

# МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНЕ ЗВАРЮВАННЯ МІДНИХ КІЛЕЦЬ ЗІ СТАЛЕВИМИ ДЕТАЛЯМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ОДНОВИТКОВОГО ІНДУКТОРА

М. Полещук<sup>1</sup>, І. Матвеев<sup>1</sup>, В. Бовкун<sup>1</sup>, Я. Селех<sup>2</sup>, А. Тунік<sup>1</sup>, О. Черкашин<sup>1</sup>, Л. Кистерська<sup>3</sup>, К. Секерський<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

<sup>2</sup>Познанська політехніка. 60-965, м. Познань, площа М. Склодовської-Кюрі, 5, Польща

<sup>3</sup>Українсько-американське СП «Маркетинг надтвердих матеріалів». 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна

<sup>4</sup>NxTechnologies, 60-125, Познань, вул. Боза, 4/6-24, Польща

Магнітно-імпульсне зварювання – це інноваційний метод з'єднання, який дозволяє сполучати різнорідні метали. У статті обговорюється зварюваність мідних кілець зі сталевими стрижнями з метою вивчення можливості застосування одновиткового індуктора. Усі зразки було зварено з енергією розряду 18 кДж. Спостерігалися значні деформації мідних кілець. Металографічне дослідження зварних швів виявило відсутність дефектів. Відзначено якісне з'єднання металів у зоні зварювання з характерною хвилястою межею розділу. Однак щоб отримати більше інформації про точні механізми формування зварного шва рекомендується чисельне моделювання процесу. Бібліогр. 11, рис. 8, табл. 2.

*Ключові слова:* магнітно-імпульсне зварювання, холодне зварювання, зварювання у твердому стані, мідь, сталь, кільця, мікроструктура, мікротвердість

**Вступ.** Магнітно-імпульсні технології знаходять все більш широке застосування в сучасній промисловості та, зокрема, в зварюванні. Для них характерні більш динамічне зростання науково-технічних публікацій в порівнянні з багатьма традиційними методами зварювання [1, 2].

Магнітно-імпульсне зварювання (МІЗ) – це зварювання в твердій фазі, яке здійснюється в результаті зіткнення з'єднуваних поверхонь під дією імпульсного магнітного поля індуктора та наведеного цим полем струму у металевих деталях. При взаємодії струму індуктора (рис. 1) з індуктованим струмом у деталі виникають сили відштовхування між індуктором і деталлю. Внаслідок цього деталь на ділянці під індуктором, отримуючи високу швидкість руху, переміщується до нерухомої деталі. Утворення зварного з'єднання забезпечується за рахунок пластичних деформацій в результаті зіткнення поверхонь. Швидкість зіткнення сягає сотень м/с, а тиск у зоні контакту – тисяч МПа [3, 4]. Загальна схема процесу МІЗ циліндричних деталей приведена на рис. 1.

Виділяють наступні переваги технології: зварювання між собою як однорідних, так і різнорідних металів; відсутність термічних деформацій; висока швидкість зварювання (тривалість імпульсу ~ 30 мкс); висока якість зварювання і повторюваність результатів; низька енергоємність (приблизно у 10 разів менше, ніж при MIG зварюванні); можливість автоматизації процесу; можливість виконувати прямолінійні зварні з'єднання протяж-

ністю до 3 м. При процесі МІЗ немає необхідності в операції очищення деталей, витратних матеріалах (зварювальний дріт, газ) та локальній витяжній вентиляції через відсутність шкідливих викидів. Також слід зазначити, що традиційні способи зварювання кілець з циліндричними деталями не задовольняють потреби сучасної промисловості в плані технологічності, якості, продуктивності, ціни та впливу на оточуюче довкілля. З цієї точки зору технологія МІЗ для багатьох випадків є технологією вибору. Особливо це стосується випадків, коли деталі працюють у трибологічній парі тертя «мідне кільце – сталевий циліндр» і де є високі вимоги до відсутності твердих включень у матеріалі кілець та вимоги до продуктивності процесу.

