

ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ СЕРІЇ 7xxx (Al–Zn–Mg–Cu) НЕНАСКРІЗНИМИ ШВАМИ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

В.М. Коржик^{1,2}, В.Ю. Хаскін^{1,2}, А.А. Гринюк², С.І. Пелешенко³, Yao Yuhui⁴, С.Г. Григоренко²,
В.О. Щерецький², О.С. Кушнарьова²

¹China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Guangzhou, 510650, China. E-mail: patonjournal@gwi.gd.cn

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

³НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37,
E-mail: imz.paton.kpi@gmail.com

⁴Shenzhen Hanzhizi Technology Co., Ltd. 6th Floor, Building B, Bantian International Center, 5 Huancheng South Road, Longgang District, Shenzhen, Guangdong, China, E-mail: 514929948@qq.com

В статті розглянуто особливості лазерного зварювання з неповним (ненаскрізним) проплавленням високоміцних алюмінієвих сплавів серії 7xxx. Встановлено, що при з'єднанні листів товщиною 1,5 мм зварюванням випромінюванням волоконного лазера на глибину 0,5...0,7 мм виникає ризик утворення пор, зокрема, в кореневій зоні, стрічкових виділень оксидної плівки в нижній частині шва, а також гарячих тріщин. Усунення останніх є можливим за рахунок зменшення погонної енергії зварювання нижче 25...30 Дж/мм. Метал швів характеризується рівновісною дрібнодисперсною структурою з розміром зерен 10...15 мкм для сплаву 7005 і 15...25 мкм для сплаву 7075. В зоні сплавлення зерна мають подовжену форму з коефіцієнтом 2,5...3,0 для сплаву 7005 і 2...5 для сплаву 7075. В ЗТВ довжина зерен зменшується, коефіцієнт форми стає 3...5 і 3,0...3,5 для сплавів 7005 і 7075, відповідно. При виконанні лазерного зварювання із малими (~5 Дж/мм) значеннями погонної енергії мікротвердість швів і ЗТВ є досить рівномірною і близькою до мікротвердості основного металу. Для сплаву 7075 в районі зони сплавлення спостерігалось зменшення мікротвердості до 20 %, що обумовлено утворенням зерен подовженої форми з коефіцієнтом 2...5. Усунення встановлених недоліків може бути досягнуто за рахунок зменшення пульсації парогазового каналу із одночасним підвищенням стабільності його існування і введення катодного руйнування оксидної плівки. Бібліогр. 11, табл. 4, рис. 8.

Ключові слова: алюмінієві сплави серії 7xxx, лазерне зварювання, формування швів, зернистість, дефекти, шляхи усунення

Сплави серії 7xxx (система Al–Zn–Mg–Cu) мають найбільшу міцність серед алюмінієвих сплавів. Після термічної обробки цей показник сягає понад 500 МПа [1]. Завдяки сполученню високої міцності із низькою густиною вони є досить привабливими для застосування при виготовленні сучасної транспортної техніки [2]. Однак зварюваність таких сплавів є поганою через значну схильність до утворення гарячих тріщин, високого коефіцієнта теплового розширення і низької температури випаровування деяких легуючих елементів, зокрема Zn і Mg [3]. Зазначені недоліки сприяють утворенню дефектів зварювання, таких як тріщини і пори. Особливо у разі лазерного зварювання з неповним (або частковим) проплавленням [4].

Шви із неповним проплавленням застосовують для герметизації фланців або певних конструкцій із порожнинами, в яких розташовано електронне оснащення. Операція зварювання при цьому виконується як елемент фінішного монтажу і у разі повного проплавлення виникає небезпека пошкод-

ження внутрішнього оснащення. Для мінімізації або повного усунення залишкових деформацій при цьому використовують лазерне зварювання. Такі конструкції наявні, зокрема, в ракетній техніці. Зварні з'єднання в них повинні забезпечити герметичність і певну міцність, але через порівняно нетривке існування питання стійкості до циклічних навантажень не розглядається. Тому розгляд особливостей формування зварних з'єднань алюмінієвих сплавів серії 7xxx, зокрема з неповним проплавленням є актуальним.

