

ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНА ОБРОБКА ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ У ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ ІЗ ЛЕГКИХ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ І АУСТЕНІТНОЇ СТАЛІ

Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.Л. Міходуй, О.М. Тимошенко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: olha.mikhodui@gmail.com

Розроблено та реалізовано технологію електродинамічної обробки (ЕДО) дослідних зразків тонколистових стикових зварних з'єднань зі сплавів на основі Al, Ni, Ti та аустенітної сталі. Розроблено спеціалізоване збиральне оснащення, із використанням якого виконано автоматичне зварювання методом TIG дослідних зразків. Із застосуванням методу електронної спекл-інтерферометрії досліджено вплив ЕДО на залишкові напруження у зразках зварних з'єднань. Встановлено, що ЕДО є ефективним механізмом регулювання залишкових напружених станів зварних з'єднань зі сплавів Al і Ti та аустенітної сталі. Показано, що для підвищення ефективності ЕДО сплаву на основі Ni необхідно застосовувати більші значення енергії електродинамічних дій в рамках подальших досліджень. Також доцільним для оптимізації залишкових напружених станів зварних з'єднань зі сплаву на основі Ni є використання нового методу обробки, який базується на магнітоімпульсних впливах на неферромагнітні матеріали. Бібліогр. 19, табл. 8, рис. 11.

Ключові слова: сплави на основі Al, Ni, Ti, аустенітна сталь, електродинамічна обробка, транспортні конструкції, зварні з'єднання, електронна спекл-інтерферометрія, залишкові напружені стани, механічні характеристики, хімічний склад, ефективність обробки, регулювання залишкових напружень

Вступ. Актуальність і мета роботи. У сучасній інженерній практиці виробництва тонколистових зварних транспортних конструкцій традиційним є питання продовження їх експлуатаційного ресурсу, яке пов'язане із необхідністю оптимізації залишкових напружено-деформованих станів зварних з'єднань. Залишкові зварювальні напруження (ЗЗН) розтягу негативно впливають на аеро- та гідродинамічні характеристики, точність збирання, корозійну стійкість і довговічність виробів, при виготовленні яких використовують металеві матеріали (ММ), такі як конструкційні сталі, сплави на основі алюмінію, титану, нікелю [1].

У теперішній час використовуються нові ММ, які є альтернативою таким, що традиційно застосовувались у вітчизняному виробництві транспортних конструкцій. Тому проблема мінімізації рівня ЗЗН розтягу в зварних з'єднаннях із нових ММ є актуальною.

Перспективними для регулювання напружених станів є електрофізичні методи, що базуються на застосуванні імпульсних електромагнітних полів різної протяжності та конфігурації [2–12].

Одним із електрофізичних методів регулювання ЗЗН є електродинамічна обробка (ЕДО) зварних з'єднань, яка показала свою ефективність при застосуванні в авіа- та суднобудуванні [13–15]. Релаксація ЗЗН при ЕДО відбувається за рахунок електропластичного ефекту, що базу-

ється на синергії, яка обумовлена сумісною дією таких складових як імпульсний струм та динамічне навантаження на метал зварного з'єднання. ЕДО, що може використовуватися в ручному та автоматичному режимах, є адаптованою для застосування в процесі та після зварювання, у тому числі й у складі автоматизованих (роботизованих) комплексів [16, 17]. ЕДО забезпечує оптимальне позиціонування робочого інструменту – електродного пристрою (ЕП) – відносно зварного шва, можливість обробки зварних швів великогабаритних конструкцій у різних просторових положеннях.

Мета роботи – дослідження ефективності застосування ЕДО для регулювання ЗЗН у зварних з'єднаннях із ММ, що є перспективними для виробництва зварних тонколистових транспортних конструкцій.

Механічні характеристики ММ. Досліджували чотири марки ММ, які застосовуються у сучасному виробництві зварних конструкцій та відносяться до класу таких, що добре зварюються. Застосовували зразки ММ у вигляді листів загальними розмірами 500×200 мм і завтовшки $\delta = 1$ і 3 мм. ММ № 1 – сплав на основі Al, далі ММ1 (Al). ММ1 (Al) застосовується при виготовленні оболонок, панелей, паливних баків, силового набору та насичення корпусних транспортних конструкцій. Хімічний склад ММ1 (Al) наведено в табл. 1.

Лобанов Л.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Пашин М.О. – <http://orcid.org/0000-0002-2201-5137>,

Міходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>

© Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.Л. Міходуй, О.М. Тимошенко, 2025

Таблиця 1. Хімічний склад пластин сплаву MM1 (Al), мас. %

Mg	Mn	Fe	Si	Al
2,29	0,3	0,2	0,11	Основа

Таблиця 2. Хімічний склад пластин титанового сплаву MM2 (Ti), мас. %

C	Si	Fe	N	H	O	Ti
0,0074	0,005	0,046	0,0079	0,0011	0,16	Основа

MM № 2 – сплав на основі Ti, далі MM2 (Ti). MM2 (Ti) застосовується при виготовленні силового набору, насичення, трубопроводів і корпусів транспортних конструкцій. Хімічний склад сплаву MM2 (Ti) наведено в табл. 2.

MM № 3 – жаростійкий сплав на основі Ni, далі MM3 (Ni). MM3 (Ni) застосовується для трубопроводів, силових елементів і деталей газової апаратури, що працюють в умовах високих температур. Хімічний склад сплаву MM3 (Ni) наведено в табл. 3.

MM № 4 – конструкційна аустенітна сталь на основі Fe–Cr–Ni, далі MM4 (Fe–Cr–Ni), що є стійкою до корозії та застосовується для деталей трубопроводів і силових елементів, що працюють в агресивних середовищах. Хімічний склад сталі MM4 (Fe–Cr–Ni) наведено в табл. 4.

Проводилися механічні випробування плоских зразків MM на одновісний розтяг. Підготовку та руйнування зразків проводили, керуючись стандартами ГОСТ 21631–76, ГОСТ 11701–84, ГОСТ 1497–84, згідно з якими зразки MM вирізали з листа уздовж прокату, а механічні характеристики кожного типу MM оцінювали за чотирма зразками. Геометричні характеристики зразків наведено на рис. 1.

