

СТРУКТУРА ТА МІКРОТВЕРДІСТЬ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ МІДНИХ СПЛАВІВ, ОДЕРЖАНИХ ЗВАРЮВАННЯМ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ

А.Ю. Тунік, Л.І. Адєєва, М.А. Полєщук, С.Г. Григоренко

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

У роботі наведено результати дослідження впливу технологічних параметрів процесу зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) на структуру та мікротвердість стикових зварних з'єднань технічної міді марки М1. Процес ЗТП проходить за рахунок пластичної деформації металу, розігрітого до температури рекристалізації без розплавлення. Встановлено, що температура процесу визначається площею взаємодії робочого інструменту з металом пластин, що з'єднується, та технологічними параметрами. У роботі досліджено вплив осьового навантаження (заглиблення заплечика) і швидкості зварювання на структуру та мікротвердість мідних зварних з'єднань. Збільшення заглиблення заплечика з 0,2 до 0,6 мм при постійних інших параметрах ЗТП призводить до зниження мікротвердості всіх зон з'єднань максимум на 15 % завдяки більшому тепловкладенню. Висота шва зменшується на 7 %, структура основної частини шва стає більш однорідною. Збільшення швидкості зварювання з 25 до 100 мм/хв при постійних інших параметрах ЗТП суттєво не впливає на розміри швів. При швидкості зварювання 40 мм/хв, яка забезпечує оптимальне тепловкладення, дефектів у зварному з'єднанні не виявлено. У зоні з'єднання утворюється щільна бездефектна структура з дрібним зерном і мікротвердістю, наближеною до мікротвердості основного металу. Бібліогр. 12, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: зварювання тертям з перемішуванням, робочий інструмент, технологічні параметри, мідні з'єднання, структура, властивості

Вступ. Зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) – це процес з'єднання деталей у твердій фазі без розплавлення металу, що є одним із різновидів зварювання тиском. Фізична сутність ЗТП полягає в нагріванні деталей шляхом безпосереднього перетворення механічної енергії в теплову завдяки роботі сил тертя. Метод відрізняється екологічною чистотою та невисокою енергоємністю [1, 2]. Для зварювання використовують інструмент, що складається з двох основних частин: заплечика та виступаючого стрижня – «пін» (рис. 1). Розміри цих конструктивних елементів вибирають у залежності від матеріалу і товщини деталей, що зварюються. Інструмент, що обертається з певною швидкістю, у місці зіткнення з поверхнею пластин вводиться таким чином, щоб «пін» увійшов у заготовку на глибину, що приблизно дорівнює її товщині. Заплечик, притиснутий із зусиллям до поверхні, переміщується по лінії стику зі швидкістю зварювання. При цьому виділяється достатня кількість енергії, необхідної для пластифікації, перемішування металу й утворення якісного з'єднання. Відбувається нагрів металу до пластичного стану – 0,4...0,9 від температури плавлення. Об'єм, в якому формується шов, обмежується зверху заплечиком інструменту. Отримання міцного зварного з'єднання відбувається за умови енергійно-

го пластичного деформування обсягів металу, які розташовані поблизу взаємодіючих поверхонь. Деформація та перемішування металу в твердій фазі створює мікроструктуру, що є рівномірною до основного металу (ОМ). Зазвичай міцність на розтягування та міцність втоми зварного шва становить 90 % від цих характеристик для ОМ. Відносно невисока температура нагрівання металу в зоні з'єднання при ЗТП дозволяє отримати менший рівень залишкового напруження [3].

Основними параметрами процесу ЗТП є: площа контакту інструменту з деталями, що зварюються, швидкість обертання, швидкість переміщення і кут нахилу робочого інструменту. У багатьох публікаціях зазначається, що зі збільшенням частоти обертання інструменту температура в зоні зварювання підвищується, а зі збільшенням швидкості процесу – знижується. Якість зварного з'єднання залежить від параметрів процесу. Відомо, що дана технологія успішно використовується для конструкцій із алюмінію та його сплавів [3, 4]. Вивчаються можливості застосування ЗТП для сталей, титанових і магнієвих сплавів та ін. [5, 6]. Останнім часом виявляється великий інтерес до ЗТП міді, мідних сплавів [2, 7] та їхніх з'єднань з іншими металами [8]. Мідь за своїми теплофізичними властивостями, у першу чергу теплопровідністю, теплоємністю, температурою плавлення істотно відрізняється від металів і сплавів, технології ЗТП яких досить добре розроблені. Оскільки зварювання мідних сплавів проходить

Авторське право © Автор(и)

© Видавець ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ» ПАТОН», 2026

Це стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

при значно більшому тепловкладенні, слід використовувати інструмент, стійкий до високих робочих температур 800...900 °С [9, 10]. Значне число публікацій пов’язано з визначенням температур нагріву різних зон зварного з’єднання при ЗТП. Температурні поля в зоні з’єднання визначають фізичну можливість пластичної течії розігрітого матеріалу та отримання якісного формування структури шва [2]. В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України метод ЗТП був використаний при ремонті мідних плит кристалізатора машин безперервного лиття заготовок для металургійних заводів [11–13].

Метою даної роботи є дослідження впливу технологічних параметрів ЗТП на формування структури й мікротвердості мідних стикових швів, зокрема параметрів, що найбільше впливають на температуру процесу, площу контакту робочого інструменту з металом деталей та швидкості його переміщення (швидкості зварювання).

