

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА СТРУКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ, ОТРИМАНИХ ПРИ ЗТП АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ РІЗНИХ СИСТЕМ ЛЕГУВАННЯ

Покляцький А.Г.¹, Мотруніч С.І.¹, Федорчук В.Є.¹, Фальченко Ю.В.¹, Сагул М.²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: paton.testlab@gmail.com

²Чеський технічний університет, 16636, м. Прага, Чеська Республіка.

У статті викладено результати дослідження міцності, твердості та структури стикових з'єднань алюмінієвих сплавів різних систем легування, отриманих зварюванням тертям з перемішуванням (ЗТП). Показано, що цей процес дозволяє отримувати якісні з'єднання алюмінієвих сплавів різних систем легування як в однойменному, так і в різнойменному поєднаннях. Причому це стосується не тільки алюмінієвих сплавів, виготовлених за стандартною технологічною схемою методом лиття, але й гранульованих сплавів, які містять пересичений твердий розчин важкоплавких перехідних металів, отриманих з використанням порошкової металургії. Встановлено, що міцність зварних з'єднань, отриманих при ЗТП алюмінієвих сплавів, залежить від хімічних складів та механічних властивостей цих сплавів. Максимальну межу міцності мають зварні з'єднання високоміцних сплавів 1995 (483 МПа), 1963 (473 МПа) і Д16 (441 МПа), що обумовлено незначним ступенем розміщення металу в зоні термомеханічного впливу (ЗТМВ), де і відбувається руйнування зразків при статичному розтягуванні. Руйнування зразків зварних з'єднань різнойменних алюмінієвих сплавів також відбувається в цій зоні або на її межі з зоною термічного впливу (ЗТВ) зі сторони сплаву з нижчою міцністю. При цьому межа їх міцності знаходиться на рівні з'єднань відповідних однойменних сплавів. Показано, що в результаті інтенсивної пластичної деформації металу при ЗТП різних алюмінієвих сплавів у зоні формування нероз'ємного з'єднання в ядрі шва утворюються зерна практично глобулярної форми, розмір яких не перевищує 4...6 мкм. При зварюванні гранульованих сплавів пересичений твердий розчин у гранулах зберігається, відбувається тільки їх механічне подрібнення, внаслідок чого ядро шва має дрібнодисперсну щільну структуру, а гранули, що містять пересичений твердий розчин важкоплавких перехідних металів, рівномірно розподіляються по всьому об'єму матриці в металі шва. Бібліогр. 12, табл. 4, рис. 8.

Ключові слова: алюмінієві сплави, зварювання тертям з перемішуванням, твердість, міцність, структура

Вступ. Алюмінієві сплави широко використовуються при виготовленні різноманітних літальних апаратів, плавзасобів, залізничного, колісного та гусеничного транспорту, будівельних і мостових конструкцій. Значною мірою це обумовлено явними перевагами алюмінію у порівнянні з іншими конструкційними матеріалами: він утричі легший сталі, має високу корозійну стійкість та електропровідність, відзначається значною питомою міцністю, антимагнітністю та відсутністю порогу холодноламкості. При цьому більшість алюмінієвих сплавів легко обробляються і можуть якісно зварюватися, що дозволяє використовувати їх при виготовленні різноманітних вузлів конструкцій [1].

Залежно від функціонального призначення таких вузлів для їх виготовлення вибирають необхідні напівфабрикати і відповідні системи легування та композиції алюмінієвих сплавів. Світовий ринок пропонує споживачам близько трьохсот композицій конструкційних сплавів алюмінію, які мають різні фізико-механічні властивості та виготовляються у вигляді чушок, плоского про-

кату, профільного прокату, пресованого профілю, дроту і фольги [2, 3].

Крім звичайних алюмінієвих сплавів, отриманих за стандартною технологічною схемою методом лиття, серед пропонованого різновиду напівфабрикатів зростає частка композиційних матеріалів, які містять зміцнюючі армуючі частки оксиду алюмінію Al_2O_3 або карбїду кремнію SiC [4, 5]. Це дозволяє забезпечити високі значення модуля пружності, зносостійкості та жароміцності, а також низькі показники питомої ваги та коефіцієнтів термічного розширення і тертя. Завдяки використанню досягнень порошкової металургії серед асортименту конструкційних сплавів значне місце займають гранульовані алюмінієві сплави. При їх виготовленні завдяки високій швидкості охолодження гранул у процесі кристалізації вдається суттєво підвищити рівень легування сплавів важкотопкими перехідними металами, такими як хром, цирконій, титан, ванадій і т. п. Ці метали при кристалізації гранул утворюють аномально пересичені тверді розчини. При подальших технологічних нагрівах через розпад таких твердих розчинів

Покляцький А.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4101-2206>, Мотруніч С.І. – <https://orcid.org/0000-0002-8841-8609>

Федорчук В.Є. – <https://orcid.org/0000-0002-9929-3231>, Фальченко Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>,

Сагул М. – <https://orcid.org/0000-0001-5091-6381>

© А.Г. Покляцький, С.І. Мотруніч, В.Є. Федорчук, Ю.В. Фальченко, М. Сагул, 2023

утворюються дисперсні інтерметаліди, які забезпечують значне зміцнення сплавів [6, 7]. Серед нових досягнень у сфері виготовлення сучасних алюмінієвих сплавів варто відзначити створення квазікристалічних матеріалів. Вони містять інтерметаліди у вигляді нанорозмірних квазікристалічних часток, які забезпечують високі фізико-механічні властивості таких матеріалів [8, 9].

Проте реалізація потенційних можливостей таких перспективних матеріалів при виготовленні зварних конструкцій значною мірою залежить від правильного вибору способів отримання якісних нероз'ємних з'єднань. І якщо для більшості серійних сплавів успішно використовуються різні способи зварювання, то для згаданих вище перспективних матеріалів необхідно використовувати зварювання у твердій фазі, щоб зберегти переваги основного матеріалу у швах [5, 10, 11].

