

ВИКОРИСТАННЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО ЗВАРЮВАННЯ ДЛЯ З'ЄДНАННЯ ПЛАСТИН З ОДНОРІДНИХ ТА РІЗНОРІДНИХ СПЛАВІВ

М.А. Полещук, І.В. Матвеев, В.О. Бовкун, Л.І. Адєєва, А.Ю. Туник

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В роботі проаналізовано поточний стан та підтверджена актуальність досліджень процесу магнітно-імпульсного зварювання плоских деталей з однорідних та різнорідних металів. Наведено результати досліджень можливості здійснення магнітно-імпульсного зварювання плоских зразків на модифікованій серійній установці Н-126А за допомогою експериментального плоского прямокутного індуктора. Наведена схема процесу. Описана технологія отримання з'єднань плоских металевих деталей товщиною 1,0...1,5 мм з однорідних матеріалів зі сплавів алюмінію А5Н та АМГ2, а також з різнорідних – міді, сплаву А5Н та сплаву АМГ2 з нержавіючою сталлю 12Х18Н10Т (нагартованою). Проведені металографічні дослідження показали, що загальним для МІЗ однорідних і різнорідних металів є специфічне з'єднання зварювальних пластин в зонах (ділянках), рівновіддалених від центру плоского витка індуктора. Товщина рухомих пластин зменшується, а мікротвердість в зонах зварювання зростає. Зафіксовано якісне зварювання в межах двозонавої форми з'єднання. Якість зварного з'єднання оцінювалося за результатами випробувань на механічну міцність. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: магнітно-імпульсне зварювання, холодне зварювання, зварювання у твердому стані, мікроструктура, мікротвердість

Мета роботи – вивчення актуальних тенденцій розвитку технології магнітно-імпульсного зварювання (МІЗ), дослідження можливості якісного МІЗ плоских зразків з однорідних і різнорідних металів та сплавів вітчизняного виробництва, металографічне вивчення формування зварного з'єднання.

МІЗ (magnetic pulse welding) – відносно нова технологія в порівнянні з традиційними методами зварювання. Це процес холодного зварювання в твердому стані струмопровідних металів, в якому використовується дія імпульсного магнітного поля індуктора. При взаємодії струму індуктора з індуктованим струмом в деталі виникають сили відштовхування між індуктором і деталлю. Внаслідок цього деталь, отримуючи високу швидкість руху, переміщується до нерухомої деталі. Зіткнення поверхонь призводить до виникнення істотних пластичних деформацій, які забезпечують утворення зварного з'єднання. Швидкість зіткнення досягає більш ніж 300 м/с, а тиск у зоні контакту – до $10^2...10^4$ МПа [1].

На сьогодні вже є достатньо прикладів промислового впровадження МІЗ при виробництві корпусних конструкцій транспортних засобів, в аерокосмічній галузі, ядерній енергетиці, ВПК та ін. [2].

Особливий інтерес ця технологія викликає при виробництві корпусних конструкцій транспортних засобів, перш за все через можливість зварювання різнорідних металів. При цьому виділяють наступні переваги технології: зварювання між со-

бою однорідних і різнорідних металів, абсолютна відсутність термічних деформацій, висока швидкість зварювання (тривалість імпульсу ~ 30 мкс), висока якість зварювання і повторюваність результатів, низька енергоємність (~ 10 раз менше, ніж при МІГ зварюванні), можливість автоматизації процесу, можливість виконувати прямолінійні зварні з'єднання протяжністю до 3 м. При МІЗ немає необхідності в операції очищення деталей, в витратних матеріалах (зварювальний дріт, газ) та в локальній витяжній вентиляції через відсутність шкідливих викидів.