Все це ініціювало цілу низку заходів у рамках ООН та Євросоюзу та викликало створення маш-

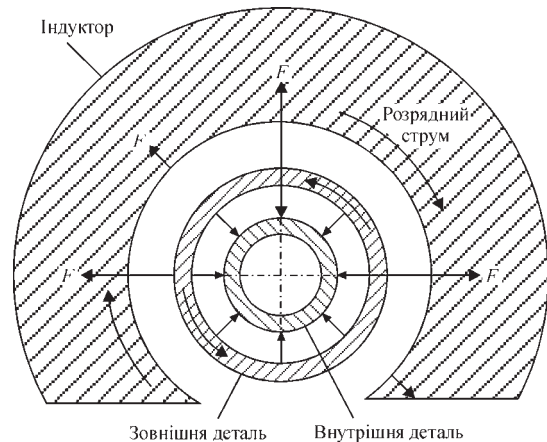


Рис. 1. Схема процесу МІЗ циліндричних деталей

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>, Тунік А.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-6801-6461>,

Черкашин О.В. <https://orcid.org/0000-0001-9978-6848>

© М. Полещук, І. Матвеев, В. Бовкун, Я. Селех, А. Тунік, О. Черкашин, Л. Кистерська, К. Секерський, 2022

табного міжнародного проекту JOIN'EM, що націлений на вивчення деяких аспектів магнітно-імпульсного зварювання [5–7].

Більшість науково-технічних публікацій по цій темі присвячені МІЗ циліндричних деталей (труба–труба, труба–стрижень) [8, 9] з використанням багатовиткових індукторів та концентраторів магнітного поля. З урахуванням деяких відмінностей протікання процесів деформування труб та кілець при МІЗ та підвищених втрат енергії при використанні таких індукторів з концентраторами поля, авторами запропоновано для зварювання деталей типу «мідне кільце – сталевий стрижень/труба» використання одновиткових індукторів (рис. 2), що дозволяє отримувати якісне з'єднання при енергії розряду менше ніж 35 [9] та 20 кДж [8].

Актуальність має також реалізація процесу МІЗ на металах і сплавах вітчизняного виробництва, склад та властивості яких часто відрізняються від тих аналогів, що виробляються за кордоном.

**Матеріали, обладнання та методика досліджень.** Дослідження проводили з використанням модифікованої установки Н-126А. Ця установка була розроблена в ІЕЗ ім. Є.О. Патона і була першою сертифікованою у ЄС установкою для МІЗ, виробленою промисловою партією.

При проведенні металографічних досліджень застосовували методику, що включає металографію – оптичний мікроскоп «NEOPHOT-32», д्यо-

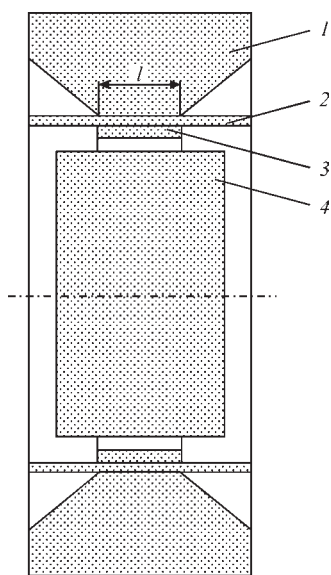


Рис. 2. Схема одновиткового індуктора з заготовками перед зварюванням: 1 – індуктор; 2 – ізолятор; 3 – мідне кільце; 4 – сталеві заготовки-мішені

Таблиця 1. Хімічний склад (мас. %) матеріалу сталь 3сп ДСТУ 4484:2005/ГОСТ

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	N	Cu	As
0,14...0,22	0,15...0,3	0,4...0,65	≤0,3	≤0,05	≤0,04	≤0,3	≤0,008	≤0,3	≤0,08

Таблиця 2. Хімічний склад (мас. %) матеріалу мідь М1 ДСТУ EN 1057:2016

Fe	Ni	S	As	Pb	Zn	O	Sb	Bi	Sn	-
≤0,005	≤0,002	≤0,004	≤0,002	≤0,005	≤0,004	≤0,05	≤0,002	≤0,001	≤0,002	Cu+Ag min 99.9

метричний аналіз – твердомір М-400 фірми «LECO» при навантаженні 0,098 та 0,249 Н.