Матеріал та методики досліджень. У процесі роботи для отримання з’єднань методом ЗТП використовували установку на базі модернізованого фрезерного верстата 6Р13. Для дослідження процесу були використані мідні пластини технічної міді марки М1 (ДСТУ 859:2003) завтовшки 10 мм. Метал пластин має однофазну крупнозеренну (100...800 мкм) структуру з помітним напрямком прокату та мікротвердістю 1090 ± 50 МПа. Процес ЗТП здійснювався зварювальним інструментом, що обертається за годинниковою стрілкою навколо повздовжньої осі, яка була відхилена від вертикалі на $1,5^\circ$ у бік протилежного напрямку його горизонтального переміщення. Робочий інстру-

мент був виготовлений зі сплаву ВК10КС і мав заплечик діаметром 34 мм, «пін» у вигляді усіченого конуса завдовжки 6,5 мм і діаметрами верхньої та нижньої основ 10 і 3,5 мм відповідно. Процес ЗТП проходив у твердій фазі при мінімальному нагріві та практично виключалося потрапляння кисню в зону з’єднання. На рис. 1 наведено схему процесу та зовнішній вигляд часто використововуваного простого та ефективного зварювального інструменту «пін», який забезпечує достатню якість з’єднання.

Було проведено серію експериментів, у кожному з яких змінювався лише один технологічний параметр ЗТП, інші залишалися постійними (табл. 1). Вивчався вплив площі контакту поверхні інструменту (осьового навантаження) з металом пластини. Величина цієї площі визначалася за глибиною сліду, залишеного заплечиком на поверхні пластини. На другому етапі змінювали швидкість зварювання, яка становила 25, 40 та 100 мм/хв. У результаті кожного експерименту за допомогою термопар (хромель-алюмель), вимірювали температуру металу, при який відбувалося формування швів. Термопар розташовувалися в тілі пластини по лінії переміщення робочого інструменту.

Для дослідження отриманих зразків застосовували оптичну металографію, дюрometriю. Методом металографічного аналізу досліджували макро- та мікроструктуру поперечних перерізів отриманих з’єднань, полірованих і після хімічного травлення в 50 % водному розчині HNO_3 . Дослідження проводили за допомогою металографічного мікроскопа «Неофот-32», оснащеного приставкою для цифрової зйомки. Цифрове зобра-

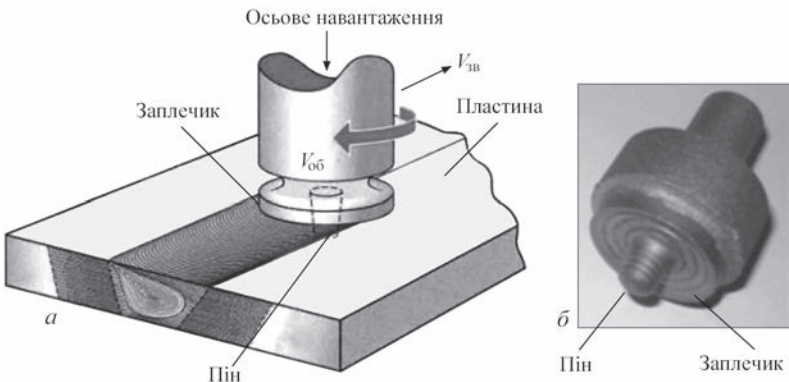


Рис. 1. Схема процесу (а) та зварювальний інструмент (б), що використовували для ЗТП міді

Таблиця 1. Режими одержання зварних з’єднань міді методом ЗТП

№ зразка	Технологічні параметри процесу ЗТП			
	<i>V</i> зварювання, мм/хв	<i>V</i> обертання, об/хв	Глибина занурення заплечика, мм	Площа контакту *, мм ²
1	40	800	0,2	130 ± 15
2	40	800	0,6	280 ± 15
3	25	800	0,2	130 ± 15
4	100	800	0,2	130 ± 15

Примітка: * Площа контакту робочого інструменту з металом пластин

ження оброблялося програмою Atlas. Підготовку зразків для металографічних досліджень проводили згідно з методиками, що застосовуються в металографії [2]. ДюрOMETричний аналіз проводили на твердомірі М-400 фірми «LECO» при навантаженні 0,249 і 0,496 Н.

Результати досліджень. При всіх досліджених режимах у зварних швах литі структури не виявлено. Макроструктура досліджених зварних з'єднань міді, отриманих при різних параметрах ЗТП, має (у поперечному перерізі) спільну специфічну будову, яку схематично зображено на рис. 2.

Поперечний переріз з'єднання, отриманого ЗТП, зазвичай складається з декількох зон: шва (зони перемішування), термомеханічного впливу (ЗТМВ), термічного впливу (ЗТВ) та ОМ (рис. 2). Геометричні параметри цих зон наведено в табл. 2.