Фахівці заявляють, що глибоке впровадження МІЗ дозволить створювати полегшені рами та інші елементи автомобільних конструкцій з різнорідних металів, яке призведе до зниження їх ваги до 70 %, а також до зменшення споживання палива на 10 %. Це сприятиме зниженню шкідливих викидів в навколишнє середовище, в тому числі і при виробництві автомобілів («зелена технологія») [3]. Експерти стверджують також, що потенціал МІЗ дуже великий і реальне масове розгортання передбачається в найближчі роки [4]. На даний час, з моменту винаходу цієї технології, переважна кількість робіт в цій області стосується МІЗ тіл обертання. Процес МІЗ плоских деталей був запропонований відносно недавно, і кількість публікацій за останні роки на тему досліджень в цій галузі зростає, але дуже повільно. На нашу думку дослідники не квапляться розкривати технологічні тонкощі процесу.

Полещук М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-5992-4641>, Матвеев І.В. – <https://orcid.org/0000-0003-0683-0761>,

Бовкун В.О. – <https://orcid.org/0000-0001-7019-8671>, Туник А.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-6801-6461>

© М.А. Полещук, І.В. Матвеев, В.О. Бовкун, Л.І. Адєєва, А.Ю. Туник, 2020

Але це не применшує актуальності теми. Про це свідчить факт створення в рамках Європейського Союзу масштабного проекту «JOIN'EM» [5], спрямованого на вивчення процесів зварювання різно-рідних металів (переважно мідь-алюмінієвих виробів, в тому числі плоских) методом МІЗ. Цей проект заснований у 2017 р. і працює в рамках програми Євросоюзу Horizon 2020 Research and Innovation Programme [6]. Тобто, вперше в сучасній історії зварювання, на європейському міждержавному рівні було прийнято рішення про підтримку досліджень з МІЗ як технології, що найбільш повно відповідає основним викликам завтрашнього дня.

Зниження ваги конструкцій – це один із шляхів для досягнення цієї відповідності. Послідовна заміна традиційних сплавів на основі заліза легкими і спеціальними сплавами, а також їх комбінаціями з традиційними – один з головних трендів сучасної індустрії. В технологічному плані це піднімає проблеми з'єднання різно-рідних металів, які не можливо отримати традиційними методами зварювання плавленням. Ще одним істотним фактором, що підживлює інтерес до технологій з'єднання різно-рідних металів у даний час, є проблема заміни деталей і виробів з міді і мідних сплавів на гібридні мідь-алюмінієві вироби [7], які з'єднуються за допомогою зварювання в холодному стані. У цьому випадку всі види зварювання плавленням не гарантують якісне з'єднання.

Актуальність цієї теми обумовлюється тим, що мідь є більш коштовним металом в порівнянні, наприклад, з алюмінієм (приблизно в 2...4 рази). Вартість її постійно росте через швидке зростання потреби в ній практично у всіх секторах економіки, особливо у електротехнічній, електронній промислові та у енергетиці. У той же час алюміній дуже близький до міді по теплопровідності та електропровідності (~ 60 %), при значно меншій питомій щільності (~ 30 %) і вартості.

В результаті дослідницьких робіт в ІЕЗ ім. Є.О. Патона були розроблені технологічні прийоми МІЗ плоских металічних деталей та отримані зразки, з'єднані за допомогою цього процесу. Актуальність має також реалізація процесу МІЗ на мета-



Рис. 1. Установа Н-126А

лах і сплавах вітчизняного виробництва, склад та властивості яких часто відрізняються від тих аналогів, що виробляються за кордоном.

Для проведення експериментів було проведено модернізацію серійної установки Н-126А (рис. 1) для МІЗ циліндричних деталей, яка вироблялась Дослідним заводом зварювального устаткування ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Зокрема, внесені зміни в електросхему, в конструкцію високовольтних струмопідводів та дугового розрядника.

Експерименти проводились на напрузі заряду 10...18 кВ, при максимальному струмі 200...500 кА. Комутація струму проводилася за допомогою керованого дугового розрядника типу «тригatron». Загальна ємність конденсаторів становила 115 мкФ. Ширина робочого витка індуктора дорівнювала 5 мм. Процес виміру струму проводився за допомогою надшвидкісного USB осцилоскопу DATAMAN 570 та відповідного програмного забезпечення для обробки та постобробки отриманих даних.