Вибір матеріалів при створенні вузлів зварних конструкцій значною мірою залежить від їх функціонального призначення та умов експлуатації. Тому доволі часто для забезпечення певних властивостей окремих елементів чи вузлів доводиться зварювати між собою не тільки однойменні алюмінієві сплави, але й різнойменні, які можуть відрізнятися як системою легування, так і способом виготовлення [3].

Мета даної роботи – оцінити ефективність застосування зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) для отримання якісних з'єднань різнойменних алюмінієвих сплавів, включаючи гранульовані.

Матеріали та методи обладнання. Для досліджень використовували алюмінієві сплави завтовшки 2 мм різних систем легування, хімічний

склад яких приведено в табл. 1. Серед представлених матеріалів є широко вживані сплави (АМг5М, АМг6М і Д16), перспективні високоміцні сплави (1460 і 1963) і сплав 6013 з підвищеною жаростійкістю, які отримані по стандартній технологічній схемі, а також сплави 1995 і 1419, отримані з використанням порошкової металургії. Механічні властивості листів досліджуваних сплавів приведені в табл. 2.

У відповідності з вимогами до зварних з'єднань конструкцій відповідального призначення проводили стандартне хімічне травлення листів у розчині NaOH з наступним освітленням у розчині HNO₃, а безпосередньо перед зварюванням – механічну зачистку поверхонь листів у зоні формування швів.

ЗТП здійснювали на розробленій в ІЕЗ ім. Є.О. Патона лабораторній установці при частоті обертання інструмента $N = 1420$ об/хв, використовуючи спеціальний інструмент з діаметром бурта 12 мм і наконечником довжиною 1,85 мм у вигляді зрізаного конуса діаметром при основі бурта 3,4 мм і кутом нахилу твірної конуса 12° [12]. З отриманих зварних з'єднань виготовляли шліфи для дослідження їх структурних особливостей. Межу міцності стикових з'єднань визначали при статичному одноосному розтягуванні стандартних плоских зразків з шириною робочої частини 15 мм на універсальному сервогідролічному комплексі MTS 318.25. Оцінку структурних особливостей зварних з'єднань здійснювали за допомогою оптичного електронного мікроскопа ММТ-1600В. Твердість металу в різних зонах отриманих стикових зварних з'єднань вимірювали на лицьових поверхнях зразків на приладі «ROCKWELL» при навантаженні $P = 600$ Н.

Таблиця 1. Хімічний склад досліджуваних алюмінієвих сплавів

Марка сплаву	Масова частка хімічних елементів, % (основа – Al)											
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Li	Sc	Інші
АМг5М	0,50	0,50	0,10	0,7	5,2	–	0,20	0,09	–	–	–	0,05 Be
АМг6М	0,40	0,40	0,10	0,8	6,3	–	0,20	0,10	–	–	–	0,05 Be
Д16	0,50	0,50	4,5	0,7	1,6	0,10	0,25	0,15	0,05	–	–	–
1460	0,10	0,15	3,1	0,1	0,1	0,05	0,25	0,06	0,12	2,3	0,12	0,08 Be
6013	0,58	0,20	0,95	0,26	1,0	–	–	0,03	–	–	–	–
1963	0,15	0,25	1,9	–	2,9	–	6,8	–	0,15	–	–	–
1995	0,15	0,20	–	0,23	2,8	0,65	4,95	0,20	–	–	–	–
1419	0,15	0,20	–	2,0	–	1,05	–	0,60	0,60	–	–	0,60 V

Таблиця 2. Механічні властивості досліджуваних алюмінієвих сплавів

Марка сплаву	Межа міцності σ_b , МПа	Межа плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне видовження δ , %	Кут згину α , град
АМг5М	338	161	21,8	180
АМг6М	359	220	22,3	96
Д16	445	315	18,5	83
1460	486	445	17,7	37
6013	410	317	8,0	96
1963	560	530	6,3	54
1995	610	527	7,1	26
1419	300	260	12,8	115

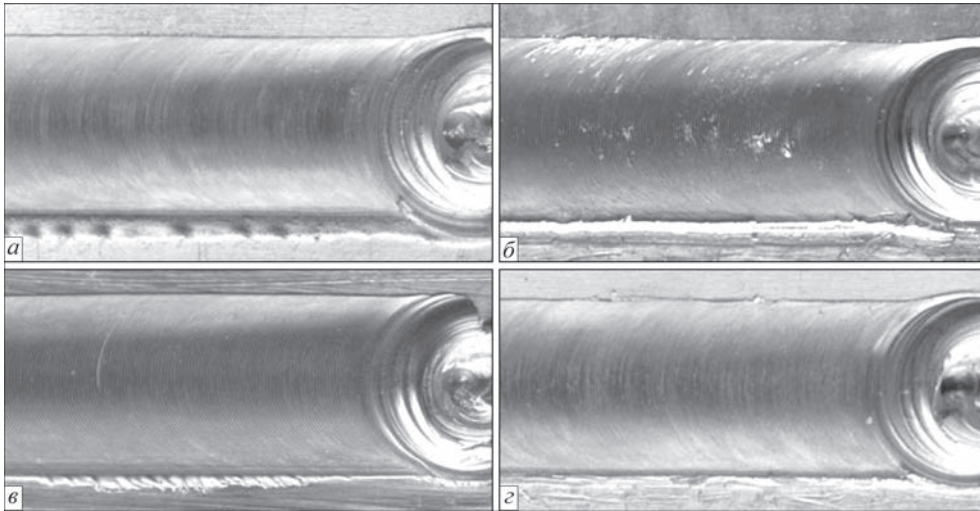


Рис. 1. Зовнішній вигляд лицьової поверхні швів, отриманих при ЗТП на оптимальних режимах, алюмінієвих сплавів в однойменному поєднанні: а – 6013; б – 1963; в – 1995; з – 1419

Результати досліджень та обговорення. Проведені експериментальні дослідження показали, що якісне формування швів алюмінієвих сплавів при ЗТП забезпечується при різних швидкостях лінійного переміщення інструмента. Так, оптимальна швидкість зварювання для сплаву АМг5М при частоті обертання інструмента 1420 об/хв становить 16 м/год, для сплаву 1460 – 14 м/год, для сплаву АМг6М – 12 м/год, а для сплаву Д16 – 10 м/год. Якісні зварні з'єднання сплаву 6013 можна отримати при швидкості зварювання 38 м/год, сплаву 1963 – 10 м/год, сплавів 1995 і 1419 – 26 м/год. Зовнішній вигляд таких зварних з'єднань приведено на рис. 1.