Структурна схема побудови Н-126А показана на рис. 3.

Процес виміру струму проводився за новим способом, запропонованим в ІЕЗ ім. Є.О. Патона і який оцінюється як альтернатива традиційному способу, де використовується так званий пояс Роговського. При вимірах використовувався швидкісний USB осцилоскоп DATAMAN 570 та відповідне програмне забезпечення для обробки та постобробки отриманих даних.

Для дослідження з'єднань різномірних металів методом МІЗ були підготовлені циліндричні зразки зовнішнім діаметром  $D_{\text{зов}}$  – 26,3 мм зі сталі 3сп (табл. 1) та кільця з міді марки М1 (табл. 2) зовнішнім діаметром  $D_{\text{зов}}$  – 30,6 мм, внутрішнім діаметром  $D_{\text{внут}}$  – 28,6 та шириною 7 мм.

Також був виготовлений лабораторний одновитковий індуктор (рис. 4), ізолятори та центратори зразків.

**Результати досліджень і обговорення.** Процес приварювання кілець з міді марки М1 до сталевих зразків зі сталі 3сп (рис. 5) здійснювали при напрузі заряду на батареї конденсаторів 18 кВ. Загальна ємність конденсаторів становила 115 мкФ. Комутація струму проводилася за допомогою керованого дугового розрядника типу «тригatron». Ширина робочого витка індуктора дорівнювала 6 мм. З досвіду попередніх експериментів встановлено, що для даної геометричної конфігурації деталей оптимальний зазор між ними становить 1,15 мм. Перед процесом зварювання зразків провели реєстрацію

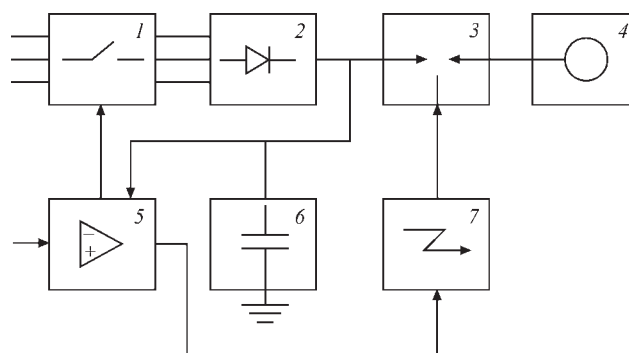


Рис. 3. Структурна блок-схема побудови установки Н126: 1 – керований мережевий розмикач; 2 – високовольтний випрямляч; 3 – керований газорозрядний комутатор (тригatron); 4 – робочий індуктор; 5 – блок автоматики з ручним задачиком напруги; 6 – блок силових високовольтних конденсаторів; 7 – керований блок підпалу дуги (осцилятор)



Рис. 4. Лабораторний індуктор



Рис. 5. Зразки, з'єднані за допомогою МІЗ

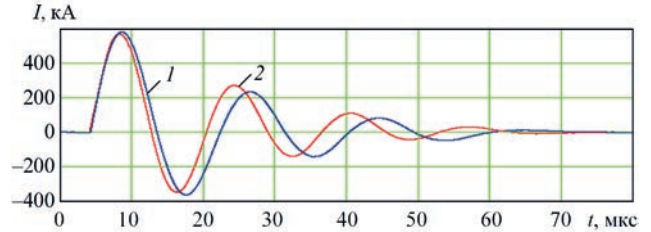


Рис. 6. Осцилограми струмів при МІЗ при енергії заряду конденсаторної батареї 18 кДж: 1 – індуктор без заготовки; 2 – індуктор із заготовкою