Шов складається з верхньої частини у формі трапеції, яка утворюється заплечиком, і нижньої частини – ядра округлої форми, що утворюється «піном». Верхня частина шва має зони набігання та відставання робочого інструменту. Частину зварного шва, де напрямок обертання інструменту збігається з напрямком його горизонтального переміщення, називають стороною набігання, іншу частину – стороною відставання. У ділянках набігання інструменту, які межують із ЗТМВ, переважно спостерігається висока мікротвердість, яка може перевищувати мікротвердість ОМ. У шві найнижча мікротвердість спостерігається в зоні відставання інструменту. У верхній частині шва спостерігаються ділянки світлого й темного травлення. Ділянки темного травлення знаходяться з боку набігання інструменту, в них щільно розташовані лінії деформації. Ці зони найбільш деформовані, дрібнозеренні та за мікротвердістю сумірні або перевищують мікротвердість ядра. Ділянки, які травляться світліше, мають більші зерна та містять овальні дефор-

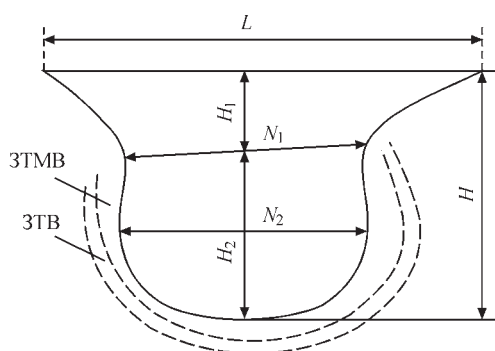


Рис. 2. Схема поперечного перерізу з'єднання, отриманого ЗТП: L – ширина ділянки впливу заплечика; H – висота шва; H_1 – висота верхньої частини; H_2 – висота ядра; N_1 – ширина шва в ділянці з'єднання нижньої та верхньої частини шва, N_2 – ширина ядра, ЗТВ – зона термічного впливу, ЗТМВ – зона термомеханічного впливу

маційні кільця. За мікротвердістю вони на 9...14 % нижче, ніж ділянки, що травляться темніше. Зона ядра утворюється «піном» – це найстабільніша дрібнозеренна структура з високою мікротвердістю, яка сумірна або перевищує мікротвердість ОМ. Ядра зварних з'єднань є переважною частиною шва. Вони мають округлу форму та містять концентричні кола деформації металу, які в публікаціях називаються «річними» кільцями. Формування кілець пов'язано з особливостями процесу перемішування металу «піном» робочого інструменту. Відстань між кільцями зменшується від центру до периферії ядра, а мікротвердість при цьому зростає. Виявлено макроскопічну неоднорідність структури зварних швів. Даний ефект може бути обумовлений як градієнтом температури, так і деформаціями, притаманним процесам ЗТП, а також специфічним характером пластичної течії металу.

У роботі досліджували вплив величини площі контакту робочої частини інструменту на формування структури та властивостей мідних з'єднань (зразки № 1 і 2 в табл. 1). Ці зразки відрізняються тільки одним параметром – величиною площі контакту робочої частини інструменту з виробом. Встановлено, що з урахуванням похибки вимірювань, слід заплечика при глибині занурення інструменту 0,2 мм відповідає площі контакту $130 \pm 15 \text{ мм}^2$, а при зануренні 0,6 мм – $280 \pm 15 \text{ мм}^2$ відповідно. Таким чином, площа контакту зразка № 2 у два рази більша, ніж зразка № 1. За даною технологією одержані якісні бездефектні з'єднання (рис. 3, 4). У процесі ЗТП на температуру, при якій формується зварний шов, впливає площа взаємодії робочої частини зварювального інструменту з металом пластини. Тому збільшення заглиблення заплечика з 0,2 до 0,6 мм підвищує тепловкладення в ділянку металу в зоні зварювання. Температура в ділянці вимірювання під «піном» зростає приблизно з 600 до 900 °С. При дослідженні структури з'єднань встановлено, що збільшення заглиблення заплечика, в першу чергу, впливає на висоту й площу верхньої частини шва (рис. 3, а–в, рис. 4, а–в). Її максимальна висота збільшується на ~ 44 % і вона частково перекриває нижню частину шва – зону ядра. Загальна висота шва зменшується на 7 %, при цьому ширина шва не змінюється (табл. 2).

При більшому заглибленні заплечика збільшується розмір ділянки темного травлення у верхній частині шва, а в ділянках світлого травлення частіше спостерігаються деформаційні смуги (рис. 4, е). У зразках № 1 і 2 розмір зерна в ділянках темного травлення становить 10...30 та 20...40 мкм, у