Результати та обговорення. Результати експериментальних досліджень показали, що для отримання якісних з'єднань різнойменних алюмінієвих сплавів ЗТП необхідно виконувати при меншій для обраної пари сплавів швидкості лінійного переміщення інструмента, що дозволяє зменшити ймовірність виникнення внутрішніх дефектів швів

у вигляді несучільностей. Зовнішній вигляд деяких отриманих тертям з перемішуванням якісних стикових зварних з'єднань алюмінієвих сплавів у різнойменному поєднанні приведено на рис. 2.

Вимірювання твердості металу в зоні зварювання показали, що ступінь його розміщення залежить від хімічного складу алюмінієвих сплавів. При цьому для більшості сплавів твердість металу шва дещо вища, ніж у зоні термомеханічного впливу (ЗТМВ), завдяки формуванню дрібнокристалічної структури металу. Так, при ЗТП сплаву 6013 з підвищеною корозійною стійкістю твердість металу шва становить $HRB\ 87\dots 88$, а в ЗТМВ – $HRB\ 85\dots 86$. Для високоміцного сплаву 1963 системи легування Al–Cu–Mg–Zn максимальна ступінь розміщення металу також спостерігається у ЗТМВ, тоді як у шві вона знаходиться на рівні $HRB\ 109\dots 110$ (рис. 3).

Пластичний низьколегований гранульований сплав 1419 має твердість металу шва та прилеглих ділянок на рівні $HRB\ 75\dots 76$, тоді як для основ-

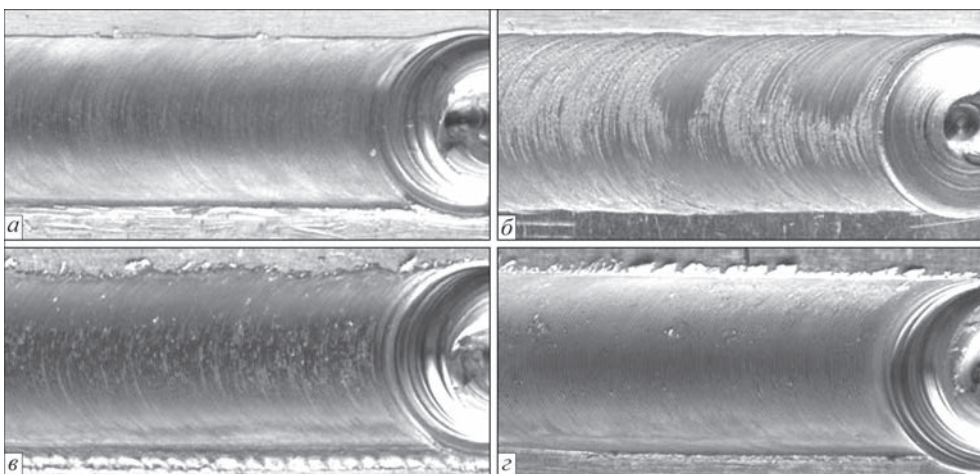


Рис. 2. Зовнішній вигляд лицьової поверхні швів, отриманих при ЗТП на оптимальних режимах, алюмінієвих сплавів у різнойменному поєднанні: а – АМг6М+6013; б – АМг6М+1419; в – 1460+6013; з – 1460+1995 (вказаний першим сплав знаходиться зверху – зі сторони набігання)

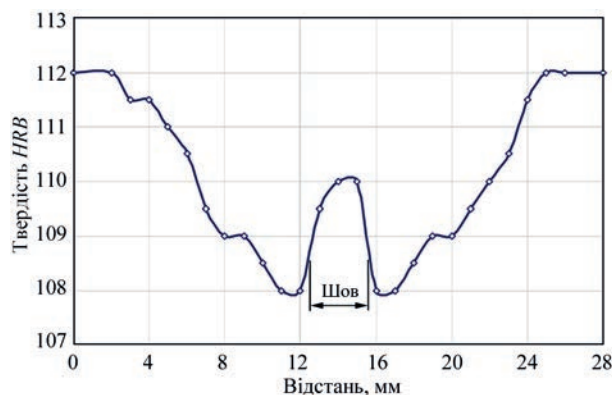


Рис. 3. Розподіл твердості у стикових з'єднаннях алюмінієвого сплаву 1963 завтовшки 2 мм, отриманих ЗТП

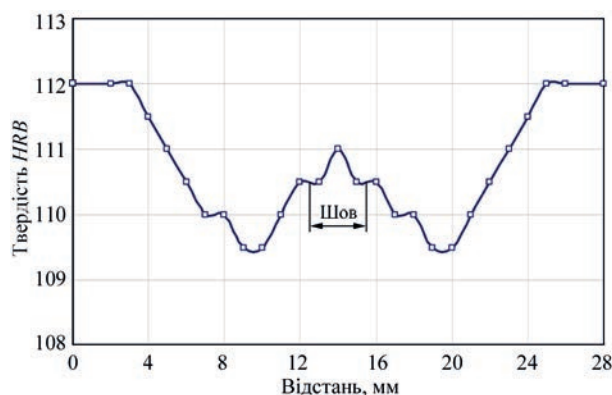


Рис. 4. Розподіл твердості у стикових з'єднаннях гранульованого алюмінієвого сплаву 1995 завтовшки 2 мм, отриманих ЗТП

ного металу вона становить HRB 87 (рис. 6). При ЗТП високоміцного гранульованого сплаву 1995 ступінь розміщення металу в зоні зварювання досить незначна – у шві твердість металу становить HRB 110,5...111,0, тоді як для основного металу вона знаходиться на рівні HRB 112, а в ЗТМВ – HRB 109,5...110,5 (рис. 4).