В сучасній промисловості лазерне зварювання застосовується все більш широко. Його використовують не лише в авіакосмічній промисловості, а й у вагонобудуванні, в автомобільній галузі та багатьох інших напрямках діяльності [5]. Але до поки даний процес вивчають і застосовують переважно для отримання нероз'ємних конструкцій з алюмінієвих сплавів серій 2xxx, 5xxx і 6xxx [6]. Питання особливостей застосування лазерного зварювання для виготовлення нероз'ємних кон-

Коржик В.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, Хаскін В.Ю. – <http://orcid.org/0000-0003-3072-6761>,

Гринюк А.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6088-7980>, Пелешенко С.І. – <http://orcid.org/0000-0001-6828-2110>,

Yao Yuhui – <https://orcid.org/0000-0001-7196-1317>, Григоренко С.Г. – <https://orcid.org/0000-0003-0625-7010>,

Щерецький В.О. – <https://orcid.org/0000-0002-8561-4444>, Кушнарьова О.С. – <http://orcid.org/0000-0002-2125-1795>

© В.М. Коржик, В.Ю. Хаскін, А.А. Гринюк, С.І. Пелешенко, С.Г. Григоренко, В.О. Щерецький, О.С. Кушнарьова, 2022

струкції зі сплавів серії 7xxx частково вже розглядалося в роботах [6, 7]. Так, в роботі [6] розглядалися базові фізичні процеси взаємодії лазерного випромінювання з алюмінієвими сплавами, а в роботі [7] виконувалося порівняння лазерного зварювання сплаву 7075 із мікроплазмовим і лазерно-мікроплазмовим. Визначено, що при лазерному зварюванні виникає ризик утворення внутрішніх пор і гарячих тріщин, зокрема пов'язаних із внутрішніми включеннями та дефектами швів.

В роботі [8] вже розглянуто вплив погонної енергії лазерного зварювання сплаву 7075 на зміну концентрації елементів у зварному шві та, як наслідок, на схильність до утворення гарячих тріщин. Доцільно продовжити дослідження в даному напрямі, зокрема для випадку зварювання швів із ненаскрізним проплавленням стику. Наявні дослідження не розкривають повною мірою низку важливих питань, які стосуються формування тих чи інших структур при застосуванні певних параметрів режимів лазерного зварювання, утворення характерних дефектів (в першу чергу пор і тріщин) та визначення шляхів їх усунення.

Метою роботи є дослідження формування характерних структур з'єднань і небезпеки виникнення дефектів типу пор і тріщин при лазерному зварюванні алюмінієвих сплавів серії 7xxx, виконаних із частковим (ненаскрізним) проплавленням.

Для досягнення цієї мети вирішувалися наступні завдання:

- виконання лазерного зварювання зразків сплавів серії 7xxx, визначення параметрів режиму за критеріями якісного формування верхнього валика при фіксованій глибині проплавлення;

- виготовлення шліфів, дослідження структурних особливостей виконаних зварних з'єднань;
- визначення характерних дефектів і можливих причин їх утворення;