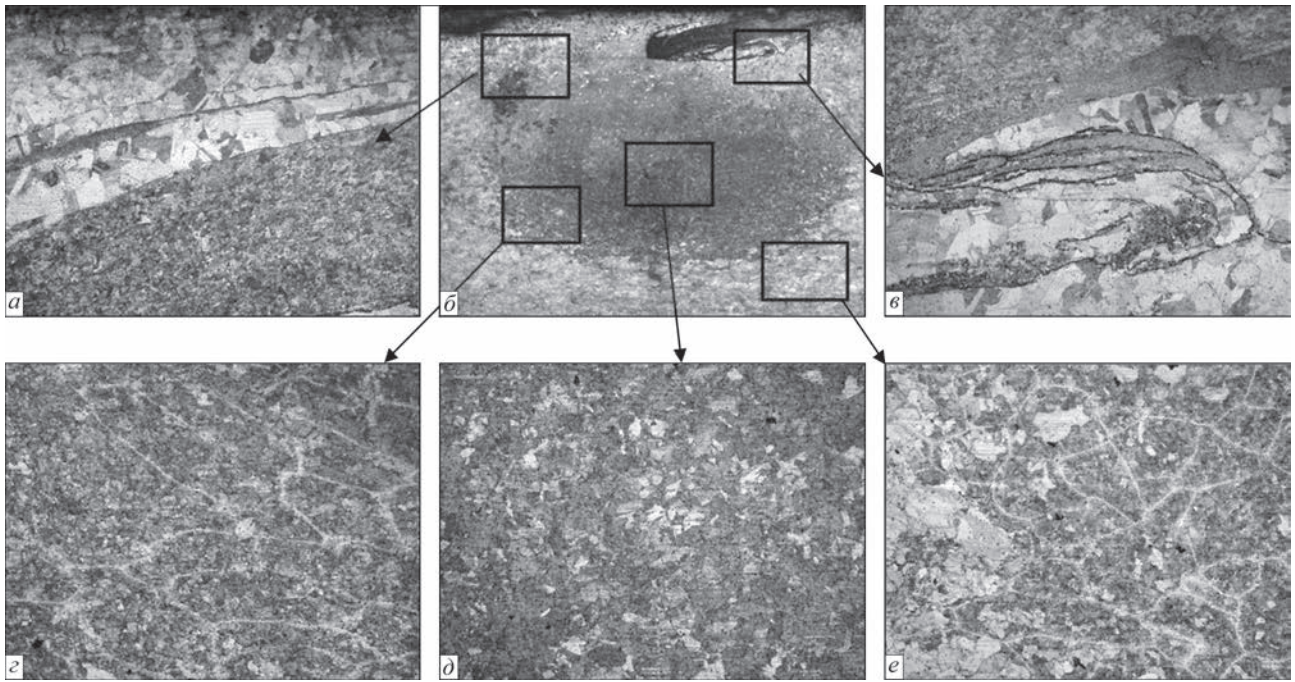


Рис. 3. Мікроструктура зварного з'єднання зразка № 1: верхня частина шва (а, в), загальний вигляд (б), зона ядра (д), ЗТМВ (г), ЗТВ (е); б – $\times 25$; а, в–е $\times 100$, травлено

ділянках світлого травлення він значно більше – 30...150 і 40...70 мкм (рис. 3, в, рис. 4, в), а мікротвердість у цих ділянках верхньої частини шва зменшується на 10 і 9 % відповідно (табл. 2).

Зона ядра в зразках № 1, 2 має овальну форму з характерними «річними» кільцями, де деформований «піном» метал формується в дрібне рівновісне зерно з переважним розміром 10...50 і 20...30 мкм (рис. 3, д і рис. 4, д). Більше тепловкладення в процесі зварювання зменшує мікротвердість структури ядра цих зразків на 9 % (табл. 2), що становить 89 і 81 % від

мікротвердості ОМ. Товщини ЗТМВ і ЗТВ не перевищують $\sim 1,0$ мм і при збільшенні заглиблення заплечиків зростають не суттєво. При цьому мікротвердість цих зон зменшується на 12 і 15 % відповідно. Зони ЗТМВ і ЗТВ у верхній частині шва візуалізуються слабше, але вони чітко реєструються навколо ядра. Максимальних розмірів ці зони досягають у ділянках біля центру ядра, їхня товщина зменшується при наближенні до верхньої частини шва.

Таким чином, збільшення глибини занурення заплечика з 0,2 до 0,6 мм призводить до зменшен-

