперечному перерізі пластини (УЗ-метод), який подовжено до точки C , наведено на рис. 3 (крива 1). Координати точки C визначені за умови рівності

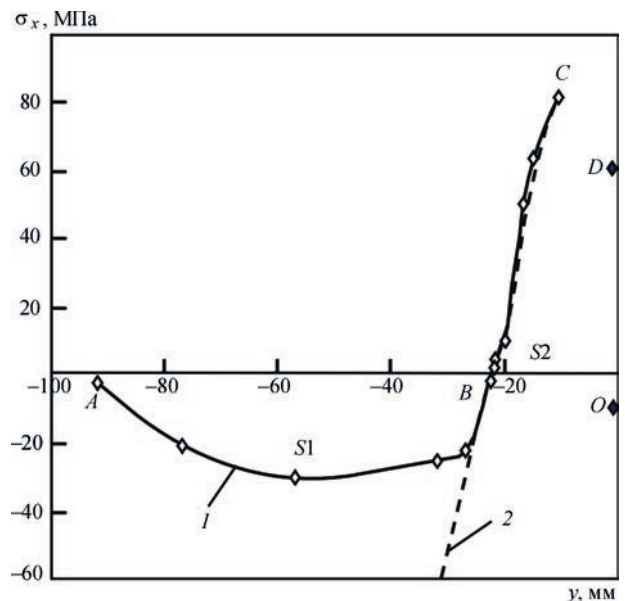


Рис. 2. Напруження σ_x у центральному поперечному перерізі зразка зварного з'єднання зі сплаву 1561 (рис. 1), отримані УЗ-методом (крива 1) та ESPI-методом (точка D), де 2 – пряма, що відображає градієнт зростання розтягуючих ЗЗН, $S1$ – площа епюри стиску, $S2$ – площа епюри розтягу

відповідних площ епюр розтягу і стиску. Із застосуванням ESPI-методу отримано значення мембранних σ_x у центрі шва (точка D) та біля нього (точка $C1$), які відображено прямою 2. Слід зазначити, що отримання достовірних значень величин σ_x на ділянці $C1-D$ неможливе УЗ-методом.

При порівнянні значень σ_x у точках C і $C1$ (рис. 3), отриманих методами УЗ і ESPI відповідно, можна бачити, що їх розходження не перевищує 18 МПа, тобто близьке до $0,1\sigma_{0,2}$ для сплаву 1561 (табл. 2), що відповідає заявленій точності (табл. 1).

Виходячи з наведених вище результатів, перспективною представляється методика діагностування ЗЗН у тонколистових натурних конструкціях з однопрохідними зварними швами, яка базується на сумісному застосуванні методів УЗ і ESPI. Але слід зазначити, що запропонована методика має певні обмеження. Так, при значних товщинах і багатопрохідному зварюванні завжди присутній нерівномірний розподіл залишкових напружень по товщині, навіть зі зміною знака, і визначення усереднених по товщині напружень не представляє інтересу. Усунення цих обмежень є напрямком подальших досліджень, у тому числі із застосуванням методів, що базуються на інших фізичних принципах.

Можливим є застосування методики у трьох варіантах.

Варіант 1 (рис. 4) – експрес-оцінка ЗЗН УЗ-методом, яка дозволяє швидко провести неруйнівне визначення загального рівня напружень розтягу в активній зоні на натурній конструкції. При застосуванні методики приймається умова рівності напружень в центрі шва (точка D) та біля нього