Загальна схема процесу одностороннього МІЗ плоских деталей з застосуванням одновиткового Е-образного індуктора приведена на рис. 2, а схема руху деталі, що зварюється, на рис. 3.

В роботі використовувалися плоскі зразки металевих сплавів товщиною 1,0...1,5 мм. Для оцінювання результатів використовували квалітаивний підхід.

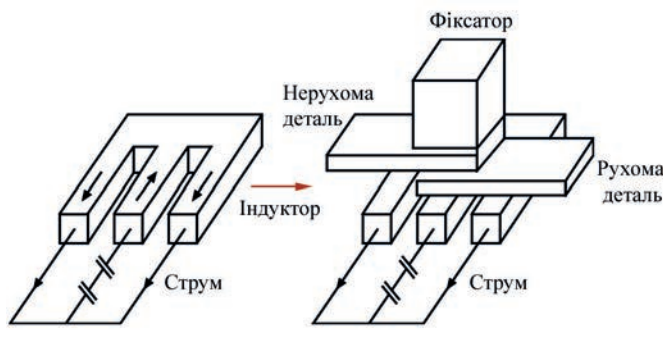
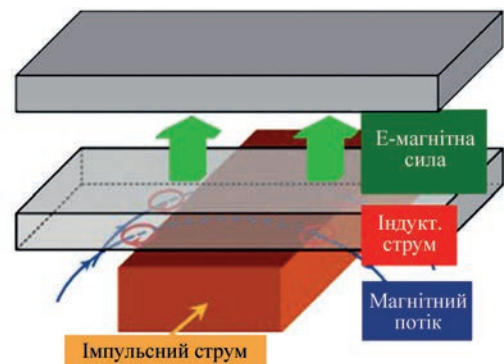


Рис. 2. Загальна схема процесу МІЗ плоских деталей



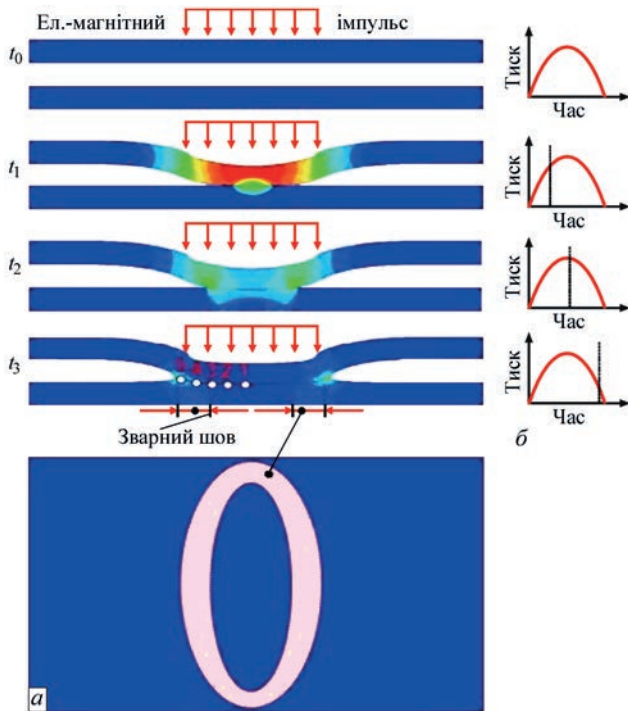


Рис. 3. Схема руху деталі, що зварюється (а), і форма зварної зони (б)

Зовнішній вигляд деяких зразків, з'єднаних за допомогою МІЗ, показаний на рис. 4.

Для одержання з'єднання однорідних і різнорідних металів методом МІЗ були використані пластини: сплавів алюмінію А5Н та АМГ2, міді марки М1 та нержавіючої сталі 12Х18Н9Т нагартованої.