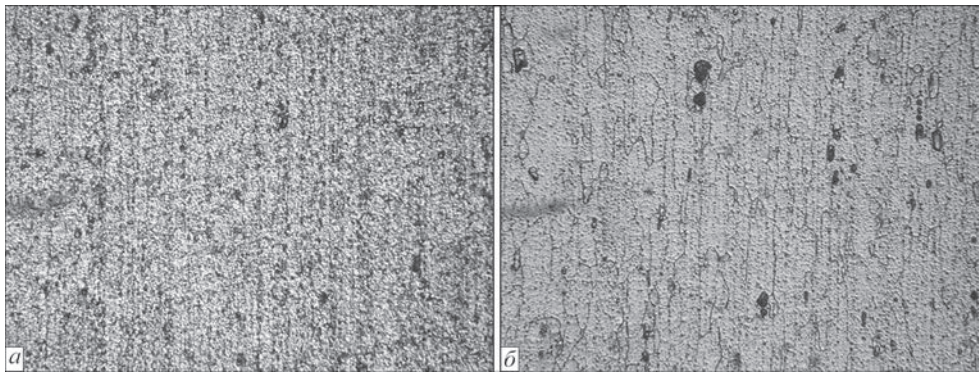
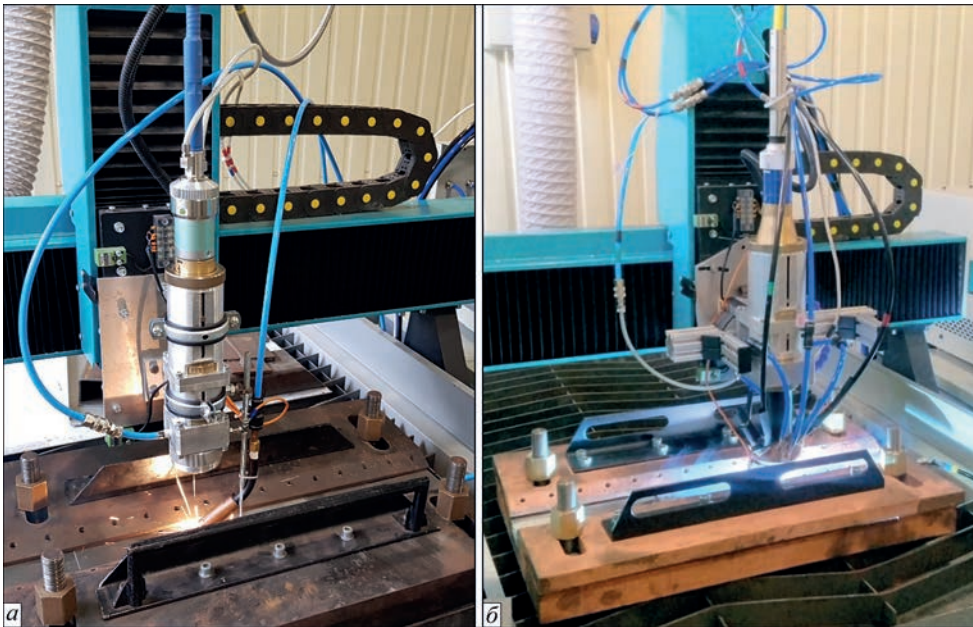
- перевірка можливості усунення визначених дефектів за рахунок використання гібридного лазерно-мікроплазмового процесу зварювання.

Для проведення експериментів з визначення параметрів режимів лазерного зварювання виготовляли зразки з високоміцних сплавів 7005 і 7075. Розмір зразків становив $50 \times 50 \times \delta$, де $\delta = 1,5$ і $3,0$ мм. В ході експериментів виконували зварювання кутових з'єднань, орієнтуючись на глибину проплавлення порядку $0,5 \dots 0,7$ мм. У табл. 1 наведені як літературні дані з хімічного складу цих сплавів, так і власні. Останні є вимірювання за окремими елементами, виконані методом аналітично-растрової мікроскопії. Цим методом визначали як інтегральний вміст окремих об'єктів елементів сплаву, так і їх вміст в обсязі окремих зерен. Розмір останніх становив: для сплаву 7005 $Dg = h \times l = (4 \dots 7) \times (20 \dots 35)$ мкм, для сплаву 7075 $Dg = h \times l = (5 \dots 15) \times (30 \dots 70)$ мкм, де h – висота, а l – довжина зерна (рис. 1). Коefіцієнт форми зерен становив: для сплаву 7005 $l/h = 5$, для сплаву 7075 $l/h = 4,5 \dots 6,0$. Мікротвердість HV при навантаженні 100 г становила: для сплаву 7005 $624 \dots 636$ МПа, для сплаву – 7075 $1050 \dots 1240$ МПа.