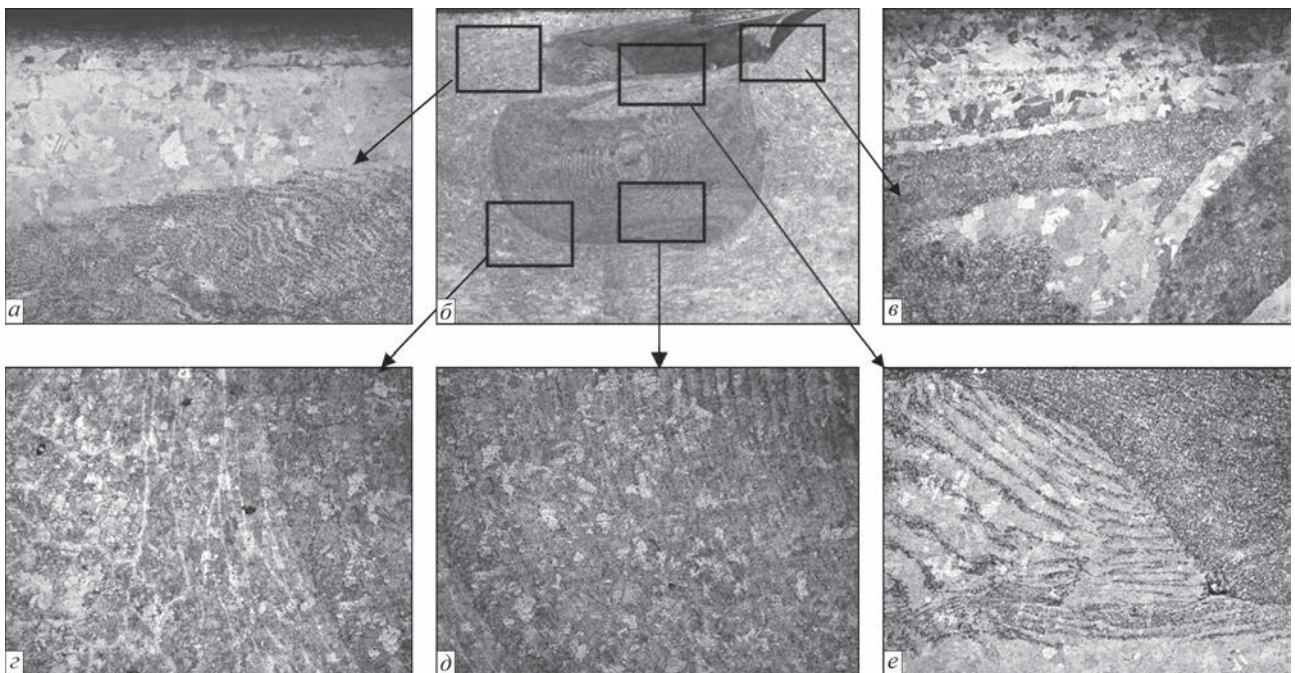


Рис. 4. Мікроструктура зварного з'єднання зразка № 2: верхня частина шва (а, в, е), загальний вигляд (б), зона ядра (д), ЗТМВ + ЗТВ (г); б – $\times 25$; а, в–е $\times 100$, травлено

Таблиця 2. Мікротвердість і геометричні параметри ділянок зварних з’єднань, одержаних ЗТП

№ зразка	Параметри ділянок, мм						Мікротвердість, МПа				
	<i>H</i>	<i>H</i> ₁	<i>H</i> ₂	<i>L</i>	<i>N</i> ₁	<i>N</i> ₂	*Темна ділянка	*Світла ділянка	Ядро	ЗТМВ	ЗТВ
1	5,9	1,5	4,4	11,2	4,0	6,7	995±70	885±50	970±35	965±60	960±35
2	5,6	1,9	3,7	11,2	5,2	6,4	885±55	810±25	885±30	860±45	835±30
3	5,8	1,0	4,8	12,0	5,6	6,8	1030±70	995±45	970±60	930±30	900±40
4	5,8	1,2	4,6	11,0	5,8	6,4	1200±95	1025±30	1055±100	1045±65	1005±20

Примітка. * Ділянки темного та світлого травлення верхньої частини шва, мікротвердість ОМ 1090 МПа.

ня висоти шва на 7 %. Завдяки більшому тепловкладенню в метал температура в зоні зварювання підвищується, що призводить до зниження мікротвердості всіх зон з’єднання до 15 %. Їхня мікротвердість знаходиться в діапазоні 76...93 % від мікротвердості ОМ. У зоні ядра, яка є переважною частиною шва, розмір зерна стає одноріднішим. Зеренна неоднорідність у ділянках верхньої частини шва зберігається. Зварні з’єднання, одержані за цією технологією в даному діапазоні осьового навантаження, не мають дефектів.

На наступному етапі оцінювали вплив швидкості горизонтального переміщення інструменту на формування структури та мікротвердість мідних швів. При змінній швидкості зварювання (переміщенні інструменту) 25, 40, 100 мм/хв та інших постійних параметрах (швидкість обертання 800 об/хв і глибина зачистки заплетика 0,2 мм) були одержані зразки № 3, 1 та 4 (табл. 1). Дослідження структури з’єднань показало, що при збільшенні швидкості зварювання параметри швів змінюються несуттєво: висота шва дорівнює 5,8...5,9 мм, а ширина ділянки впливу заплетика – 11...12 мм, максимальна товщина верхньої частини шва не перевищує 1,5 мм. Ядро в поперечному пе-

рерізі має округлу форму з максимальною шириною 6,4...6,8 мм.

У верхній частині шва зразків № 3, 1, 4 ділянки темного та світлого травлення мають мікротвердість, яка становить: 94, 91, 110 та 91, 81, 94 % від мікротвердості ОМ (табл. 2). Розмір зерна в цих ділянках зростає та дорівнює 2...10, 10...30, 10...50 та 20...70, 20...100, 30...150 мкм відповідно (рис. 5, а, в, рис. 3, а, в, рис. 6, а, в). Зразок № 1 має найменшу мікротвердість у ділянках верхньої частини шва. Слід зазначити, що ділянки темного травлення (найбільш деформований метал у верхній частині шва) мають незначну площину, але відрізняються високою мікротвердістю – 1030...1200 МПа. Саме біля них на границі верхньої частини шва та ядра реєструються тріщини в зразках № 3 і 4 (рис. 5, а, рис. 6, а) при швидкості зварювання 25 і 100 мм/хв. У зразку № 1 тріщин або інших дефектів не спостерігається. Мікротвердість усіх ділянок з’єднання цього зразка знаходиться в інтервалі 81...91 % від мікротвердості ОМ.