А5Н – пластичний, стійкий до корозії сплав, який містить мінімальну кількість домішок. Склад сплаву, мас. %: > 99,5 Al; < 0,3 Fe; < 0,25 Si та

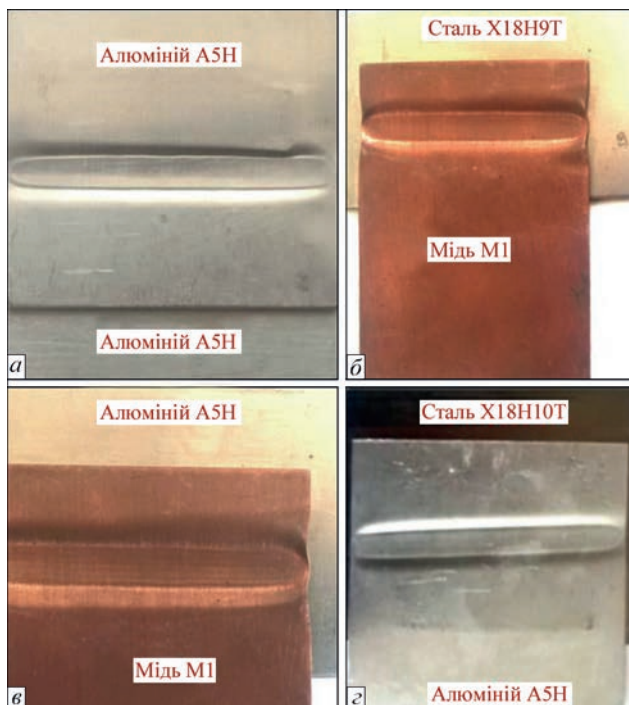


Рис. 4. Зовнішній вигляд плоских зразків, з'єднаних за допомогою МІЗ: а – однорідні; б-г – різнорідні метали

інші домішки (Ti, Mn, Cu, Mg Zn, Ga). «Н» означає нагартований стан, тобто завдяки додатковій обробці листи набувають більшу жорсткість, але мають меншу еластичність. Мікротвердість сплаву становить 465 МПа. АМГ2 – алюмінієвий сплав алюмінію, що деформується. Його склад, мас. %: > 95,7...98,2 Al; 1,7...2,4 Mg та інші домішки (Fe, Ti, Mn, Cu, Cr, Zn), всього 0,15. Мікротвердість сплаву становить 605 МПа. М1 – безкиснева мідь, що містить, мас. %: 99,95 Cu; 0,003 O₂; 0,002 P. Мікротвердість міді становить 890 МПа. 12Х18Н9Т нагартована – нержавіюча сталь, яка є корозійностійкою і жароміцною, містить такі легуючі елементи і домішки, мас. %: ≤ 0,12 C; 17,0...19,0 Cr; 8,0...9,5 Ni; 0,80 Ti; ≤ 0,8 Si; ≤ 2,0 Mn; ≤ 0,020 S; ≤ 0,035 P. Мікротвердість сталі 4630 МПа.

При проведенні досліджень застосовували методику, що включає металографію – оптичний мікроскоп «НЕОРНОТ-32», дюриметричний аналіз – твердомір М-400 фірми «LECO» при навантаженні 0,098 та 0,249 Н. Хімічне травлення металографічних шліфів проводили за допомогою наступних реактивів: водний 50 % розчин HNO₃ (виявлення структури міді); HNO₃:HCl:H₂O у співвідношенні 3:1:1 (виявлення структури алюмінієвих сплавів).

Загальним для МІЗ пластин однорідних і різнорідних металів є специфічне з'єднання зварювальних пластин (рис. 3, б; рис. 5, зони 1, 2) в двох зонах (ділянках), рівновіддалених від центру плоского витка індуктора [8–10].