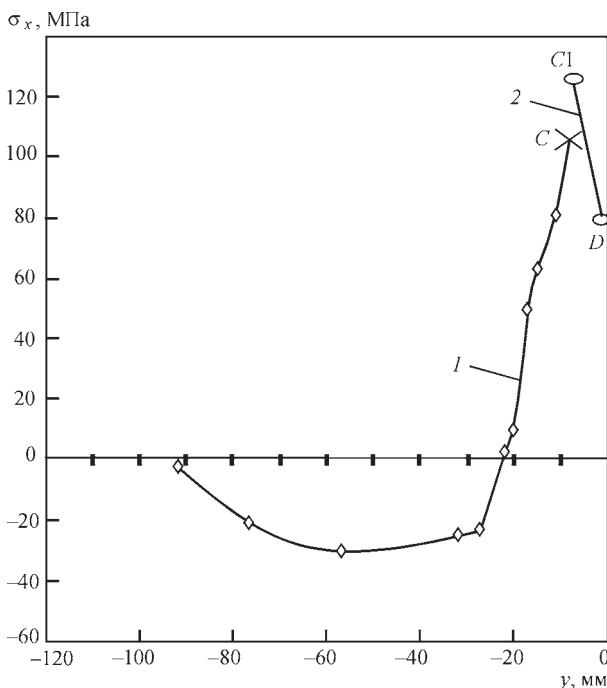


Рис. 3. Залишкові напруження σ_x у центральному поперечному перерізі зразка зварного з'єднання зі сплаву 1561 (рис. 1), отримані УЗ-методом (крива 1) та ESPI-методом (крива 2)

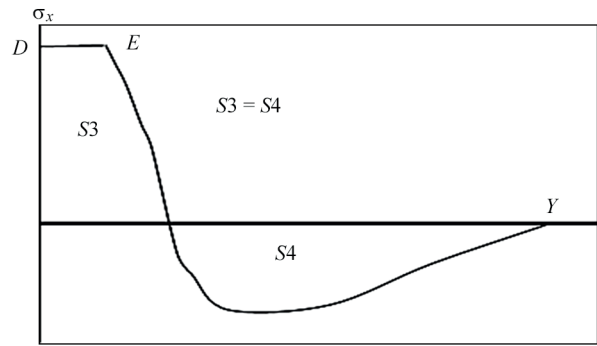


Рис. 4. Епюра мембранних ЗЗН, яку отримано із застосуванням методики за варіантом 1, де $S3$ і $S4$ – площі епюр розтягу та стиску відповідно, точки D і E – значення ЗЗН у центрі шва та в зоні сплавлення

(точка E). При цьому геометрична форма епюри розтягу приймається у вигляді трапеції (рис. 4). Це виключає визначення особливостей формування ЗЗН на центральній ділянці з'єднання, що є недоліком даної методики попри такі її переваги, як швидкість і легкість реалізації.

1. Етапи оцінювання ЗЗН за варіантом 1:

1.1. Визначається УЗ-методом розподіл ЗЗН в реактивній зоні (стиску).

1.2. Вираховується площа епюри $S4$ стиску (рис. 4).

1.3. За умови $S3 = S4$ вираховується висота трапеції площею $S3$ епюри розтягуючих напружень (рис. 4), яка на осі ординат визначає значення ЗЗН у точках D (центр шва) і E (зона сплавлення).

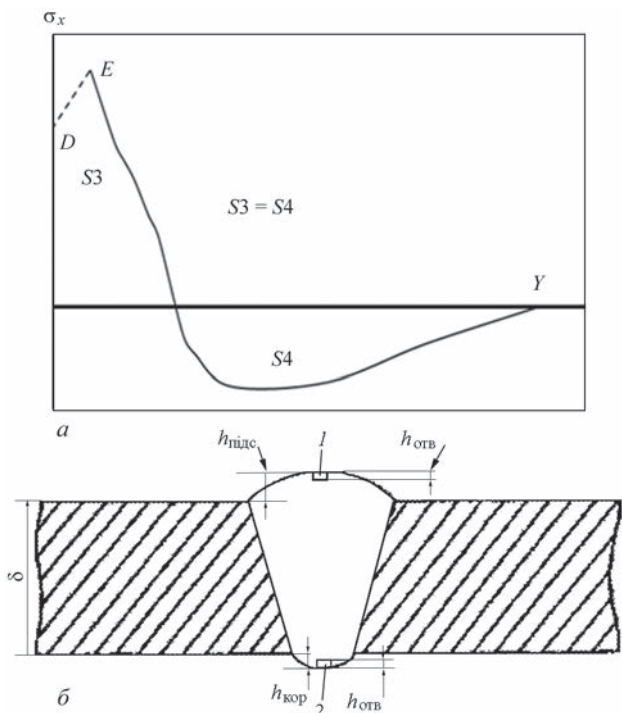


Рис. 5. Методика оцінювання ЗЗН за варіантом 2: а – епюра мембранних ЗЗН, де площі $S3$, $S4$, точки D і E – аналогічно рис. 4; б – розташування отворів 1 і 2 для оцінювання напружень ESPI-методом відповідно на зовнішній і зворотній поверхнях зварного шва