У металі ядра всіх зразків спостерігається структура з характерними «річними» кільцями (рис. 5, д, рис. 3, д, рис. 6, д). У зоні ядра зразків

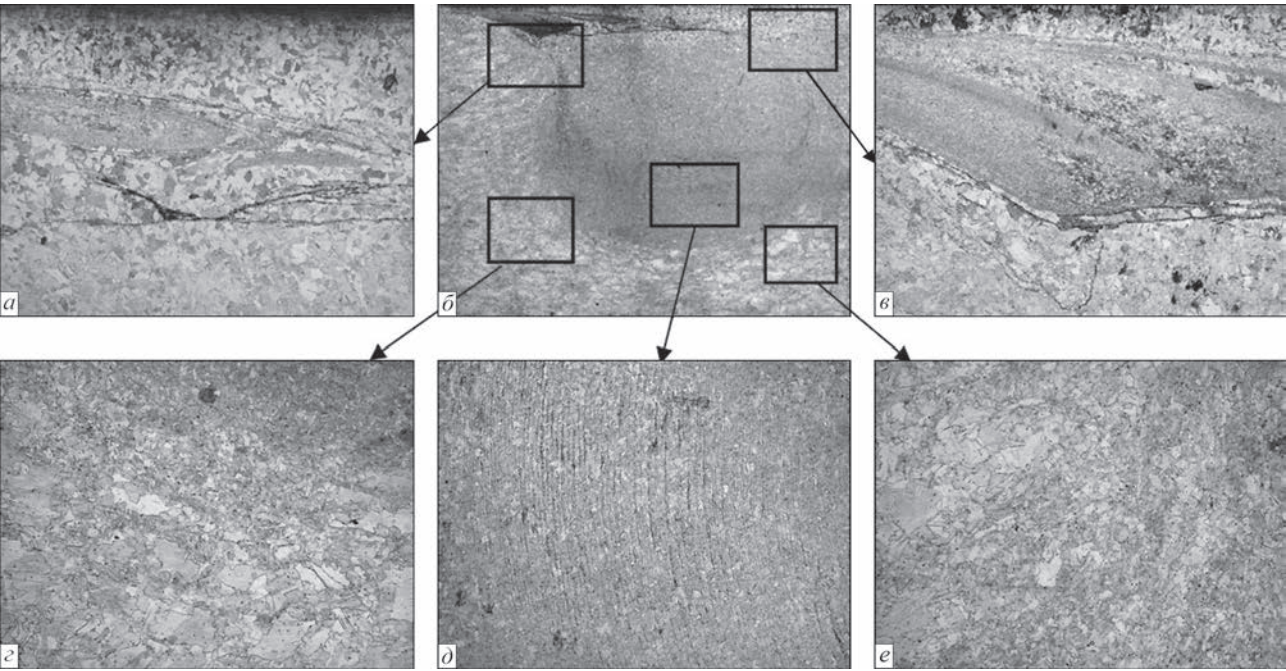


Рис. 5. Мікроструктура зварного з’єднання зразка № 3: верхня частина шва (а, в), загальний вигляд (б), ЗТМВ + ЗТВ (г), зона ядра (д), ЗТВ (е); б – ×25, а, в–е – ×100, травлено

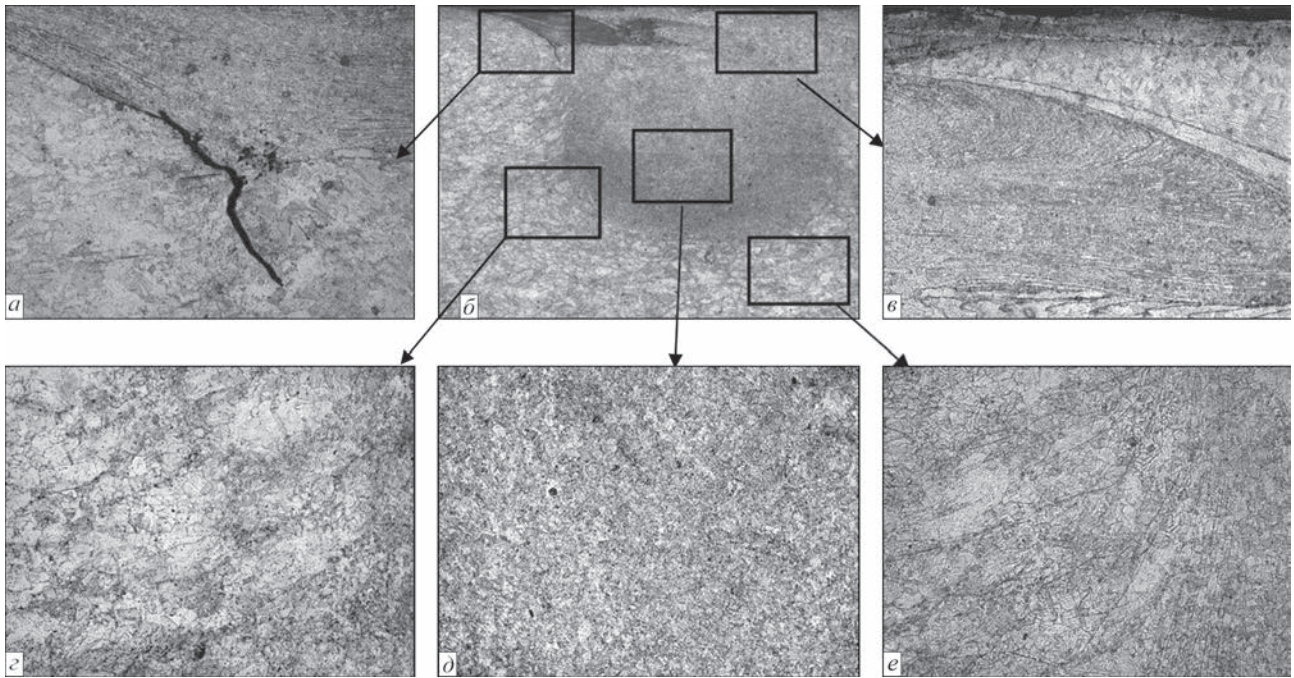


Рис. 6. Мікроструктура зварного з'єднання зразка № 4: верхня частина шва (а, в), загальний вигляд (б), ЗТМВ + ЗТВ (г), зона ядра (д), ЗТВ (е); б – $\times 25$, а, в–е – $\times 100$, травлено