При зварюванні пластин алюмінієвого сплаву А5Н при напрузі 16 кВ, з'єднання відбувалося в двох ділянках протяжністю 0,52 мм, розташованих на відстані 1,02 мм від центру плоского витка індуктора. Товщина пластин в цих ділянках зменшувалася для верхньої і нижньої пластин на 20 і 24 %, відповідно, в порівнянні з вихідною товщиною (1,0 мм). Мікротвердість рухомої і нерухомої пластин зросла не більш, як на 3 %, в порівнянні з вихідним станом сплаву (HV_{0,1} – 465 МПа, таблиця). При більшій напрузі МІЗ (18 кВ), протяжність ділянок охоплення збільшується до 1,72 та 2,32 мм. Товщина обох пластин зменшується на 30 %, твердість зростає до 9 % (рис. 5, таблиця).

При зварюванні сплаву АМГ2, який має більшу твердість (607 МПа), ніж сплав А5Н, фіксується дві ділянки з'єднання протяжністю 1,28 та 1,04 мм на відстані 1,06 від центру впливу імпульсу. У порівнянні з вихідним станом, товщина в зонах з'єднання зменшилася на 20 %, а мікротвердість збільшилася до 32 % (рис. 6, таблиця).

При зварюванні різнорідних металів – алюмінієвого сплаву АМГ2 з нержавіючою сталлю 12Х18Н10Т, також спостерігаються по дві хви-

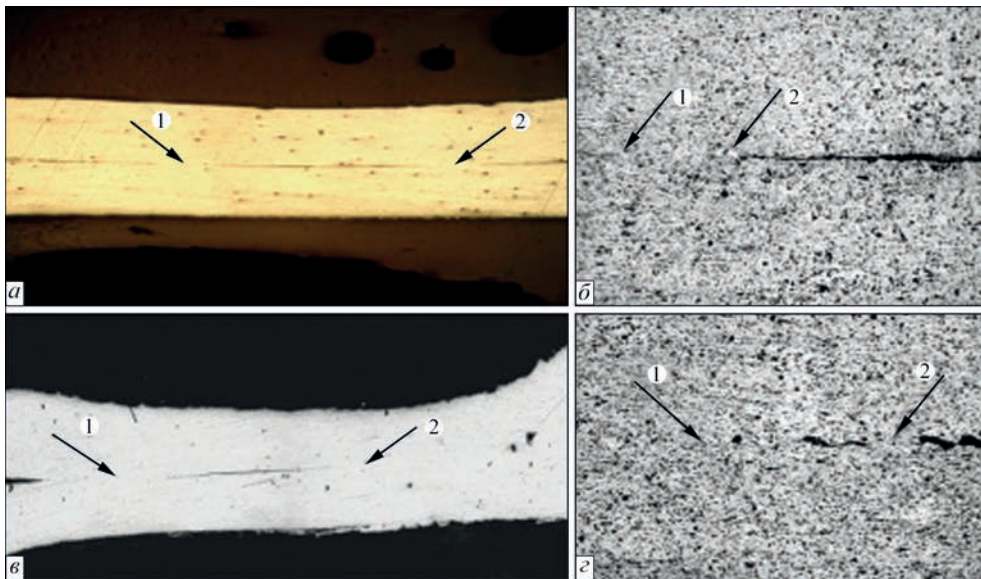


Рис. 5. Мікроструктура з'єднань однорідних пластин сплаву А5Н, одержаних МІЗ при напрузі 16 кВ (а, б) та 18 (в, г): (а, в) – $\times 25$; (б, г) – $\times 400$ (травлено)

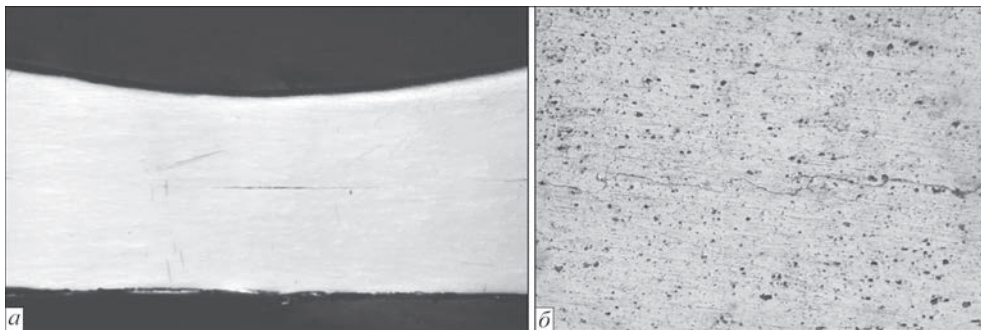


Рис. 6. Мікроструктура з'єднань однорідних пластин сплаву АМГ2, одержаного МІЗ при напрузі 18 кВ: а – $\times 25$; б – $\times 400$ (травлено)