Проводилася візуальна оцінка характеру руйнування зразків чотирьох дослідних MM, результати

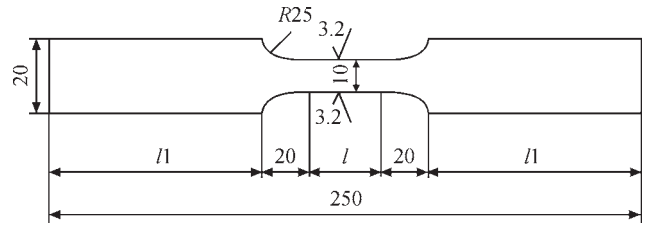


Рис. 1. Зовнішній вигляд зразків для випробувань на одновісний розтяг: $l = 50$ мм і $l_1 = 80$ мм для сплавів MM1 (Al) та MM2 (Ti); $l = 40$ мм і $l_1 = 90$ мм для сплаву MM3 (Ni) та сталі MM4 (Fe–Cr–Ni)

яких наведено на рис. 2, де зразки $\delta = 1$ мм – на рисунках перший і другий зверху, $\delta = 3$ мм – третій і четвертий зверху.

З даних, наведених на рис. 2, можна побачити, що зразки сплаву MM1 (Al) зруйновані відповідно за вираженими механізмами зрізу та відриву (рис. 2, а) практично без утворення «шийки». Зразки сплаву MM2 (Ti) зруйновані з формуванням «шийки» переважно за механізмом відриву (рис. 2, б). При цьому має місце формування незначних «губ зрізу» по крайках зони руйнування. Зразки зі сталі MM4 (Fe–Cr–Ni) (рис. 2, в) і сплаву MM3 (Ni) (рис. 2, г) зруйновані за вираженим механізмом зрізу та відриву відповідно. Основні механічні характеристики руйнування MM у результаті статичного розтягу наведено в табл. 5.

Результати даних хімічного складу алюмінієвого сплаву MM1 (Al) (див. табл. 1) свідчать про те, що він є близьким до сплаву АМг2Н, а значення σ_b – до сплаву АМг6. Титановий сплав MM2 (Ti) і нікелевий сплав MM3 (Ni) характеризуються високими значеннями δ_y (рядки 3–6), що створює передумови для релаксації ЗЗН у дослідних MM у результаті електродинамічних дій та визначає

Таблиця 3. Хімічний склад високотемпературного сплаву MM3 (Ni), мас. %

C	S	P	Si	Mn	Cr	Ti	W	Fe	Al	Mo	Ni
0,055	0,0023	0,0019	0,13	0,28	24,44	0,43	14,37	0,075	0,25	0,75	Основа

Таблиця 4. Хімічний склад сталі MM4 (Fe–Cr–Ni), мас. %

C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	Nb	V	Fe
0,069	0,0047	0,005	0,27	0,4	14,55	5,39	0,89	0,86	0,15	0,18	Основа

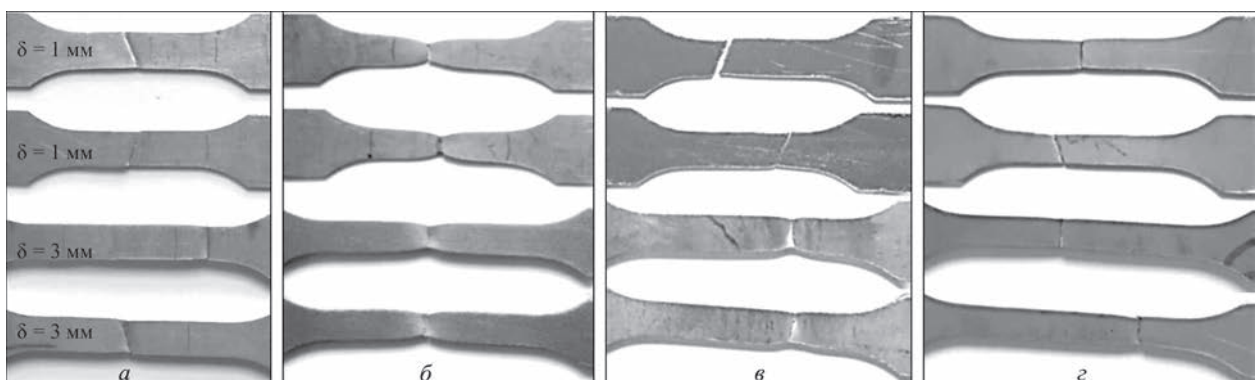


Рис. 2. Зовнішній вигляд зруйнованих зразків $\delta = 1$ і 3 мм: а – сплаву MM1 (Al); б – сплаву MM2 (Ti); в – сталі MM4 (Fe–Cr–Ni); г – сплаву MM3 (Ni)

Таблиця 5. Основні механічні характеристики зразків ММ δ = 1 та 3 мм

Номер зразка	Марка ММ	δ, мм	Механічні характеристики ММ		
			σ _{0,2} , МПа	σ _b , МПа	δ _y , %
1	ММ1 (Al)	1,0	229,9	271,4	11,0
2		3,0	228,1	270,7	10,3
3	ММ2 (Ti)	1,0	281,1	431,5	35,2
4		3,0	275,0	430,7	34,5
5	ММ3 (Ni)	1,0	438,9	858,2	57,3
6		3,0	438,0	847,5	49,7
7	ММ4 (Fe–Cr–Ni)	1,0	935,7	956,3	11,2
8		3,0	930,3	946,6	11,2

їх перспективними для застосування до них ЕДО. Для сталі ММ4 (Fe–Cr–Ni) притаманні досить високі значення σ_{0,2} (рядки 7–8).

Формування ЗЗН у зразках стикових з’єднань ММ здійснювали із використанням зварювання ТІГ у середовищі Ar. Режими ТІГ-процесу для різних марок ММ представлені в табл. 6.