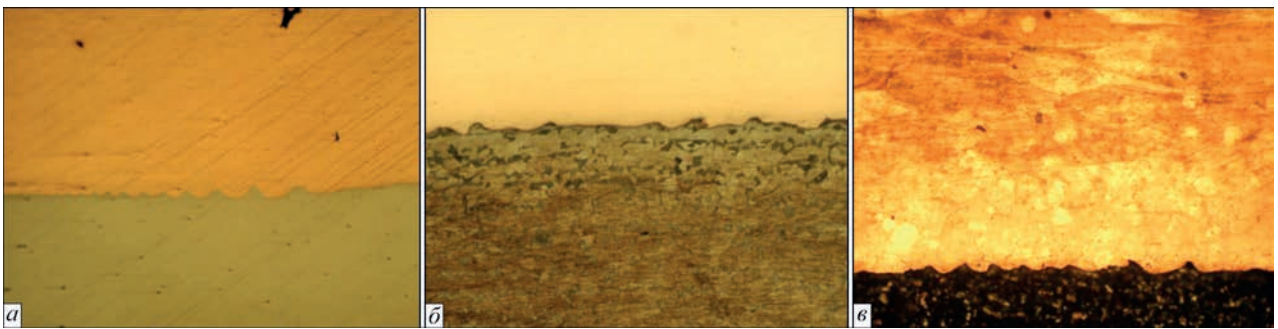


Рис. 7. Макро- (а) та мікроструктура (б, в) з'єднань мідь–сталь, отриманих методом МІЗ

імпульсного струму на індукторі без заготовки та з заготовкою (рис. 6).

Зовнішній вигляд зразків після зварювання вказує на наявність суттєвої пластичної деформації мідних кілець (див. рис. 5).

Металографічними дослідженнями виявлено, що при з'єднанні мідних кілець з товщиною стінки 1 мм, шириною 7 мм з циліндричними сталевими поверхнями спостерігаються ділянки лінійного з'єднання розміром 2,3...5,0 мм з хвилясто-зубчастою лінією зони цього з'єднання. Рельєфні та геометричні характеристики лінії зони з'єднання залежать від параметрів процесу зва-

рювання (енергія розряду, зазор між деталями та ін.) та конструкції індуктора [10, 11]. Висота зубців в зоні з'єднання становила 10...30 мкм (рис. 7, а). Товщина привареного мідного шару становила 0,96...1,16 мм. Ця різниця по товщині викликана впливом нерівномірного магнітного поля робочої зони індуктора. У зоні з'єднання з боку міді зафіксовані зміни в структурі металу – спостерігаються округлі зерна діаметром 20...80 мкм на відстані 270...500 мкм від зони з'єднання. Округлі зерна розташовуються поблизу зони з'єднань. По мірі віддалення від цієї ділянки їх кількість зменшується і структура переходить у