леподібні ділянки з'єднання протяжністю 1,4 та 1,0 мм на відстані 1 мм від центру ініціювання розряду. Мікротвердість рухомої пластини АМГ2 дещо зростає (3 %), а нержавіючої сталі практично залишається незмінною. Товщина рухомої пластини зменшується на 38 %, а нерухомої пластини не змінюється (рис. 7, таблиця).

При МІЗ пластин міді марки М1 (рухома) і нержавіючої сталі 12Х18Н10Т (нерухома) зварювання спостерігається на двох ділянках протяжністю 0,5 та 0,4 мм, на відстані 0,1 та 0,2 мм від центру ініціювання розряду. Ділянка з'єднання носить хвилеподібний характер. Товщина рухо-

мої мідної пластини зменшилась на 43 %, а її мікротвердість в зонах зварювання зросла на 22 %. Товщина і мікротвердість нерухомої пластини не змінилися (рис. 8, таблиця).

Якщо металом рухомої пластини є мідь, а нерухомою алюмінієвий сплав А5Н, спостерігаються дві хвилісті ділянки з'єднання металів завдовжки 0,57 мм, які спостерігаються на відстані 1,7 мм від центру ініціювання розряду. Товщина рухомої мідної пластини зменшилась на 44, а нерухомої алюмінієвої – на 25 %. Мікротвердість міді в зонах з'єднання збільшилась на 50 %, а мікротвердість алюмінію підвищилась на ~ 13 % (рис. 9, табл. 1).

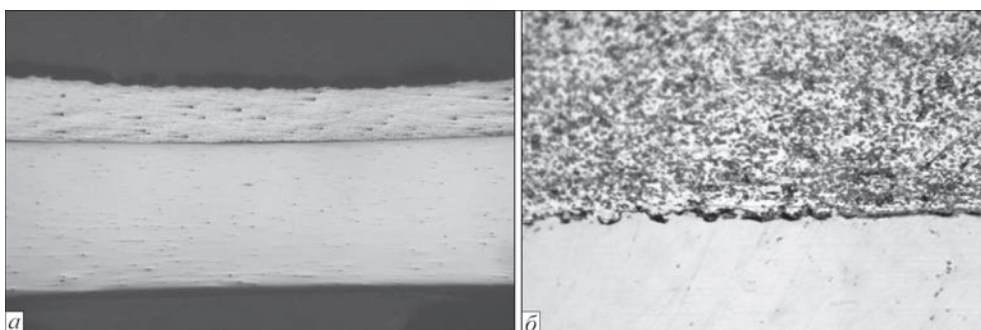


Рис. 7. Мікроструктура з'єднання різнорідних пластин сплаву АМГ2 та нержавіючої сталі Х18Н10Т, одержаного МІЗ при напрузі 18 кВ: а – $\times 25$; б – $\times 400$ (травлено)