Вимірювання твердості металу в зоні формування нероз'ємних з'єднань, отриманих при різноіменному поєднанні алюмінієвих сплавів показали, що у порівнянні зі зварюванням одноіменних сплавів зміни твердості металу відбуваються лише у швах і на прилеглих до них ділянках

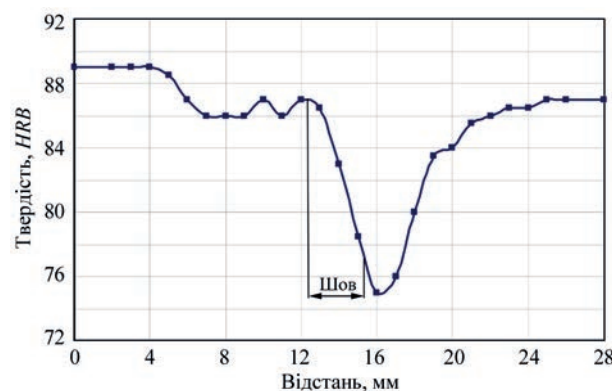


Рис. 5. Розподіл твердості у стикових з'єднаннях, отриманих при ЗТП сплаву АМг6М (зліва) зі сплавом 1419 (справа) завтовшки 2 мм

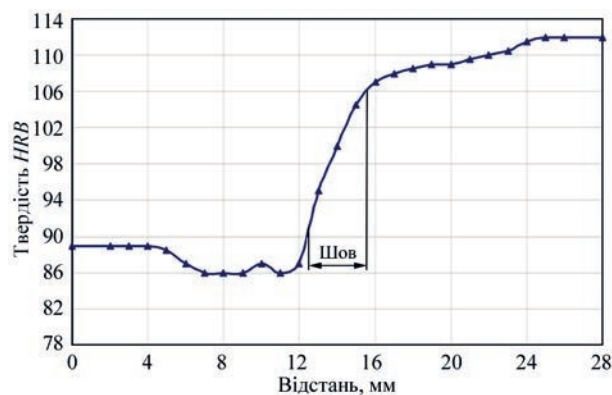


Рис. 6. Розподіл твердості у стикових з'єднаннях, отриманих при зварюванні тертям з перемішуванням сплаву АМг6М (зліва) зі сплавом 1963 (справа) завтовшки 2 мм


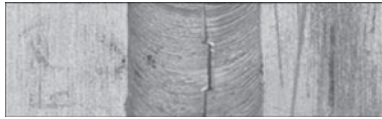
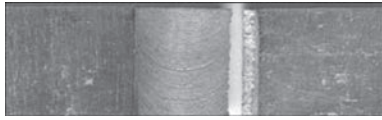


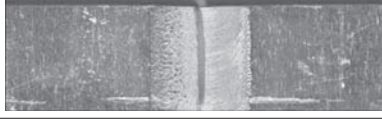
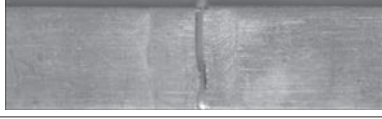
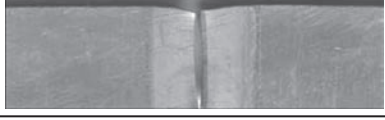
у ЗТМВ. Так, наприклад, при зварюванні сплаву АМг6М зі сплавом 1419 зі сторони АМг6М метал шва має твердість HRB 85...87, а зі сторони 1419 – HRB 77...79 (рис. 5).

Зварювання сплаву АМг6М з високоміцним сплавом 1963 забезпечує твердість металу шва зі сторони АМг6М на рівні HRB 90...95, а зі сторони 1963 – HRB 104...106 (рис. 6). Тоді як мінімальна твердість металу (HRB 86) спостерігається в ЗТМВ зі сторони сплаву АМг6М, як і для одноіменних з'єднань цього сплаву.

Аналогічна ситуація спостерігається і при зварюванні інших досліджуваних з'єднань різноіменних алюмінієвих сплавів – відбувається різка зміна твердості металу шва або її плавний перехід при поєднанні різних сплавів. Так, різка зміна твердості металу шва відбувається при зварюванні між собою таких сплавів: АМг5М + 1995, АМг6М + 1963, АМг6М + 1419, 1460 + 6013 та 1460 + 1995. Тоді як поєднання сплавів АМг6М + 6013, Д16 + 1963 і Д16 + 1995 забезпечує плавну зміну твердості металу в зоні зварювання. Наприклад, при зварюванні сплаву АМг5М зі сплавом 1995 твердість металу шва зі сторони сплаву АМг5М знаходиться на рівні HRB 84...90, а зі сторони сплаву 1995 – значно вища (HRB 104...108). При зварюванні сплаву АМг6М зі сплавом 6013 твердість металу шва приблизно однакова з обох сторін (HRB 87...89).

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що при ЗТП алюмінієвих сплавів в одноіменному поєднанні міцність їх зварних з'єднань та місце руйнування зразків залежать від хімічних складів та механічних властивостей зварюваних сплавів (табл. 3). У більшості випадків руйнування зразків зварних з'єднань відбувається у ЗТМВ. Деякі зразки сплавів АМг5М та АМг6М руйнуються по зоні термічного впливу (ЗТВ). А для з'єднань сплавів Д16 і 6013 характерним місцем руйнування зразків є межа між ЗТМВ і ЗТВ зі сторони відходу (ЗТВ_{відх.}).