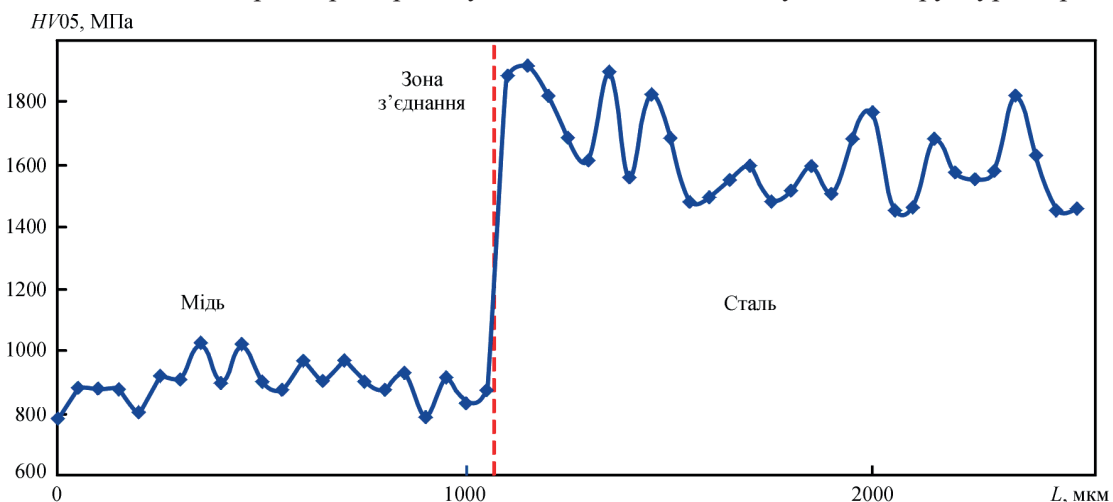


Рис. 8. Графік зміни мікротвердості зразка мідь–сталь після МІЗ



великі деформовані зерна міді з двійниками (рис. 7, в).

Мікротвердість міді в зоні з'єднання становить 1344 МПа (рис. 8), що майже не відрізняється від загальної твердості мідного шару – 1361 МПа, мікротвердість округлих зерен на 3...5 % вище (~1382 МПа), ніж великих деформованих зерен (~1361 МПа).

У зоні з'єднання з боку сталі на глибину ~ 50 мкм зафіксована феритна смуга. Її середня мікротвердість в зоні з'єднання складає 2058 МПа, що на 16 % вище в порівнянні з мікротвердістю в центрі сталевий деталі 1777 МПа. Подалі змін у смугастій феритно-перлітній структурі не спостерігається (рис. 7, б).

### Висновки

Досліджено зварюваність мідних кілець до сталевих стрижнів з метою вивчення можливості застосування одновиткового індуктора. Отримано якісне з'єднання мідних кілець з товщиною стінки 1 мм зі сталевими циліндрами з використанням при енергії розряду до 18 кДж.

Металографічний аналіз зафіксував якісне з'єднання мідних кілець зі сталевими деталями з двоновою формою з'єднання, а також структурні зміни у зварній зоні, при цьому мікротвердість сталі в межах цієї зони зростає в середньому на 16 %.

В подальшому будуть проводитись дослідження для вивчення впливу різних параметрів процесу (зазор між деталями, енергія та частота розряду) на міцність та металографічні характеристики зварних швів Cu–Fe.

Щоб отримати більше уявлень про точні механізми зварювання, вплив товщини стінки кільця на формування зварного шва та деформацію компонентів також слід провести чисельне моделювання.