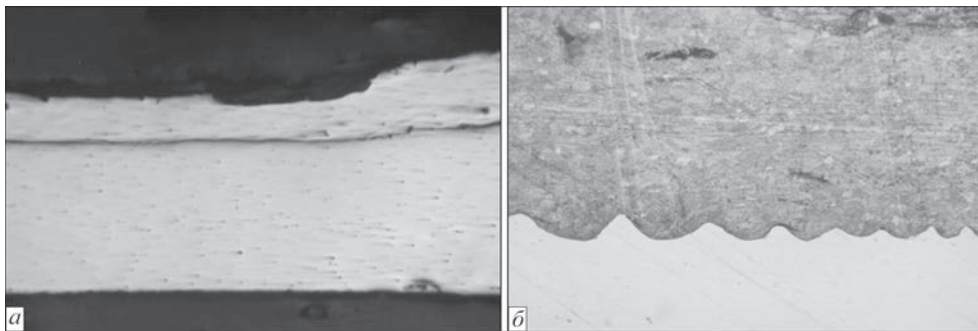


Рис. 8. Мікроструктура з'єднання різнорідних пластин міді М1 та нержавіючої сталі Х18Н10Т, одержаного МІЗ при напрузі 18 кВ: а – ×25; б – ×400 (травлено)

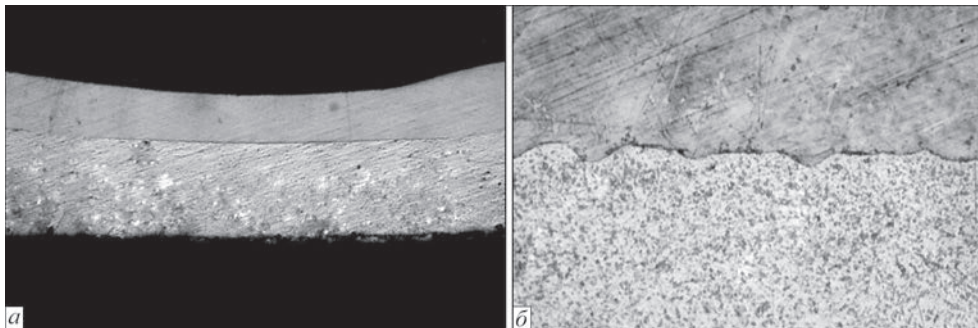


Рис. 9. Мікроструктура з'єднання міді (М1) та алюмінієвого сплаву А5Н: а – ×25; б – ×400 (травлено)

Характеристика з'єднань, отриманих методом МІЗ

Матеріали, що з'єднуються (марка)	U, кВ	Зазор між пластинами, мм	Товщина пластин, мм		Відстань від центру, мм	Ділянки з'єднання, мм		HV01 OM, МПа	HV01, в ділянках з'єднання, МПа
			До МІЗ	Після МІЗ		I	II		
Al A5H / Al A5H	16	0,8	1 / 1	0,80 / 0,72	1,02	0,52	0,52	465	(I) 478 (II) 468
Al A5H / Al A5H	18	0,8	1 / 1	0,44 / 0,44	1,00	1,72	2,32	462	(I) 502 (II) 478
Al AMГ2 / Al AMГ2	18	1,0	1 / 1	0,80 / 0,88	1,06	1,28	1,04	607	(I) 804 (II) 736
Al Сталь (12Х18Н9Т) / (AMГ2)	18	1,0	1 / 1,5	0,62 / 1,5	1,00	1,40	1,00	515 / 4630	(I) 530 (II) 496
Cu (M1) / Сталь (12Х18Н9Т)	18	0,8	0,8 / 1,5	0,46 / 1,5	1,20	0,50	0,4	891 / 4630	(I) 1078 (II) 1200
Cu (M1) / Al (A5H)	18	0,8	0,8 / 1,2	0,45 / 0,90	1,70	0,57	0,57	768 / 376	(I) 1216 (II) 1188

Якість зварного з'єднання оцінювалася за результатами випробувань на механічну міцність. Оцінка з'єднань проводилася відривом рухомої пластини від нерухомої (основи). Зразки, що демонструють прийнятну якість з'єднання, розривалися по металу рухомого листа, як правило більш м'якого і менш міцного, ніж метал основи.

Висновки

1. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона на модернізованій установці Н-126А проведено МІЗ плоских зразків з однорідних і різнорідних металів та сплавів вітчизняного виробництва.

2. Металографічними дослідженнями встановлено, що з'єднання паралельних пластин металів відбувається в двох ділянках, розташованих на однаковій відстані від центру плоского витка індуктора.