Таблиця 3. Межа міцності стикових з'єднань, отриманих при ЗТП алюмінієвих сплавів в однойменному поєднанні

Номер	Марки сплавів	Межа міцності, МПа	Місце руйнування	Фото зруйнованого зразка
1	AMg5M	315 <u>310</u> 313	ЗТВ ЗТМВ	
2	AMg6M	334 <u>329</u> 332	ЗТВ ЗТМВ	
3	Д16	443 <u>439</u> 441	ЗТМВ/ЗТВ _{відх.}	
4	1460	310 <u>307</u> 309	ЗТМВ	
5	6013	238 <u>230</u> 234	ЗТМВ/ЗТВ _{відх.}	
6	1963	482 <u>462</u> 473	ЗТМВ	
7	1995	490 <u>478</u> 483	ЗТМВ	
8	1419	257 <u>253</u> 255	ЗТМВ	

Так, максимальну межу міцності мають зварні з'єднання високоміцних сплавів 1995 (483 МПа), 1963 (473 МПа) і Д16 (441 МПа), що обумовлено незначним ($HRB < 2,5$) ступенем розміцнення металу в ЗТМВ, де і відбувається руйнування зразків при статичному розтягуванні. При ЗТП високоміцного сплаву 1460 в зоні формування нероз'ємного з'єднання відбувається досить значне ($HRB 24$) розміцнення металу, внаслідок чого межа міцності його зварних з'єднань знаходиться на рівні 309 МПа. Мінімальну межу міцності мають зварні з'єднання сплавів 1419 (255 МПа) і 6013 (234 МПа), що також обумовлено великим ($\approx HRB 12$) ступенем розміцнення металу в ЗТМВ і нижчою міцністю основного матеріалу.

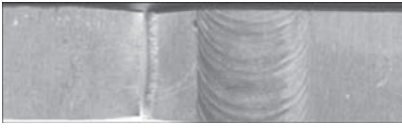
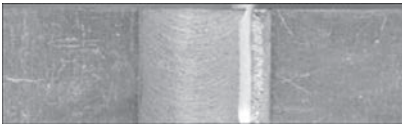

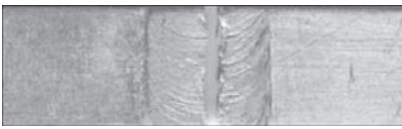
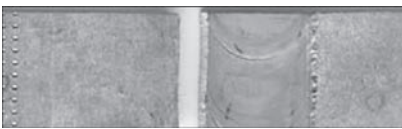
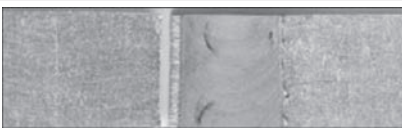
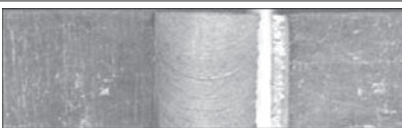
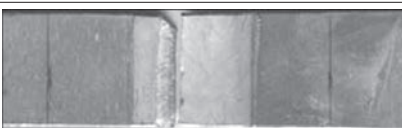
При ЗТП алюмінієвих сплавів у різнойменному поєднанні міцність з'єднань і місце руйнування зразків також залежать від того, який хімічний склад і механічні властивості мають зварювані матеріали (табл. 4).

Так, при зварюванні сплавів AMg5M чи AMg6M з високоміцними сплавами 1995 та 1963, які при цьому мало розміцнюються, руйнування

зразків з'єднань відбувається в ЗТВ або ЗТМВ зі сторони сплавів AMg5M чи AMg6M і їх міцність така ж, як і при зварюванні цих сплавів в однойменному поєднанні. Такі ж закономірності зберігаються і при зварюванні інших сплавів. Наприклад, зварні з'єднання сплавів 1460+1995 руйнуються в ЗТМВ, а Д16+1963 і Д16+1995 – на межі ЗТМВ і ЗТВ зі сторони сплавів 1460 і Д16, які мають меншу міцність. При цьому межа міцності таких з'єднань різнойменних сплавів знаходиться на рівні з'єднань відповідних однойменних сплавів. Руйнування зразків з'єднань, отриманих при ЗТП сплаву AMg6M зі сплавами 6013 та 1419, відбувається на межі зон термічного і термо-механічного впливу зі сторони сплавів з меншою міцністю.

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що при зварюванні у твердій фазі тертям з перемішуванням вище згаданих алюмінієвих сплавів в однойменному поєднанні внаслідок інтенсивної пластичної деформації металу в зоні формування нероз'ємних з'єднань відбувається подрібнення зерен. Причому при зварю-

Таблиця 4. Межа міцності з'єднань, отриманих при ЗТП алюмінієвих сплавів у різнойменному поєднанні

Номер	Марки сплавів	Межа міцності, МПа	Місце руйнування	Фото зруйнованого зразка
1	АМг5М + 1995	316 309 314	ЗТВ _{АМг5М} ЗТМВ _{АМг5М}	
2	АМг6М + 6013	236 231 234	ЗТМВ/ЗТВ ₆₀₁₃	
3	АМг6М + 1963	336 330 333	ЗТВ _{АМг6М} ЗТМВ _{АМг6М}	
4	АМг6М + 1419	259 252 256	ЗТМВ ₁₄₁₉	
5	Д16 + 1963	445 440 442	ЗТМВ/ЗТВ _{Д16}	
6	Д16 + 1995	442 439 440	ЗТМВ/ЗТВ _{Д16}	
7	1460 + 6013	237 232 234	ЗТМВ/ЗТВ ₆₀₁₃	
8	1460 + 1995	312 306 309	ЗТМВ ₁₄₆₀	

ванні сплавів, отриманих за стандартною технологічною схемою методом лиття, в ядрі шва утворюються зерна практично глобулярної форми, розмір яких не перевищує 4...6 мкм. У зоні термомеханічного впливу по границях спряження шва з основним металом спостерігається більш крупнозерниста (6...8 мкм) структура в порівнянні з ядром шва, а більшість зерен витягнуті в напрямку обертання інструмента. При цьому зі сторони набігання, де напрямки обертання та лінійного переміщення інструмента співпадають, спостерігається більш різка зміна напрямку орієнтації зерен, ніж з протилежної сторони відходу. У зоні термічного впливу зберігається структура основного матеріалу і оплавлення структурних складових не відбувається (рис. 7). При зварюванні гранульованих сплавів пересичений твердий розчин у гранулах зберігається, відбувається тільки їх механічне подрібнення, внаслідок чого ядро шва має дрібнодисперсну щільну структуру, а в зоні спряження шва з основним матеріалом лише змінюється напрямок текстури

прокату під дією обертального та поступального руху зварювального інструмента.