У якості зразків зварних з’єднань використовували пластини ММ розмірами 500×200 мм та δ = 1 і 3 мм, вирізані вздовж прокату аналогічно до зразків для механічних випробувань. ТІГ-процес реалізовували на спеціалізованому збирально-зварювальному стенді (рис. 3), який забезпечував обдув аргоном зони зварювання та остигаючого шва при ламінарному витіканні газу із сопла пальника зі швидкістю 12 л/хв. Конструкція збирального стенду забезпечувала обдув газового середовища в зоні кореня шва за рахунок порожнин у формуючій підкладці, в яких циркулював газ зі швидкістю витікання 2 л/хв (рис. 3, а). ТІГ-пальник було

Таблиця 6. Режими ТІГ-зварювання пластин ММ δ = 1 та 3 мм

Номер зразка	Матеріал	Напруга дуги U _д , В	Струм дуги I _д , А	Швидкість зварювання v _{зв} , мм/с	Діаметр електрода d _е , мм	Дуговий проміжок L _д , мм
1	ММ1 (Al)	12,8...13,5	120...140	5,0	2,4	2,0
2	ММ2 (Ti)	10,2...11,3	110...130			
3	ММ4 (Fe–Cr–Ni)	11,6...11,9	140...160	5,5		1,5
4	ММ3 (Ni)	11,0...11,4	140...160			

Примітка. Перше значення U_д, I_д – для δ = 1 мм, друге – для δ = 3 мм.

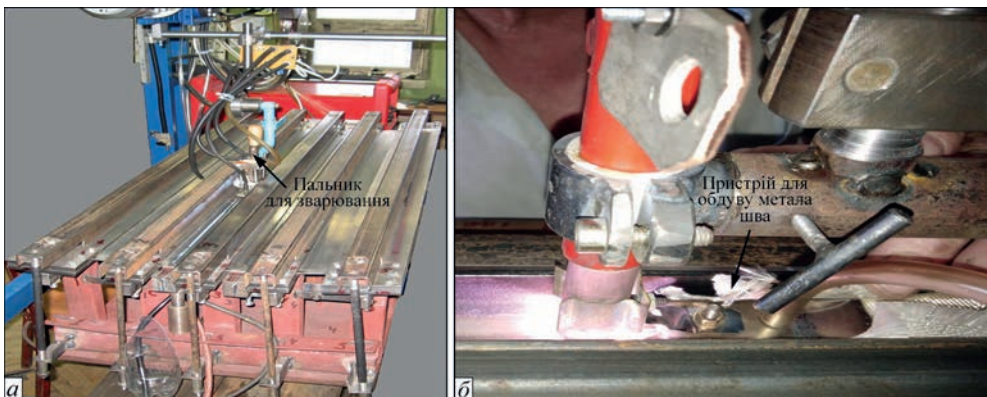


Рис. 3. Зовнішній вигляд комплексу для зварювання ТІГ ММ: а – стенд для збирання та зварювання зразків; б – ТІГ-процес із використанням обдуву зовнішньої поверхні остигаючого металу шва (для сплаву ТА2)

Таблиця 7. Режими та умови виконання ЕДО зразків зварних з'єднань із ММ

Номер зразка	ММ	δ , мм	t_p , мкс	t_p , мкс	U_3^P , В	U_3^I , В	Умови виконання ЕДО ММ
1	ММ1 (Al)	1	275	325	150	300	Вздовж лінії сплавлення (ВЛС)
2		3			300	500	Вздовж центру шва (ВЦШ)
3	ММ4 (Fe-Cr-Ni)	1			200	500	ВЛС
4		3			300	500	ВЛС + ВЦШ
5	ММ2 (Ti)	1			200	300	ВЛС
6		3			250	500	ВЦШ
7	ММ3 (Ni)	1			250	300	ВЦШ
8		3			300	500	ВЦШ

поверхні металу, де початкові (до ЕДО) значення σ_x розтягу були максимальними (де негативний вплив ЗЗН на механічні характеристики з'єднання є максимальним). Умови виконання та режими ЕДО для зразків ММ наведено в табл. 7, де представлені значення зарядної напруги струмової U_3^I , динамічної (ударної) U_3^P складових ЕДО та часові періоди їх дії відповідно t_I і t_P .

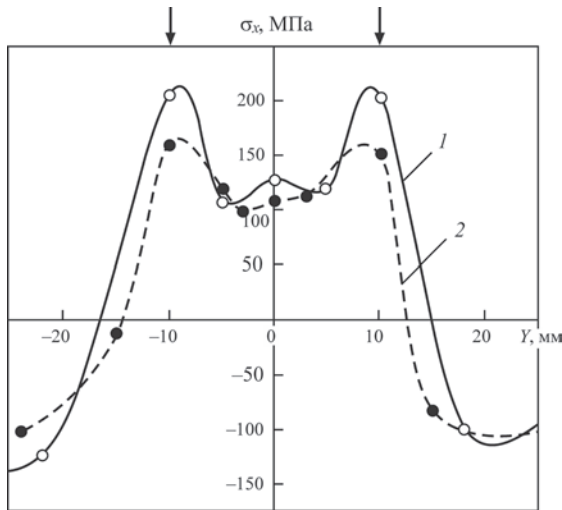


Рис. 4. Розподіл компоненти σ_x ЗЗН у центральному поперечному перерізі зразка зварного з'єднання зі сплаву ММ1 (Al) $\delta = 1$ мм до та після ЕДО, де стрілками вказано зони ЕДО, як і в подальшому на рис. 5–11: \circ – до ЕДО; \bullet – після ЕДО