№ 3 і 1 утворюється структура з більш рівномірним рівновісним зерном під впливом процесів первинної рекристалізації. Розмір зерна в цих ділянках знаходиться в діапазоні 10...30, 10...50 мкм. У зразку № 4, отриманому за найбільшої швидкості зварювання, реєструється структура з нерівномірним розміром зерна 20...100 мкм, яка утворюється під впливом процесу фрагментації.

При зростанні швидкості зварювання зменшується тепловкладення в процес ЗТП. Мікротвердість ядра як найбільшої частини шва в зразках № 3, 1, 4 складає 89, 89, 97 % від мікротвердості ОМ (табл. 2).

У мікроструктурі зразків № 3, 1, 4 при всіх швидкостях зварювання спостерігаються ЗТМВ і ЗТВ навколо ядра (рис. 5, г, е, рис. 3, г, е, рис. 6, г, е). Товщина ЗТМВ і ЗТВ у цих зразках не перевищує 1 мм і суттєво не змінюється при зростанні швидкості зварювання, але при цьому мікротвердість цих зон зростає приблизно на 10 %, що становить ~ 90 % від мікротвердості ОМ відповідно (табл. 2).

Таким чином, при досліджених швидкостях зварювання 25, 40, 100 мм/хв геометричні параметри швів з'єднань змінюються несуттєво. В основній частині шва, в зоні ядра, однорідна дрібнозеренна структура спостерігається при швидкості зварювання 25 і 40 мм/хв. При збільшенні її до 100 мм/хв реєструється нерівно подрібнена структура з більшим розміром зерна. Зменшення тепловкладення призводить до зростання мікротвердості ядра з 970 до 1055 МПа при швидкості зварювання 25 і 100 мм/хв відповідно. Поява тріщин при швидкості зварювання 25 мм/хв обумовлена значними дефор-

маційними процесами в зоні перемішування. При швидкості зварювання 100 мм/хв тріщиноутворення спричинене недостатнім розігрівом металу та низькою температурою (~ 450 °С) в зоні зварювання [9]. При підвищенні температури в цій зоні (~ 600 °С), зареєстрований при швидкості зварювання 40 мм/хв, дефектів у зварному з'єднанні не виявлено. У зоні з'єднання утворюється щільна бездефектна структура з дрібним зерном і мікротвердістю, що становить 81...91 % від мікротвердості ОМ.

Висновки

Термічний цикл, який створюється інструментом, що обертається, при різних швидкостях ЗТП є фактором керування мікроструктурою. Провідну роль у цьому процесі грає механічне перемішування металу в пластичному стані. Внаслідок проходження процесів перекристалізації в зонах пластичного перемішування металу відбувається подрібнення зерна та створюється щільна мікроструктура шва, яка наближається за мікротвердістю до ОМ. Дослідження властивостей та структури поперечного перерізу зварних з'єднань мідних стикових швів показали, що при заглибленні заплечика 0,2 мм, швидкості зварювання 40 мм/хв та швидкості обертання 800 об/хв були отримані найбільш якісні бездефектні вироби.

Список літератури/References

1. Thomas, W.M. (1991) *Friction stir butt welding*. Pat. GB9125978.8, PCT/GB92. Publ. 01.12.91.
2. Savolainen, K. (2012) *Friction Stir Welding of Copper and Microstructure and Properties of the Welds*. Doct. dissertation for the degree of Dr. of Science in Technology. Aalto University School 2012. ISBN 978-952-60-4500-9.