### Список літератури/References

1. Поleshchuk M.A., Matveev I.V., Bovkun V.A. (2012) Области применения магнитно-импульсной сварки (обзор). *Автоматическая сварка*, 4, 47–52.
2. Poleschuk, M.A., Matveev, I.V., Bovkun, V.A. (2012) Fields of application of magnetic-pulse welding (Review). *The Paton Welding J.*, 4, 42-46.
3. Поleshchuk M.A., Matveev I.V., Bovkun V.O., Адєєва Л.І. (2020) Використання магнітно-імпульсного зварювання для з'єднання пластин з однорідних та різнорідних сплавів. *Автоматичне зварювання*, 8, 45–50. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.08.07>
4. Polieshchuk, M.A., Matveiev, I.V., Bovkun, V.O. et al. (2020) Application of magnetic-pulse welding to join plates from similar and dissimilar alloys. *The Paton Welding J.*, 8, 41-45. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.08.07>
5. Lueg-Althoff, J., Schilling, B., Bellmann J. et al. (2016) Influence of the wall thicknesses on the joint quality during magnetic pulse welding in tube-to-tube configuration. *7th International Conference on High Speed Forming – 2016* <https://core.ac.uk/download/pdf/46917088.pdf>
6. Miranda, R.M., Tomás, B., Santos, T.G., Fernandes, N. (2014) Magnetic pulse welding on the cutting edge of industrial applications. *Soldag. Insp. São Paulo*, 19, 1, 69–81, Jan/Mar 2014, <http://www.scielo.br/pdf/si/v19n1/a09v19n1.pdf>
7. Process analysis for magnetic pulse welding of copper tubes to stainless steel rods. *IFG workshop on impulse metalworking 2017, November 29th, 2017*, Berlin, Germany. [http://www.join-em.eu/documents/I2FG%202017%20Join\\_EM.pdf](http://www.join-em.eu/documents/I2FG%202017%20Join_EM.pdf)
8. [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020\\_en#tab-0-1](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en#tab-0-1) (30.01.2018)
9. United Nations (Editor), Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development, *A/RES/70/1*, <https://sdgs.un.org/2030agenda>
10. Simoen, B., Faes, K., De, Waele, W. (2017) Investigation of the weldability of copper to steel tubes using the electromagnetic welding process. October 2017. *International Journal Sustainable Construction & Design* 8(1):7, DOI: <https://doi.org/10.21825/scad.v8i1.6811> <https://ojs.ugent.be/SCAD/article/view/6811>
11. Satendra, Kumar, Kulkarni, M.R., Saroj, P.C., Mittal, K.C. (2013) Metallurgical and mechanical testing of electromagnetically welded copper and iron sample. *NDT.net Issue: 2014-02. Asia Pacific Conference on Non-Destructive Testing (14th APCNDT), Mumbai, India*, November 18–22, 2013 (APCNDT 2013) Session: NDE for Quality Control & Quality Assurance, <https://www.ndt.net/article/apcndt2013/papers/099.pdf>
12. Kore, S.D., Date, P.P., Kulkarni, S.V. Effect of process parameters on electromagnetic impact welding of aluminum sheets. *International Journal of Impact Engineering*, 34, 1327–1341.
13. Khandaei, M., Vahidshad, Y., Ayaz, M. (2020) Improvement of weld quality in electromagnetic welding of aluminum-stainless steel sheets. *Materialwiss. Werkstofftech*, 51, 1372–1388, DOI 10.1002/mawe.201900205

## MAGNETIC PULSE WELDING OF COPPER RINGS WITH STEEL PARTS WITH THE USE OF SINGLE-TURN INDUCTOR

M. Poleschuk<sup>1</sup>, I. Matveev<sup>1</sup>, V. Bovkun<sup>1</sup>, J. Selech<sup>2</sup>, A. Tunik<sup>1</sup>, O. Cherkashin<sup>1</sup>, L. Kisterska<sup>3</sup>, K. Siekierski<sup>4</sup>

<sup>1</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

<sup>2</sup>Poznan University of Technology. 60-965, 5 M. Skłodowska-Curie Square, Poznan, Poland

<sup>3</sup>Ukrainian-American JV «Marketing of Superhard Materials». 04074, 2, Avtozavodskaya Str., Kyiv, Ukraine

<sup>4</sup>NxTechnologies. 60-125, ul. Bosa, 4/6-24, Poznań, Poland

Magnetic pulse welding is an innovative joining method that allows combining dissimilar metals. The article discusses weldability of copper rings with steel rods in order to study the possibility of using single-turn inductor. All specimens were welded with a discharge energy of 18 kJ. Significant deformations of copper rings were observed. Metallographic examination of welds revealed no defects. High-quality joining of metals in the welding zone with a characteristic wavy boundary interface was noted. However, to obtain more information on the exact mechanisms of weld formation, it is recommended to carry out numerical modeling of the process. 11 Ref., 8 Fig., 2 Tabl.

*Keywords: magnetic pulse welding, cold welding, solid state welding, copper, steel, rings, microstructure, microhardness*

Надійшла до редакції 29.10.2021