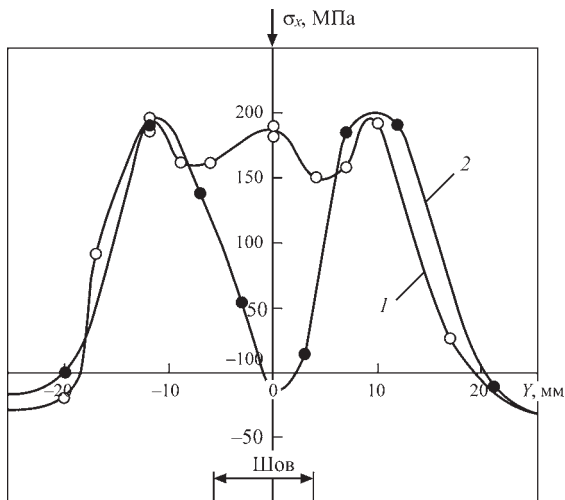


Рис. 5. Розподіл компоненти σ_x ЗЗН у центральному поперечному перерізі зразка зварного з'єднання зі сплаву ММ1 (Al) $\delta = 3$ мм до та після ЕДО: \circ – до ЕДО; \bullet – після ЕДО

Результати дії ЕДО на ЗЗН зразків ММ та їх обговорення. Розподіл компоненти σ_x ЗЗН у центральному поперечному перерізі зразка зі сплаву ММ1 (Al) $\delta = 1$ мм до та після ЕДО за умов, наведених у табл. 7 (рядок 1), представлений на рис. 4. Можна бачити, що обробка позитивно впливає на розподіл σ_x вздовж лінії сплавлення ($Y = -10$ і 10 мм), де значення σ_x розтягу після ЕДО знижуються з 205 до 155 МПа.

Розподіл σ_x ЗЗН у зразку сплаву ММ1 (Al) $\delta = 3$ мм до та після ЕДО за умов, наведених у табл. 7 (рядок 2), представлений на рис. 5. Можна бачити, що після ЕДО початкові ЗЗН розтягу $\sigma_x = 180$ МПа у центрі шва ($Y = 0$) після ЕДО трансформуються у ЗЗН стиску $\sigma_x = -15$ МПа, а в основному металі уздовж лінії сплавлення ($Y = -5$ і 5 мм) значення σ_x розтягу також суттєво знижується.

Розподіл компоненти σ_x ЗЗН у зразку з аустенітної сталі ММ4 (Fe-Cr-Ni) $\delta = 1$ мм до та після ЕДО за умов, наведених у табл. 7 (рядок 3), представлений на рис. 6.

Із даних рис. 6 можна бачити, що в центрі шва ($Y = 0$) початкові (до ЕДО) σ_x є стискальними, а їхні значення досягають -111 МПа. Це можна пояснити особливістю механізму структуроутворення при формуванні ЗЗН в аустенітних сталях за швидкого вистигання металу зварного шва. Якщо структурні перетворення металу шва під

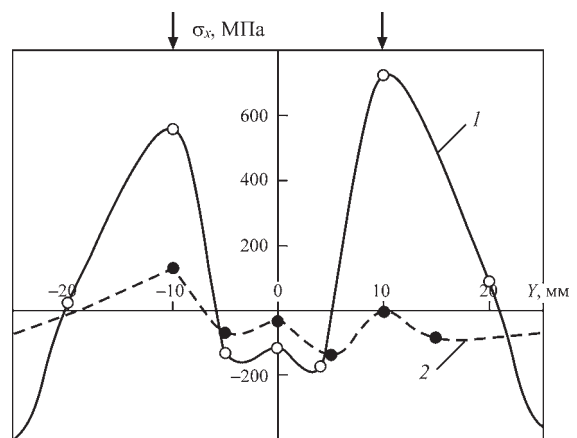


Рис. 6. Розподіл компоненти σ_x ЗЗН у поперечному перерізі зразка зварного з'єднання зі сталі ММ4 (Fe-Cr-Ni) $\delta = 1$ мм до та після ЕДО: \circ – до ЕДО; \bullet – після ЕДО

час вистигання відбуваються при низьких температурах, то його скорочення змінюється різким розширенням, а напруження розтягу, що утворилися, знижуються та переходять у стиск [19]. Умови швидкого вистигання металу були реалізовані при зварюванні дослідних зразків у збиральному стенді (рис. 3, а), де використовували обдув шва інертним газом. При цьому на ділянках основного металу біля лінії сплавлення ($Y = -10$ і 10 мм) початкові σ_x є розтягувальними та мають значення 560 і 723 МПа, які після ЕДО за умов табл. 7 (рядок 3) знижуються до 131 і до 0 МПа відповідно. При цьому ЕДО основного металу біля лінії сплавлення ($Y = -10$ і 10 мм) сприяє зниженню напружень стиску із $\sigma_x = -111$ до -35 МПа у центрі шва ($Y = 0$). Це можна пояснити перерозподілом ЗЗН в активній зоні зварного з'єднання, який ініційований релаксацією σ_x біля лінії сплавлення.

ЕДО металу зразка зварного з'єднання зі сталі ММ4 (Fe–Cr–Ni) $\delta = 3$ мм проводили за умов табл. 7 (рядок 4) з урахуванням результатів, отриманих для зразка $\delta = 1$ мм стосовно зниження напружень стиску в центрі шва, яке ініційоване обробкою ліній сплавлення. ЕДО виконували уздовж центру шва та ліній сплавлення. Розподіл σ_x ЗЗН сталі S-06 $\delta = 3$ мм до та після ЕДО наведено на рис. 7.

З даних рис. 7 можна бачити, що ЕДО позитивно впливає на розподіл σ_x в центрі зварного шва ($Y = 0$). У цій зоні значення σ_x стиску в результаті обробки ЕДО підвищуються з -100 до -250 МПа. При цьому ЕДО також оптимізує розподіл σ_x уздовж ліній сплавлення металу шва ($Y = 10$ і -10 мм), де напруження розтягу знижуються з 400 до $0 \dots 67$ МПа. На ділянках ($Y = 5$ і -5 мм) ЗЗН після ЕДО трансформуються із розтягу в стиск – з 220 до -100 МПа.