3. Ishchenko A.Ya., Labur T.M. (2013) *Welding of modern structures from aluminum alloys*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
4. Поляцький А.Г., Мотрунч С.І., Кушнарьова О.С. (2021) Властивості стикових з'єднань тонколистового алюмінієво-літійового сплаву 1460, отриманих тертям з перемішуванням та TIG. *Автоматичне зварювання*, **7**, 3–8. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.07.01>
5. Poklyatskiy, A.G., Motrunich S.I., Kushnaryova, O.S. (2021) Properties of butt joints of fine-sheet aluminium-lithium 1460 alloy, produced by friction STIR and TIG welding. *The Paton Welding J.*, **7**, 2–6. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.07.01>
6. Khokhlov, M.A., Makhnenko, O.O., Kostin, V.A., Poklyatskiy, A.G., Falchenko, Iu.V., Khokhlova, Yu.A. (2024) Thermo-mechanical processes in friction stir welding of magnesium alloy sheets. *The Paton Welding J.*, **5**, 11–17. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.05.02>
7. Zhou, L., Liu, H.J. (2011) Effect of 0.5 wt. % hydrogen addition on microstructural evolution of Ti–6Al–4V alloy in the friction stir welding and post-weld dehydrogenation process. *J. Mater. Characterization*, **62**, 1036–1041. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2011.07.016>
8. Григоренко Г.М., Адеєва Л.І., Туник А.Ю., Полещук М.А., Зеленин В.І., Зеленин Е.В. (2015) Восстановительный ремонт слябовых медных кристаллизаторов МНЛЗ. Структура и свойства металла в зоне соединения. *Современная электрометаллургия*, **1**, 44–49. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2015.01.07>
9. Grigorenko, G.M., Adeeva, L.I., Tunik, A.Yu. et al. (2015) Restoration repair of slab copper moulds of MCCB. Structure and properties of metal in the joint zone. *Electrometallurgy Today*, **1**, 44–49 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2015.01.07>
10. Григоренко Г.М., Полещук М.А., Адеєва Л.І., Туник А.Ю. та ін. (2016) Особливості структури з'єднань матеріалів Cu–Cu, Ni–Cu, Сталь–Cu, отриманих внахлест способом зварювання тертям з перемішуванням. *Автоматичне зварювання*, **5-6**, 82–87. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2016.06.13>
11. Grigorenko, G.M., Polieshchuk, M.A., Adeeva, L.I., Tunik, A.Yu. et al. (2016) Peculiarities of structure of Cu–Cu, Ni–Cu and Steel–Cu joints produced by overlap friction stir welding method. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 75–80. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2016.06.13>
12. Полещук М.А., Шевцов А.В., Доценко І.В., Теплюк В.М. и др. (2021) Дослідження температурного стану мідних пластин у зоні швів при зварюванні тертям з перемішуванням. *Автоматичне зварювання*, **3**, 29–34. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.03.05>
13. Polieshchuk, M.A., Shevtsov, A.V., Dotsenko, I.V. et al. (2021) Investigation of temperature state of copper plates in the weld zone at friction STIR welding. *The Paton Welding J.*, **3**, 27–31. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.03.05>
14. Smith, C.B., Bendzsak, G.B., North, T.H. (2002) Heat and material flow modeling of the friction stir welding process. *NIST Special Publication SP*, **949**, 475–486.
15. Григоренко Г.М., Адеєва Л.І., Туник А.Ю. и др. (2015) Использование метода сварки трением с перемешиванием для восстановления изношенных медных плит кристаллизаторов МНЛЗ. *Автоматическая сварка*, **5-6**, 60–63.
16. Grigorenko, G.M., Adeeva, L.I., Tunik, A.Yu. et al. (2015) Application of friction stir welding method for repair and restoration of worn-out copper plates of MCCB moulds. *The Paton Welding J.*, **5-6**, 55–58.
17. Никитюк Ю.Н., Григоренко Г.М., Зеленин В.І. и др. (2013) Технология восстановительного ремонта слябовых кристаллизаторов МНЛЗ наплавкой трением с перемешиванием. *Современная электрометаллургия*, **3**, 51–55.
18. Nikityuk, Yu.N., Grigorenko, G.M., Zelenin, V.I. et al. (2013) Technology of restoration repair of slab moulds of machines for continuous casting of billets by friction STIR surfacing. *Electrometallurgy Today*, **3**, 51–55 [in Russian].

STRUCTURE AND MICROHARDNESS OF COPPER ALLOY BUTT WELDED JOINTS PRODUCED BY FRICTION STIR WELDING

A.Yu. Tunik, L.I. Adeeva, M.A. Polieshchuk, S.G. Hryhorenko

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

E-mail: allatunik@gmail.com

The paper presents the results of investigation of the influence of the technological parameters of friction stir welding (FSW) process on the structure and microhardness of butt welded joints of grade M1 technical copper. The FSW process takes place through plastic deformation of the metal heated up to the recrystallization temperature without melting. It was found that the process temperature is determined by the area of interaction of the FSW tool with the metal of the plates being joined. The work is a study of the influence of axial loading (shoulder penetration depth) and welding speed on the structure and microhardness of copper welded joints. Increase in shoulder depth from 0.2 to 0.6 mm with other FSW parameters being constant leads to lowering of microhardness of all the other joint zones maximum by 15 % due to higher heat input. Weld height decreases by 7 %, and the main weld metal structure becomes more homogeneous. Welding speed increase from 25 to 100 mm/min with other FSW parameters being constant has no significant influence on weld dimensions. At welding speed of 40 mm/min., which ensures optimal heat input, no defects were found in the welded joint. A dense defectfree structure with fine grains and microhardness close to that of the base metal forms in the joint zone. 12 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: friction stir welding, FSW tool, technological parameters, copper joints, structure, properties

ORCID

Тунік А.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-6801-6461>, Адеєва Л.І. – <https://orcid.org/0009-0008-5893-8196>,

Полещук М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-5992-4641>, Григоренко С.Г. – <http://orcid.org/0000-0003-0625-7010>,

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЛИСТУВАННЯ

Тунік А.Ю.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: allatunik@gmail.com

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

А.Ю. Туник, Л.І. Адеєва, М.А. Полещук, С.Г. Григоренко (2026) Структура та мікротвердість стикових зварних з'єднань мідних сплавів, одержаних зварюванням тертям з перемішуванням. *Автоматичне зварювання*, **04**, 38–44.

DOI: <https://doi.org/10.37434/as2026.04.04>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

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

Отримано 08.10.2025

Отримано у переглянутому вигляді 21.12.2025

Підписано до друку 20.07.2026

Оприлюднено 24.07.2026