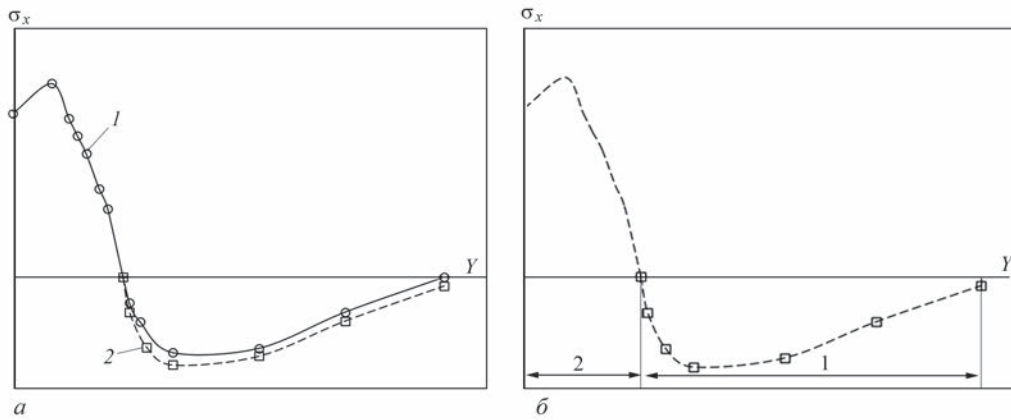


Рис. 6. Методика оцінювання ЗЗН за варіантом 3: *a* – крива 1 – епюра мембранних ЗЗН, отримана ESPI-методом на зразку-свідку; крива 2 – епюра мембранних ЗЗН, отримана УЗ-методом у реактивній зоні стиску зразка-свідка; *б* – 1 – ділянка епюри мембранних ЗЗН стиску, отриманої УЗ-методом на конструкції, 2 – ділянка епюри мембранних ЗЗН розтягу, яка побудована за методом аналогій

Варіант 2 – оцінка ЗЗН (рис. 5) поєднанням методів ESPI та УЗ, що дозволяє отримати значення ЗЗН розтягу в активній зоні на натурній конструкції при мінімальному механічному впливі на поверхню металу шва.

Мінімізація впливу досягається завдяки застосуванню ESPI-метода для визначення ЗЗН (на рис. 5, *a*, точка *D*) виключно на ділянках підсилення кореня у центрі шва (за умови вільного доступу до них). При цьому висоти підсилення $h_{\text{підс}}$ і кореня $h_{\text{кор}}$ зварного шва мають бути більшими за $h_{\text{отв}}$, як показано на рис. 5, *б*. Після визначення величин ЗЗН на обох поверхнях шва отвори для реєстрації напружень можуть бути (при необхідності) видалені механічним зняттям із зазначених поверхонь шарів металу за умови зберігання товщини δ робочого перерізу основного металу.

2. Етапи оцінювання ЗЗН за варіантом 2:

2.1. ESPI-методом визначається значення мембранних ЗЗН в центрі шва (на рис. 5, *a*, точка *D*).

2.2. УЗ-методом визначається розподіл ЗЗН в реактивній зоні (стиску).

2.3. Вираховується площа напружень стиску S_4 (рис. 5, *a*).

2.4. За умови $S_3 = S_4$, де S_3 – площа епюри напружень розтягу, вираховуються координати точки *E* і відповідне значення ЗЗН (рис. 5, *a*) аналогічно до методики, що відповідає рис. 2.