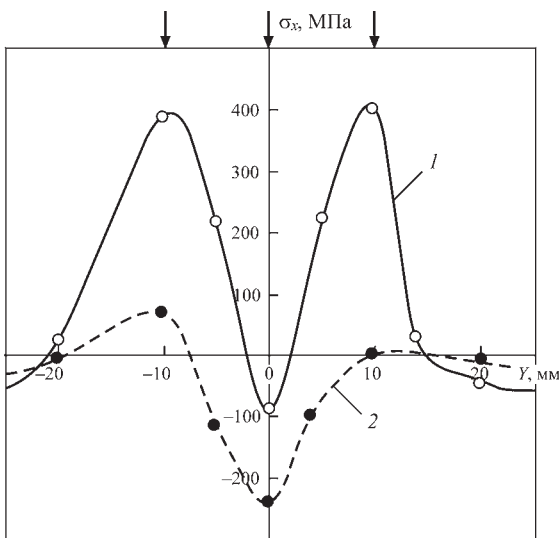


Рис. 7. Розподіл компоненти σ_x ЗЗН у поперечному перерізі зразка зварного з'єднання зі сталі ММ4 (Fe–Cr–Ni) $\delta = 3$ мм до та після ЕДО: \circ – до ЕДО; \bullet – після ЕДО

Розподіл компоненти σ_x ЗЗН у зразку зварного з'єднання зі сплаву ММ2 (Ti) $\delta = 1$ мм до та після ЕДО металу зварного шва за умов табл. 7 (рядок 5) представлено на рис. 8. Можна бачити, що ЕДО зменшує ЗЗН у центрі зварного шва ($Y = 0$) та біля ліній сплавлення ($Y = 8$ і -8 мм), де значення σ_x розтягу після ЕДО знижуються відповідно з 200 до 150 МПа і з 270 до 180 МПа.

Розподіл компоненти σ_x ЗЗН у зразку зварного з'єднання сплаву ММ2 (Ti) $\delta = 3$ мм до та після ЕДО за умов табл. 7 (рядок 6) металу шва представлено на рис. 9. Можна бачити, що ЕДО сприяє оптимізації розподілу ЗЗН у центрі шва ($Y = 0$), де σ_x розтягу після ЕДО знижуються з 200 до 70 МПа. Слід зазначити, що дія ЕДО також розповсюджується й на σ_x уздовж ліній сплавлення ($Y = -8$ і 8 мм), де σ_x розтягу знижуються відповідно від 225...240 до 175...180 МПа.

Розподіл σ_x ЗЗН у зразку зварного з'єднання нікелевого сплаву ММ3 (Ni) $\delta = 1$ мм до та після ЕДО

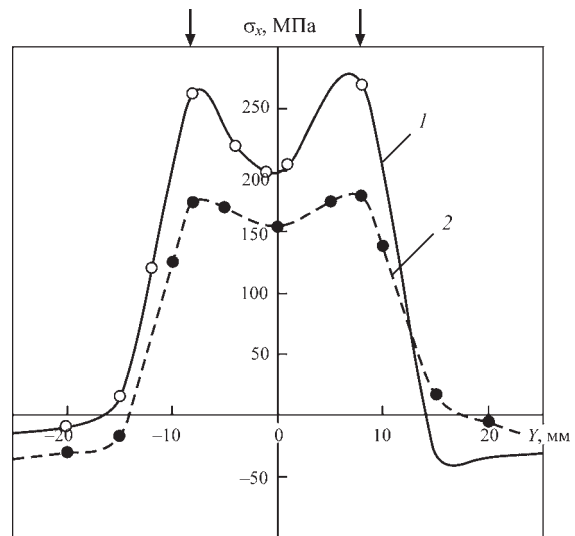


Рис. 8. Розподіл компоненти σ_x ЗЗН у поперечному перерізі зразка зварного з'єднання титанового сплаву ММ2 (Ti) $\delta = 1$ мм до та після ЕДО: \circ – до ЕДО; \bullet – після ЕДО

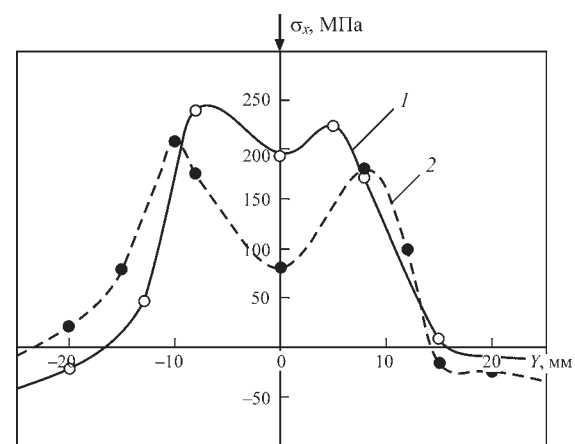


Рис. 9. Розподіл компоненти σ_x ЗЗН у поперечному перерізі зразка зварного з'єднання титанового сплаву ММ2 (Ti) $\delta = 3$ мм до та після ЕДО: \circ – до ЕДО; \bullet – після ЕДО

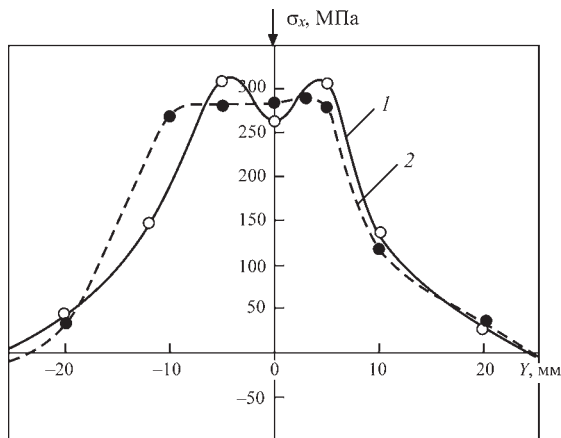


Рис. 10. Розподіл компоненти σ_x ЗЗН у поперечному перерізі зразка зварного з'єднання нікелевого сплаву ММ (Ni) $\delta = 1$ мм до та після ЕДО: \circ – до ЕДО; \bullet – після ЕДО