3. Встановлено формування якісного зварного з'єднання в межах вказаних ділянок. Зразки розривалися по металу рухомого листа, як правило більш м'якого і менш міцного, ніж метал основи.

4. Актуальні тенденції розвитку технології і досліджень в галузі МІЗ дозволяють зробити наступні ствердження:

– МІЗ є ефективною технологією, з великим науково-практичним потенціалом і вимагає по-

дальшого проведення науково-дослідницьких робіт з техніки і технології зварювання однорідних і різнорідних металів;

– об'єктами досліджень і розробок будуть технологічні аспекти МІЗ щодо поліпшення зварюваності як існуючих матеріалів, так і нових; зменшення енергоємності процесу; дослідно-конструкторські розробки щодо вдосконалення інструментів (спеціальних видів індукторів та ін.).

Список літератури/References

1. https://app.aws.org/wj/supplement/WJ_2015_08_s257.pdf
2. Miranda, R.M., Tomás, B., Santos, T.G., Fernandes, N. *Magnetic pulse welding on the cutting edge of industrial applications*. <http://www.scielo.br/pdf/si/v19n1/a09v19n1.pdf>
3. Dana: *Magnetic-pulse welding*. November 06, 2000. <https://europe.autonews.com/article/20001106/ANE/11060872/dana-magnetic-pulse-welding>
4. The next wave in manufacturing. Solid state cold welding. *Automotive industries*. October, 2007. http://www.ai-online.com/Adv/Previous/show_issue.php?id=1982
5. André Cereja et al. *The JOIN'EM Project: How to join dissimilar metals with electromagnetic welding*. <https://www.machinedesign.com/mechanical/join-em-project-how-join-dissimilar-metals-electromagnetic-welding>, <http://join-em.eu/>
6. *Program Horizon 2020*. <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en>
7. Zhang, Y., L'Eplattenier, P., Daehn, G.S., Babu, S. (2009) Numerical simulation and experimental study for magnetic pulse welding process on AA6061-T6 and Cu101 sheet. *ASM International*, 715–720.
8. Aizawa T., Okogawa K., Yoshizawa M., Henmi N. (2001) Impulse magnetic pressure seam welding of aluminium sheets. *Impact Eng. Appl.*, 827–32.
9. Aizawa, T. (2004) Methods for electromagnetic pressure seam welding of Al/Fe sheets. *Weld. Int.*, 18, 11, 868–72.
10. Kore, S.D., Date, P.P., Kulkarni, S.V. (2007) Effect of process parameters on electromagnetic impact welding of aluminium sheets. *International J. of Impact Engineering*, 34, 1327–1341.

USE OF MAGNETIC PULSE WELDING FOR JOINING PLATES FROM SIMILAR AND DISSIMILAR ALLOYS

M.A. Polieshchuk, I.V. Matveiev, V.O. Bovkun, L.I. Adeeva, A. Yu. Tunik

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

In the work the current state is analyzed and the relevance of investigations of the process of magnetic pulse welding of flat parts from similar and dissimilar metals is confirmed. The results of investigations of possibility of realization of magnetic pulse welding of flat specimens on the modified serial installation N-126A by means of experimental pancake rectangular inductor are given. The scheme of the process is given. The technology of producing joints of flat metal parts with a thickness of 1.0...1.5 mm from similar materials from aluminum A5N and AMg2 alloys, as well as from dissimilar – copper, A5N and AMG2 alloy with stainless steel 12Kh18N10T (hardened) is described. The carried out metallographic examinations showed that common for magnetic pulse welding of similar and dissimilar metals is a specific joining of welding plates in the areas equidistant from the center of the flat coil of the inductor. The thickness of the moving plates decreases, and the microhardness in the welding zones increases. The quality welding was fixed within the two-zone shape of joining. The quality of the welded joint was evaluated by the results of mechanical strength tests. 10 Ref. 1 Tabl., 9 Fig.

Keywords: magnetic pulse welding, cold welding, solid state welding, microstructure, microhardness

Надійшла до редакції 07.05.2020