Варіант 3 – неруйнівна оцінка ЗЗН (рис. 6) в натурних конструкціях шляхом поєднання методів ESPI та УЗ із супутнім застосуванням зразка-свідка з аналогічного матеріалу. Методика дозволяє на базі методу аналогій отримати значення мембранних ЗЗН розтягу у зразку, які дорівнюють напруженням у натурній конструкції. Похибка між розподілами ЗЗН стиску у зразку та конструкції не має перевищувати заявленої точності методів (табл. 1). Це досягається еквівалентністю таких складових критерію подібності зразка та

конструкції, як їх геометричні характеристики та режими зварювання.

3. Етапи оцінювання ЗЗН за варіантом 3 (рис. 6):

3.1. ESPI-методом визначається розподіл мембранних ЗЗН у зразку-свідку (на рис. 6, *a*, крива 1).

3.2. УЗ-методом визначається розподіл ЗЗН в реактивній зоні (стиску) у зразку-свідку (на рис. 6, *a*, крива 2).

3.3. УЗ-методом визначається розподіл ЗЗН в реактивній зоні (стиску) в натурній конструкції (на рис. 6, *б*, ділянка 1).

3.4. Проводиться порівняння характеристик епюр напружень стиску зразка та конструкції відповідно до кривої 2 (рис. 6, *a*) і кривої на ділянці 1 (рис. 6, *б*) та встановлюється їх ідентичність у межах прийнятої похибки вимірювань.

3.5. З урахуванням результатів п. 3.4 (ідентичності епюр напружень стиску зразка та конструкції) методом аналогій будується розподіл ЗЗН розтягу в конструкції (на рис. 6, *б*, ділянка 2).

Аналізуючи наведені вище результати, слід зазначити, що сумісне застосування УЗ- та ESPI-методів дозволяє мінімізувати їх недоліки (табл. 1) при поєднанні їх переваг. Це створює передумови для розробки низки методик неруйнівного визначення напружених станів у натурних зварних конструкціях.

Висновки

1. Встановлено, що поєднання переваг УЗ- та ESPI-методів при усуненні їх недоліків є підставою для розробки методу неруйнівного визначення ЗЗН у натурних конструкціях.

2. Встановлено, що відмінність значень ЗЗН розтягу в зоні шва стикового зварного з'єднання алюмінієвого сплаву 1561, отриманих УЗ- і ESPI-методами, є близькою до показника $0,1\sigma_{0,2}$ для даного матеріалу, що відповідає заявленій точності методів.

3. Розроблено методику неруйнівного визначення пікових значень і розподілу ЗЗН розтягу в зоні шва стикового зварного з'єднання, яка базується на сумісному застосуванні УЗ- і ESPI-методів та дотриманні умови «рівності площ» епюр зрівноважених залишкових напружень розтягу та стиску.

4. За результатами досліджень запропоновано три різновиди методик неруйнівного визначення ЗЗН у натурних зварних конструкціях на базі поєднання УЗ- і ESPI-методів.

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. Луценко Т.М. (2022) Нові системи та технології неруйнівного контролю для промисловості України за поточних умов. *Зварювання та технічна діагностика для відновлення економіки України: Тези допов. наук. конф.* Київ, Міжнародна Асоціація «Зварювання», 66.
4. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Gushcha, O. (2000) Ultrasonic measurement of residual stresses in welded railway bridge. *Structural Materials Technology. NDT Conference. Atlantic City, NJ, February 28–March 3, 2000*, pp. 213–218.
5. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Polezhaeva, H. (2011) Ultrasonic measurement of residual stresses in welded elements of ship structure. *Applied Mechanics and Materials*, **70**, 273–278. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.70.273>
6. Javadi, Y., Akhlaghi M., Najafabadi M. (2013) Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates. *J. Mater. Des.*, **45**, 628–642. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.09.038>
7. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуща О.Й. (1977) *Введение в акустоупругость*. Киев, Наукова думка.