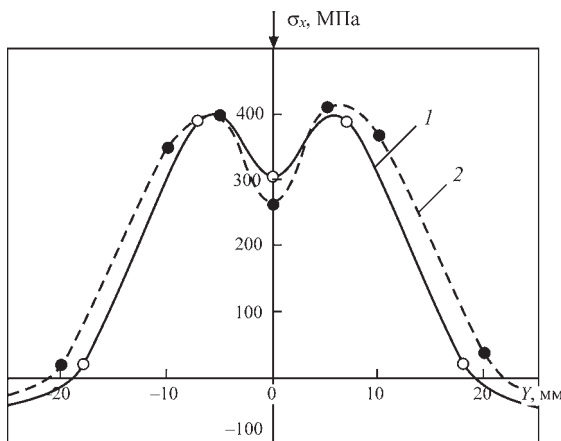


Рис. 11. Розподіл компоненти σ_x ЗЗН у поперечному перерізі зразка зварного з'єднання зразка нікелевого сплаву ММ3 (Ni) $\delta = 3$ мм до та після ЕДО: \circ – до ЕДО; \bullet – після ЕДО

за умов табл. 7 (рядок 7) представлено на рис. 10, з якого можна зробити висновок, що обробка має суттєво менший вплив на розподіл ЗЗН у порівнянні з попередніми результатами, що наведені на рис. 4–9. Так, у центрі шва ($Y = 0$) після ЕДО σ_x розтягу знижуються з 295 до 263 МПа, а уздовж ліній сплавлення ($Y = -5$ і 5 мм) – з 310 до 280 МПа.

Розподіл σ_x ЗЗН у зразку зі сплаву ММ3 (Ni) $\delta = 3$ мм до та після ЕДО за умов табл. 7 (рядок 8) представлено на рис. 11. У результаті досліджень встановлено, що ЕДО загалом позитивно впливає

Таблиця 8. Ефективність ЕДО зразків зварних з'єднань ММ

Номер зразка	Марка ММ	δ , мм	$\sigma_{x1}^*/\sigma_{x2}$, МПа	$(\sigma_{x1} - \sigma_{x2})/\sigma_{x1}$, %
1	ММ1 (Al)	1,0	205/150	30
2		3,0	180/-15	>100
3	ММ2 (Ti)	1,0	270/180	35
4		3,0	200/70	65
5	ММ4 (Fe-Cr-Ni)	1,0	723/0	100
6		3,0	400/0	100
7	ММ3 (Ni)	1,0	295/263	11
8		3,0	305/261	15

Примітка. σ_{x1}^* – максимальні значення σ_x розтягу ЗЗН до ЕДО; σ_{x2} – після ЕДО.

на розподіл ЗЗН у центрі шва ($Y = 0$), де σ_x розтягу після ЕДО знижуються з 305 до 261 МПа.

Узагальнення результатів оцінки ефективності впливу ЕДО на регулювання компоненти σ_x ЗЗН у зразках зварних з'єднань із ММ $\delta = 1$ і 3 мм представлено в табл. 8. Із наведених результатів можна зробити висновок, що ЕДО є ефективним механізмом регулювання залишкових напружено-деформованих станів зварних з'єднань зі сплавів Al і Ti завтовшки 3 мм (рядки 2 і 4 відповідно) та аустенітної сталі (рядки 5 і 6). При цьому оптимізація режимів ЕДО в рамках додаткових досліджень дасть змогу підвищити ефективність електродинамічного впливу для обробки зварних з'єднань меншої товщини з наданих матеріалів (щодо результатів, представлених у рядках 1 і 3).

Водночас результати, представлені в рядках 7 і 8, показують, що для підвищення ефективності ЕДО сплаву ММ3 (Ni) необхідно застосовувати більші значення енергії електродинамічних дій в рамках подальших досліджень. Доцільним є також використання нового методу для обробки зварних з'єднань зі сплаву ММ3 (Ni), що базується на магнітоімпульсних впливах на ЗЗН зварних з'єднань із неферомагнітних ММ [2, 3].

Із результатів проведених досліджень випливає, що застосування ЕДО сприяє зниженню ЗЗН розтягу тонколистових зварних з'єднань із досліджених ММ.

Висновки

1. Розроблено та реалізовано технологію електродинамічної обробки дослідних зразків тонколистових стикових зварних з'єднань зі сплавів на основі Al, Ni, Ti та аустенітної сталі.

2. Із застосуванням електронної спекл-інтерферометрії досліджено вплив електродинамічної обробки на поздовжню компоненту σ_x залишкових зварювальних напружень дослідних зразків.

3. Встановлено, що електродинамічна обробка забезпечує повне усунення залишкових зварювальних напружень розтягу в зварних з'єднаннях зі сплаву на основі Al та аустенітної сталі та зниження залишкових зварювальних напружень до 65 % від початкового рівня – у сплаві на основі Ti.

4. Встановлено, що електродинамічна обробка забезпечує незначне зниження залишкових зварювальних напружень розтягу (до 15 % від початкового рівня) у зварних з'єднаннях зі сплаву на основі Ni.

5. За результатами досліджень встановлено, що для підвищення ефективності електродинамічної обробки сплаву на основі Ni необхідні більші значення енергії електродинамічних дій або вико-

ристання методу обробки імпульсним магнітним полем.

6. Встановлено, що електродинамічна обробка є ефективним механізмом регулювання залишкових напружено-деформованих станів зварних з'єднань зі сплавів Al і Ti та аустенітної сталі.