При ЗТП алюмінієвих сплавів у різнойменному поєднанні структура зварних з'єднань змінюється. Повне перемішування з'єднаних матеріалів спостерігається лише у верхній частині шва, яка становить 20...25 % від їх товщини. У центрі та нижній частині шва добре помітні окремі ділянки повністю неперемішаних об'ємів зварюваних сплавів, які утворилися внаслідок пластичного деформування металу і його масопереносу робочими поверхнями наконечника та бурта інструмента. При цьому розміри зерен у центральній частині шва приблизно такі ж, як і при ЗТП досліджуваних сплавів у однойменному поєднанні, що свідчить про інтенсивну пластичну деформацію металу. У ЗТМВ різнойменних зварних з'єднань спостерігаються незначні відмінності від однойменних, які також частково обумовлені наявністю повністю незмішаних об'ємів металу, а частково зміною умов формування швів

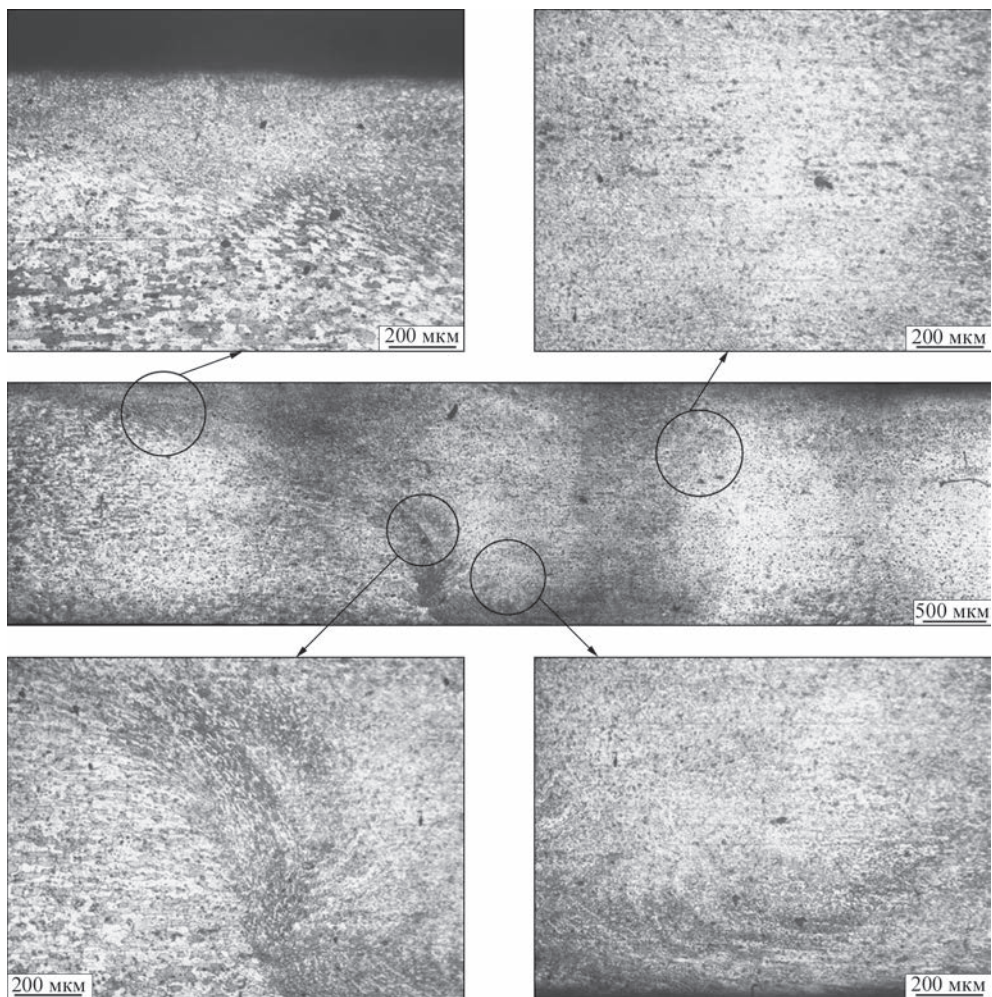


Рис. 7. Мікроструктура зварного з'єднання алюмінієвого сплаву 6013 завтовшки 2 мм, отриманого тертям з перемішуванням