8. 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.
9. Гуща О. Й., Махорт Ф. Г. (1995) Применение акустического метода определения остаточных напряжений в сварных конструкциях. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 8–15.

References

1. Guz, A.N. (1986) Elastic waves in bodies with initial stresses. Vol. 2: Regularities of propagation. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
2. Kasatkin, B.S. et al. (1981) Experimental methods of stresses and strains examination. Kyiv, Nukova Dumka [in Russian].
3. Lutsenko, T.M. (2022) New systems and technologies of non-destructive testing for industry of Ukraine under current conditions. In: *Abstr. of Papers of Sci. Conf. on Welding and Technical Diagnostics for Economic Revival of Ukraine*. IAW, 66 [in Ukrainian].
4. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Gushcha, O. (2000) Ultrasonic measurement of residual stresses in welded railway bridge. *Structural Materials Technology. NDT Conf. (Atlantic City, NJ, February 28–March 3, 2000)*, 213–218.
5. Kudryavtsev, Y., Kleiman, J., Polezhaeva, H. (2011) Ultrasonic measurement of residual stresses in welded elements of ship structure. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. **70**, 273–278. DOI:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.70.273>
6. Javadi, Y., Akhlaghi M., Najafabadi M. (2013) Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates. *J. Mater. Des.*, Vol. **45**, 628–642. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.09.038>
7. Guz, A.N., Makhort, F.G., Gushcha, O.J. (1977) Introduction into acousto-elasticity. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
8. 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.
9. Gushcha, O.J. (1995), Makhort, F.G. (1995) Application of acoustic method for determination of residual stresses in welded structures. *Tekh. Diagnost. ta Nerazrush. Kontrol*, **4**, 8–15 [in Russian].

NONDESTRUCTIVE EVALUATION OF RESIDUAL STRESSES IN WELDED JOINTS ON THE BASE OF A COMBINATION OF ULTRASONIC TESTING AND SPECKLE-INTERFEROMETRY

L.M. Lobanov¹, V.V. Knysh¹, M.O. Pashchin¹, V.G. Kot¹, O.L. Mikhodui¹, Ye.D. Pekar¹, Luyi Huang², A.O. Alyoshyn³

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: svarka2000@ukr.net

²Zhejiang Special Equipment Research Institute. 211 Kaixuan Road, Hangzhou, China. E-mail: yuxf@zjtj.org

³«Foreign Economy Representation of the E.O. Paton Chinese-Ukrainian Institute of Welding», Ltd. 11 Kazymyr Malevych str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: ft.cupiw.pwi@gmail.com

It was found that a combination of the advantages of ultrasonic testing and electron speckle-interferometry in the case of elimination of their disadvantages is the base for development of the method of nondestructive evaluation of residual welding stresses in full-scale structures. A procedure of nondestructive evaluation of the distribution of residual tensile welding stresses in the weld zone of a butt welded joint was developed. It is based on simultaneous application of ultrasonic testing and electron speckle-interferometry and fulfillment of the condition of «area equality» of the epures of balanced compressive and tensile residual stresses. The procedure was proposed for application on samples of single-pass welded joints of sheet constructions from metallic materials with a stable structure. The subject of the study are tensile residual welding stresses in a MIG-welded sample of a butt joint of structurally stable 1561 aluminium alloy. Residual welding stress component σ_x longitudinal relative to the weld was evaluated in the plate central area. It was found that the discrepancy of the values of residual welding stresses near the center of the welded joint of 1561 aluminium alloy is equal to approximately $0.1\sigma_{0.2}$ for this material, which corresponds to the claimed accuracy of the methods. Based on the investigation results, a range of procedures was proposed for nondestructive evaluation of the residual welding stresses in full-scale welded structures, based on a combination of ultrasonic testing and electron speckle-interferometry. 9 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: residual welding stresses, ultrasonic testing (UT), electronic speckle-interferometry (ESPI), butt joint sample, MIG welding, compressive and tensile testing, longitudinal component of stresses, aluminium alloy, procedure of nondestructive evaluation of stresses

Надійшла до редакції 24.03.2023