Список літератури

- Masubuchi, K. (1980) *Analysis of welded structures*. Oxford, Pergamon Press.
- Razmyshlyayev, A.D., Ageeva, M.V. (2018) On mechanism of weld metal structure refinement in arc welding under action of magnetic fields (Review). *The Paton Welding J.*, **3**, 25–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.03.05>
- Дубоделов В.І., Горюк М.С. (2018) Застосування електромагнітних полів і магнітогідродинамічних явищ для інтенсифікації впливу на металеві системи: світовий та український досвід. *Наука про матеріали: досягнення та перспективи*. У 2–х т. Т. 2. Київ, Академперіодика, сс. 24–50.
- Волкогон В.М., Аврамчук С.К., Стрилец Е.В. (2005) Формирование упрочняющих покрытий под действием мощного электрического разряда. *Сб. тр. 5-й Междунар. науч.-техн. конф. «Инженерия поверхности и реновация изделий», 21–24 мая 2005, г. Ялта*, сс. 48–51.
- Conrad, H., Sprecher, A. (1989) *The electroplastic effect in metals*. Ed. by F.R.N. Nabarro. Elsevier Science Publishers B.V., Dislocations in Solids, pp. 500–529.
- Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Аврамов Ю.С. (2001) *Физические основы электроимпульсной и электропластической обработки и новые материалы*. Москва, МГИУ.
- Степанов Г.В., Бабущий А.И., Мамеев И.А. (2004) Неустационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсом электрического тока высокой плотности. *Проблемы прочности*, **4**, 60–67.
- Gu, S., Kobayashi, D., Yan et al. (2024) Achieving stress relief in martensitic stainless steel via high-density pulsed electric current treatment. *Metallurgical and Materials Transact. A: Physical Metallurgy and Materials Sci.*, **55(10)**, 3859–3868. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-024-07522-5>
- Zhang, X., Xiang, S., Yi, K., Guo, J. (2022) Controlling the residual stress in metallic solids by pulsed electric current. *Acta Metallurgica Sin.*, **58(5)**, 581–598. DOI: <https://doi.org/10.11900/0412.1961.2021.00367>
- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Yashchuk, V.A., Mikhodui, O.L. (2015) Effect of electrodynamic treatment on the fracture resistance of the AMg6 aluminum alloy under cyclic loading. *Strength of Materials*, **47**, 447–453. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-015-9676-5>
- Liu, C., Wang, M., Peng, H. et al. (2024) Pulse electric current induced interfacial ductile phase on improving the mechanical properties of the Au20Sn/Cu solder joints. *J. of Materials Sci.: Materials in Electronics*, **35(18)**, 1210. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-024-13002-8>
- Стрижало В.А., Новогрудский Л.С., Воробьев Е.В. (2008) *Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей*. Киев, ИПП.
- Пацин Н.А., Заруцкий А.В. (2016) Влияние электродинамической обработки материала на усталостную долговечность образцов с отверстиями. *Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми створення та забезпечення життєвого циклу авіаційної техніки», Харків, 20–21 квітня 2016 р.*, с. 16.
- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Cherkashin, A.V. et al. (2012) Repair welding of intermediate cases of aircraft engines from high-temperature magnesium alloy ML10 with application of electrodynamic treatment. *The Paton Welding J.*, **11**, 28–32.
- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Loginov, V.P. et al. (2010) Repair of ship hull structures of aluminium alloy AMg6 using electrodynamic treatment. *The Paton Welding J.*, **9**, 31–32.
- Lobanov, L.M., Korzhyk, V.M., Pashchyn, M.O. et al. (2022) Deformation-free TiG welding of AMg6 alloy with application of electrodynamic treatment of weld metal. *The Paton Welding J.*, **3**, 8–3. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.08.01>
- Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2022) Stress-strain state of welded joints of AMg6 alloy after electrodynamic treatment during welding. *Strength of Materials*, **54(6)**, 983–996. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00474-y>
- 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.
- Винокуров В.А. (1968) *Сварочные деформации и напряжения*. Москва, Машиностроение.

References

- Masubuchi, K. (1980) *Analysis of welded structures*. Oxford, Pergamon Press.
- Razmyshlyayev, A.D., Ageeva, M.V. (2018) On mechanism of weld metal structure refinement in arc welding under action of magnetic fields (Review). *The Paton Welding J.*, **3**, 25–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.03.05>
- Dubodelov, V.I., Goryuk, M.S. (2018) Application of electromagnetic fields and magnetohydrodynamic phenomena to intensify the effect on metal systems: World and Ukrainian experience. *Nauka pro Materialy: Dosiahennia ta Perspektyvy*. In 2 vols. Vol. 2. Kyiv, Akadempriodyka, 24–50 [in Ukrainian].
- Volkogon, V.M., Avramchuk, S.K., Strilets, E.V. (2005) Formation of hardening coatings under the action of powerful electric discharge. In: *Proc. of 5th Intern. Sci. and Techn. Conf. on Surface Engineering and Renovation of Products, 21–24 May 2005, Yalta*, 48–51 [in Russian].
- Conrad, H., Sprecher, A. (1989) *The electroplastic effect in metals*. Ed. by F.R.N. Nabarro. Elsevier Sci. Publ. B.V., Dislocations in Solids, 500–529.
- Baranov, Y.V., Troitskiy, O.A., Avramov, Y.S. (2001) *Physical bases of electroimpulse and electroplastic processing and new materials*. Moscow, MGU [in Russian].
- Stepanov, G.V., Babutskii, A.I., Mameev, I.A. (2004) High-density pulse current-induced unsteady stress-strain state in a long rod. *Strength of Materials*, **36**, 377–381. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:STOM.0000041538.10830.34>
- Gu, S., Kobayashi, D., Yan et al. (2024) Achieving stress relief in martensitic stainless steel via high-density pulsed electric current treatment. *Metallurg. and Mater. Transact. A: Physical Metallurgy and Materials Sci.*, **55(10)**, 3859–3868. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-024-07522-5>
- Zhang, X., Xiang, S., Yi, K., Guo, J. (2022) Controlling the residual stress in metallic solids by pulsed electric current. *Acta Metallurgica Sin.*, **58(5)**, 581–598. DOI: <https://doi.org/10.11900/0412.1961.2021.00367>
- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Yashchuk, V.A., Mikhodui, O.L. (2015) Effect of electrodynamic treatment on the fracture resistance of the AMg6 aluminum alloy under cyclic loading. *Strength of Materials*, **47**, 447–453. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-015-9676-5>
- Liu, C., Wang, M., Peng, H. et al. (2024) Pulse electric current induced interfacial ductile phase on improving the mechanical properties of the Au20Sn/Cu solder joints. *J. of Materials Sci.: Materials in Electronics*, **35(18)**, 1210. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-024-13002-8>
- Strizhalo V.A., Novogrudskiy L.S., Vorobyev E.V. (2008) *Strength of materials at cryogenic temperatures with account for the effect of electromagnetic fields*. Kyiv, ISP [in Russian].
- Pashchin, N.A., Zarutskiy, A.V. (2016) Influence of electrodynamic material treatment on fatigue life of samples with holes. In: *Intern. Sci. and Techn. Conf. on Problems of Creation and Maintenance of the Life Cycle of Aviation Equipment, Kharkiv, 20–21 April 2016*, 16 [in Russian].
- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Cherkashin, A.V. et al. (2012) Repair welding of intermediate cases of aircraft engines from high-temperature magnesium alloy ML10 with application of electrodynamic treatment. *The Paton Welding J.*, **11**, 28–32.
- Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Loginov, V.P. et al. (2010) Repair of ship hull structures of aluminium alloy AMg6 using electrodynamic treatment. *The Paton Welding J.*, **9**, 31–32.
- Lobanov, L.M., Korzhyk, V.M., Pashchyn, M.O. et al. (2022) Deformation-free TiG welding of AMg6 alloy with application