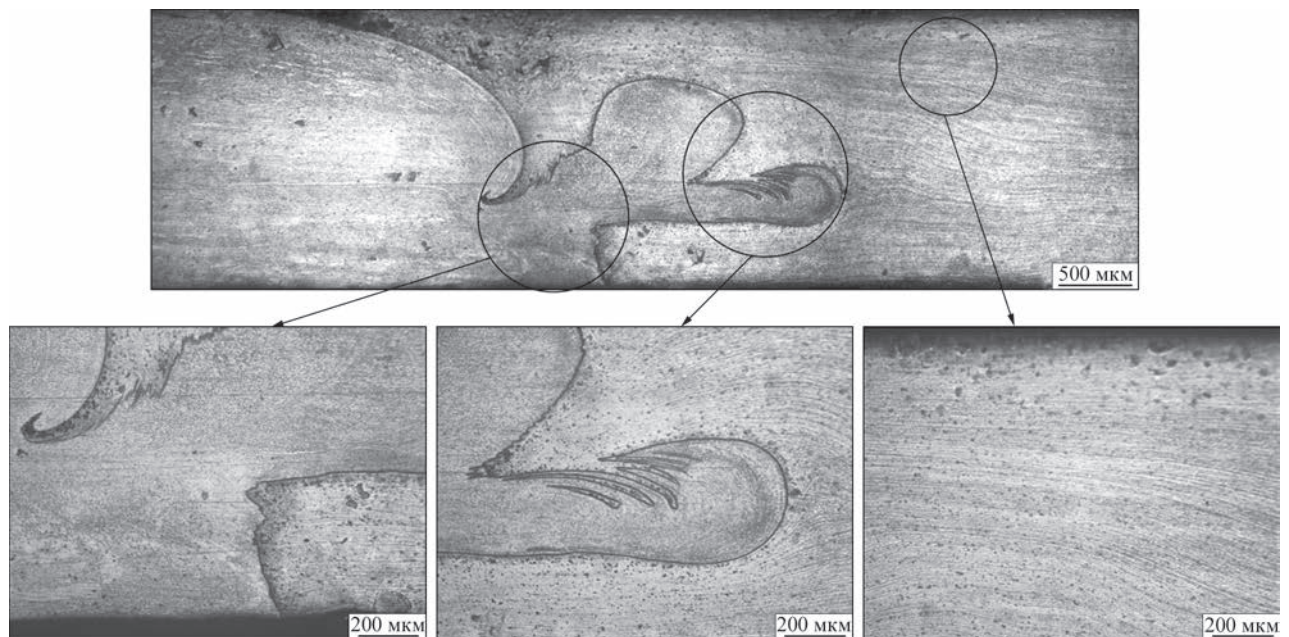


Рис. 8. Мікроструктура зварного різнойменного з'єднання завтовшки 2 мм, отриманого при ЗТП алюмінієвого сплаву 1460 (зліва) з гранульованим алюмінієвим сплавом 1995 (справа)

внаслідок різної пластичності зварюваних сплавів. При цьому у ЗТВ структура основного матеріалу не змінюється (рис. 8).

Висновки

1. Формування швів у твердій фазі при ЗТП дозволяє отримувати якісні нероз'ємні з'єднання

алюмінієвих сплавів різних систем легування як в однойменному, так і в різнойменному поєднаннях. Причому це стосується не тільки алюмінієвих сплавів, виготовлених за стандартною технологічною схемою методом лиття, але й гранульованих сплавів, які містять пересичений твердий розчин важкоплавких перехідних металів, отриманих з використанням порошкової металургії.

2. Ступінь розміщення металу у зварних швах залежить від хімічного складу алюмінієвих сплавів та їх здатності до термічного зміцнення. Мінімальна різниця між твердістю основного металу та металу шва спостерігається при ЗТП гранульованого алюмінієвого сплаву 1995 ($HRB \leq 1,5$) та високоміцного алюмінієвого сплаву 1963 ($HRB \leq 3,5$), схильних до гартування на повітрі. При зварюванні звичайних термічнозміцнених алюмінієвих сплавів 6013 і 1419 твердість металу швів набагато ($HRB > 9$) нижча, ніж твердість основного металу. У з'єднаннях, отриманих при різнойменному поєднанні алюмінієвих сплавів, у металі шва спостерігається різка або плавна зміна твердості при переході від одного сплаву до іншого, в залежності від ступеня розміщення зварюваних сплавів.

3. Міцність зварних з'єднань, отриманих при ЗТП алюмінієвих сплавів як в однойменному, так і в різнойменному поєднаннях, залежить від хімічних складів та механічних властивостей цих сплавів. Максимальну межу міцності мають зварні з'єднання високоміцних сплавів 1995 (483 МПа), 1963 (473 МПа) і Д16 (441 МПа), що обумовлено незначним ступенем розміщення металу в ЗТМВ, де і відбувається руйнування зразків при статичному розтягуванні. Руйнування зразків зварних з'єднань різнойменних алюмінієвих сплавів відбувається в ЗТМВ або на межі ЗТМВ і ЗТВ зі сторони сплаву з нижчою міцністю. При цьому межа їх міцності знаходиться на рівні з'єднань відповідних однойменних сплавів.

4. При ЗТП алюмінієвих сплавів як в однойменному, так і в різнойменному поєднаннях, через інтенсивну пластичну деформацію металу в зоні формування нероз'ємного з'єднання в ядрі шва утворюються зерна практично глобулярної форми, розмір яких не перевищує 4...6 мкм. При зварюванні гранульованих сплавів пересичений твердий розчин у гранулах зберігається, відбувається тільки їх механічне подрібнення, внаслідок чого ядро шва має дрібнодисперсну щільну структуру, а важкоплавкі легуючі елементи не виділяються з твердого розчину у вигляді алюмінідів, які можуть суттєво знизити властивості зварних з'єднань таких сплавів.

Список літератури

1. Ищенко А.Я., Лабур Т.М. (2013) *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Киев, Наукова думка. ISBN 978-966-00-1258-5.

2. Ищенко А.Я., Лабур Т.М., Бернадский В.М., Маковецкая О.К. (2006) *Алюминий и его сплавы в современных сварных конструкциях*. Киев, Экотехнология. ISBN 966-8409-14-0.
3. Белецкий В.М., Кривов Г.А. (2005) *Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение) Справочник*. Фридляндер И.Н. (ред.). Киев, КОМИНТЕХ. ISBN 966-8550-25-0.
4. Рябов В.Р., Павленко Ю.В. (1991) Сварка композиционных материалов (Обзор). *Автоматическая сварка*, **3**, 46–56.
5. Ищенко А.Я., Харченко Г.К., Фальченко Ю.В. и др. (2006) Твердофазное соединение в вакууме дисперсно-упрочненных композиционных материалов. *Сб.: Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*, **3**, 747–756.
6. Yasuhiro, Uetani, Ryotaro, Nagata, Hidetoshi, Takadi et al. (2007) Effect of Granule Size in Semi-Solid Slurry on Rheo-Extrusion of A7075 Aluminum Alloy. *Materials Science Forum* (Volumes 561-565), 291–294. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.561-565.291>
7. Guojiang, Dong, Changcai, Zhao, Yaxin, Peng, Ying, Li (2015) Hot granules medium pressure forming process of AA7075 conical parts/ *Chinese Journal of Mechanical Engineering* (Volume 28), 580–591. DOI: <https://doi.org/10.3901/CJME.2015.0217.019>
8. Inoue, A., Kimura, H. (2000) High-strength aluminium alloys containing nano-quasicrystalline particles. *Mater. Scien. And Eng.* **1**, 1–10.
9. Milman, Yu. V., Sirko, A. I., Yefimov, M. O. et al. (2006) High-strength alloys reinforced by nanosize quasi-crystalline particles for elevated temperature application. *High-Temperature materials and processes*, **1-2**, 19–29.
10. Poklyatsky, A. G., Ishchenko, A. Ya., Fedorchuk, V. E. (2011) Friction stir welding of composite, granulated and quasicrystalline aluminium alloys. *TPWG*, **7**, 2–7.
11. Мільман Ю.В., Захарова Н.П., Єфімов М.О. та ін. (2019) Структура та механічні властивості зварних з'єднань сплавів системи Al–Cr–Fe–Ti, що містять квазікристалічну фазу. *Електронна мікроскопія і прочність матеріалів*, **25**, 17–26.
12. Ищенко А.Я., Покляцький А.Г. (2010) *Інструмент для зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів*. Пат. 54096 Україна, МПК В23К 20/12; заявник і патентовласник ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. № u201005315; заяв. 30.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.