- of electrodynamic treatment of weld metal. *The Paton Welding J.*, **8**, 3–8. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.08.01>
17. Lobanov, L.M., Pashchyn, M.O., Mikhodui, O.L. et al. (2022) Stress-strain state of welded joints of AMg6 alloy after electrodynamic treatment during welding. *Strength of Materials*, **54**(6), 983–996. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-023-00474-y>
 18. 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.
 19. Vinokurov, V.A. (1968) *Welding deformations and stresses*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

ELECTRODYNAMIC TREATMENT TO CONTROL RESIDUAL STRESSES IN WELDED JOINTS MADE OF LIGHT HEAT-RESISTANT ALLOYS AND AUSTENITIC STEEL

L.M. Lobanov, M.O. Pashchyn, O.L. Mikhodui, O.M. Tymoshenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: olha.mikhodui@gmail.com

The technology of electrodynamic treatment (EDT) of prototypes of thin-sheet butt welded joints of Al, Ni, Ti alloys and austenitic steel was developed and implemented. Specialized assembly tooling was designed, which was used to perform automatic TIG welding of the prototypes. The effect of EDT on residual stresses in welded joint samples was studied using the electron speckle interferometry method. It was found that EDT is an effective mechanism for controlling the residual stressed states of welded joints of Al and Ti alloys and austenitic steel. It is shown that to improve the efficiency of EDT of a Ni-based alloy, it is necessary to use higher values of electrodynamic action energy in the framework of further research. It is also advisable to use a new processing method based on magnetic pulse effects on nonferromagnetic materials to optimize the residual stressed states of welded joints of Ni-based alloys. 19 Ref., 8 Tabl., 11 Fig.

Keywords: Al, Ni, Ti based alloys, austenitic steel, electrodynamic processing, transport structures, welded joints, electron speckle interferometry, residual stressed states, mechanical characteristics, chemical composition, processing efficiency, residual stress control

Отримано 15.04.2025

Отримано у переглянному вигляді 23.06.2025

Прийнято 05.08.2025

ЗВАРЮВАННЯ. МЕТАЛУРГІЯ. МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Серія книг та монографій під редакцією академіка НАН України І.В. Кривцуна

Ахонін С.В., Березос В.О., Северин А.Ю. Електронно-променева плавка зливків інтерметалідів на основі алюмінію титану. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2023. — 98 с.

У монографії розглянуто технологію електронно-променевої плавки зливків сплавів інтерметаліду системи Ti–Al. Проведено дослідження, які дозволили розробити методику вибору технологічних параметрів електронно-променевої плавки (ЕПП) зливків інтерметаліду TiAl за допомогою математичної моделі випаровування легуючих елементів, що дозволяє визначити точний хімічний склад вихідної шихти. Показано особливості кристалізації рідкого металу зливків сплавів інтерметаліду системи Ti–Al в умовах дії електронно-променевого нагріву. Досліджено можливість отримання зливків ЕПП інтерметаліду TiAl з введенням додаткових легуючих елементів Nb, Cr, Mo, Zr, V, La. Описано дослідні плавки зливків методом електронно-променевої плавки з проміжною ємністю. Наведено характеристики хімічного стану, макро-, мікроструктури та деяких механічних властивостей сплавів, отриманих методом ЕПП. Розглянуто можливість деформаційної обробки інтерметаліду TiAl, додатково легуваного бором і лантаном. Описано мікроструктуру та механічні властивості деформованого та термічно обробленого металу.

Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В. Аргодугове та електронно-променево зварювання економнолегованих титанових сплавів. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2024. — 136 с.

Монографія присвячена детальному дослідженню процесів формування зварних з'єднань економнолегованих титанових сплавів методами аргодугового та електронно-променевого зварювання. Особлива увага приділена аналізу мікроструктури та механічних властивостей зварних швів, а також фазовому складу матеріалу після різних видів зварювання. Розглянуто вплив термічної обробки на характеристики з'єднань та їхню поведінку в експлуатаційних умовах. Дослідження мікроструктури проводились із використанням сучасних методів мікроскопії, що дозволило виявити особливості розподілу фаз та вплив параметрів зварювання на розмір зерен, морфологію та дефекти в зварних швах. Механічні випробування показали, як різні режими зварювання та термічна обробка впливають на міцність, твердість і пластичність з'єднань, що є критично важливим для оцінки їх надійності в різних умовах експлуатації. У монографії детально розглянуто фазовий склад матеріалів і трансформації фаз під час зварювання, а також вплив охолодження на фазові перетворення.

Замовлення монографій

ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ ПАТОН»

Тел.: 38044 205-23-90 | journal@paton.kiev.ua