References

1. Ishchenko, A. Ya., Labur, T. M. (2013) *Welding of modern structures from aluminium alloys*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian]. ISBN 978-966-00-1258-5.
2. Ishchenko, A. Ya., Labur, T. M., Bernadsky, V. M., Makovetskaya, O. K. (2006) *Aluminium and its alloys in modern welded structures*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Russian]. ISBN 966-8409-14-0.
3. Beletsky, V. M., Krivov, G. A. (2005) *Aluminium alloys (Composition, properties, technology, application)*. In: Refer. book. Ed. by I. N. Fridlyander. Kyiv, KOMINTEKh. ISBN 966-8550-25-0.
4. Ryabov, V. R., Pavlenko, Yu. V. (1991) Welding of composite materials (Review). *The Paton Welding J.*, **3**, 46–56.
5. Ishchenko, A. Ya., Kharchenko, G. K., Falchenko, Yu. V. et al. (2006) Vacuum solid phase joint of dispersion-hardened composite materials. *Nanosistemy, Nanomaterialy, Nanotekhnologii*, **3**, 747–756 [in Russian].
6. Yasuhiro, Uetani, Ryotaro, Nagata, Hidetoshi, Takadi et al. (2007) Effect of granule size in semi-solid slurry on rheo-extrusion of A7075 aluminum alloy. *Mat. Sci. Forum*, Vol. 561-565, 291–294. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.561-565.291>
7. Guojiang, Dong, Changcai, Zhao, Yaxin, Peng, Ying, Li (2015) Hot granules medium pressure forming process of AA7075 conical parts/ *Chinese J. of Mechanical Engineering*, Vol. 28, 580–591. DOI: <https://doi.org/10.3901/CJME.2015.0217.019>
8. Inoue, A., Kimura, H. (2000) High-strength aluminium alloys containing nano-quasicrystalline particles. *Mater. Sci. And Eng.* **1**, 1–10.

9. Milman, Yu.V., Sirko, A.I., Yefimov, M.O. et al. (2006) High-strength alloys reinforced by nanosize quasi-crystalline particles for elevated temperature application. *High-Temperature Materials and Processes*, 1-2, 19–29.
10. Poklyatsky, A.G., Ishchenko, A.Ya., Fedorchuk, V.E. (2011) Friction stir welding of composite, granulated and quasicrystalline aluminium alloys. *The Paton Welding J.*, 7, 2–7.
11. Milman, Yu.V., Zakharova, N.P., Yefimov, M.O. et al. (2019) Structure and mechanical properties of welded joints of Al–Cr–Fe–Ti system with quasi-crystalline phase. *Elektronnaya Mikroskopiya i Prochnost Materialov*, 25, 17–26 [in Russian].
12. Ishchenko, A.Ya., Poklyatsky, A.G. (2010) Tool for friction stir welding of aluminium alloys. In: Pat. 54096, Ukraine, Int. Cl. B23K 20/12; fill. 30.04.2010, publ. 25.10.2010 [in Ukrainian].

MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURAL FEATURES OF BUTT JOINTS PRODUCED AT FSW OF ALUMINIUM ALLOYS OF DIFFERENT ALLOYING SYSTEMS

Poklyatskyi A.G.¹, Motrunich S.I.¹, Fedorchuk V.Ye.¹, Falchenko Iu.V.¹, Sagul M.²

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

E-mail: paton.testlab@gmail.com

² Czech Technical University, 16636, Prague, Czech Republic

The paper presents the results of investigations of the strength, hardness and structure of butt joints on aluminium alloys of different alloying systems, produced by friction stir welding (FSW). It is shown that this process allows producing sound joints of aluminium alloys of different alloying systems, both in similar and dissimilar combinations. This is true not only for aluminium alloys made by casting by the standard technological scheme, but also for granulated alloys, containing the oversaturated solid solution of refractory transition metals, produced by powder metallurgy. It is found that the strength of welded joints produced at FSW of aluminium alloys, depends on the chemical compositions and mechanical properties of these alloys. Maximum ultimate strength is demonstrated by welded joints of the following high-strength alloys: 1995 (483 MPa), 1963 (473 MPa) and D16 (441 MPa), which is due to a slight degree of metal softening in the zone of thermomechanical impact (ZTMI), which is where the samples fail at mechanical stretching. Destruction of samples of welded joints of dissimilar aluminium alloys also runs in this zone or on its boundary with the heat-affected zone (HAZ) from the side of the softer alloy. Their ultimate strength is on the level of the joints of the respective similar alloys. It is shown that intensive plastic deformation of metal at FSW of dissimilar aluminium alloys results in formation of grains of practically globular shape in the weld nugget in the permanent joint zone, their size not exceeding 4–6 μm. In granulated alloy welding, the oversaturated solid solution is preserved in the granules, just their mechanical refinement takes place, resulting in a fine dense structure of the weld nugget, and the granules containing an oversaturated solid solution of refractory transition metals are uniformly distributed over the entire volume of the matrix in the weld metal. 12 Ref., 4 Tabl., 8 Fig.

Keywords: aluminium alloys, friction stir welding, hardness, strength, structure

Надійшла до редакції 21.03.2023

WORLD TRADE FAIR FOR WELDING ENGINEERING —
JOINING, CUTTING, SURFACING

LET'S JOIN
THE WORLD!

11. – 15. September, 2023

REGISTER NOW!

www.schweissen-schneiden.com

DVS GERMAN WELDING SOCIETY

MESSE ESSEN

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN
No. 1
IN THE WORLD