Для проведення експериментів зі зварювання зразків використовували волоконний лазер потужністю до 2000 Вт (моделі MFSC-2000W, фірма Max Photonics, КНР), а також комплект обладнання для плазмового зварювання, що складався з джерела SEBORA TIG AC-DC EVO 450T Robot і плазмового модулю PW30 (фірма Seborga, Італія). Для лазерного і лазерно-мікроплазмового зва-

Таблиця 1. Вміст елементів (мас. %) у високоміцних алюмінієвих сплавах 7005 і 7075

Сплав	Тип визначення	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
7005	Марочник сплавів	Основа	до 0,35	до 0,40	до 0,10	0,2...0,7	1,0...1,8
	Загальний аналіз	93,12...93,37	0,43...0,72	–	0,18...0,19	0,25...0,33	0,56...0,75
	Аналіз в обсязі зерен	88,93...92,78	0,51...0,69	–	0,16	0,62...0,64	0,76...0,80
	Включення в обсязі зерен	–	0,86...1,60	10,81...28,74	0,2...0,3	2,41...3,09	0,24...0,54
7075	Марочник сплавів	Основа	до 0,40	до 0,50	1,2...2,0	до 0,30	2,1... 2,9
	Загальний аналіз	89,84...90,66	0,45...0,62	–	1,53...1,86	0,13...0,27	0,91...1,10
	Аналіз в обсязі зерен	89,97...90,41	0,55...0,56	–	1,46...1,63	0,12...0,23	1,04...1,12
	Включення в обсязі зерен	–	0,32...39,51	6,75...29,86	0,94...7,18	0,08...2,83	0,17...30,64
Сплав	Тип визначення	Cr	Zn	Ti	Інше		
7005	Марочник сплавів	0,06...0,20	4...5	0,01...0,06	Zr 0,08...0,20 Інше до 0,15		
	Загальний аналіз	–	5,01...5,37	–	–		
	Аналіз в обсязі зерен	–	5,1...8,89	–	–		
	Включення в обсязі зерен	–	2,02...3,57	–	–		
7075	Марочник сплавів	0,18...0,28	5,1...6,1	до 0,20	до 0,15		
	Загальний аналіз	–	6,02...6,45	–	–		
	Аналіз в обсязі зерен	–	6,41...6,74	–	–		
	Включення в обсязі зерен	5,32...6,23	1,03...6,91	–	–		

Рис. 1. Мікроструктура основного металу ($\times 500$): *a* – сплав 7005; *б* – 7075Рис. 2. Зовнішній вигляд лабораторного стенда зі зварювання: *a* – лазерного; *б* – лазерно-мікроплазматого

Таблиця 2. Основні параметри режимів зварювання зразків із сплавів 7005 і 7075

Зварювання	Потужність лазерного випромінювання, Вт	Потужність мікроплазми, Вт		Швидкість зварювання V , мм/с	Витрати газу (Ar), л/хв	
		Пряма полярність	Зворотна полярність		Плазмоутворюючий	Захисний
Лазерне	400	–	–	66,7	–	8
Мікроплазмове	–	900	500	5	0,3	18
Лазерно-мікроплазмове	200	1300	600	66,7	10	30

ривання використовували лабораторний стенд із змінними пальниками власної розробки (рис. 2). Вибір параметрів режимів зварювання здійснювали за такими критеріями якісного формування, як відсутність на поверхні шва каверн і пор, тріщин, підрізів, що можливо візуально зафіксувати. Основні параметри режимів наведено у табл.2.

Для проведення металографічного аналізу з отриманих з'єднань вирізали поперечні темплети і виготовляли мікрошліфи. При цьому для виявлення мікроструктури застосовували іонно-вакуумне травлення. Результати виконаних з'єднань досліджували методами оптичної (мікроскопи Versamet-2 та Neophot-31) та аналітичної растрової електронної (мікроскоп SEM-515 фірми PHILIPS, Голландія) мікроскопії. Дослідження проводили послідовно

на наступних ділянках зразків: переплавлений метал шва \rightarrow лінія сплаву \rightarrow ЗТВ \rightarrow основний метал. За допомогою оптичної мікроскопії виконували дослідження зміни структур на цих ділянках при збільшеннях до 500 крат. Мікротвердість вимірювали за допомогою мікротвердоміра LM-400 (серії LECO). За допомогою аналітичної растрової електронної мікроскопії визначали хімічний склад ділянок швів (загальний та локальний точковий аналіз).

Лазерне зварювання ненаскрізними швами може застосовуватися для одержання герметичних з'єднань, наприклад, для приварювання фланців. Тому технологічні дослідження виконували шляхом зварювання імітаторів у вигляді кутових з'єднань. Попередні дослідження з підбору параметрів режиму зварювання показали, що для задоволення

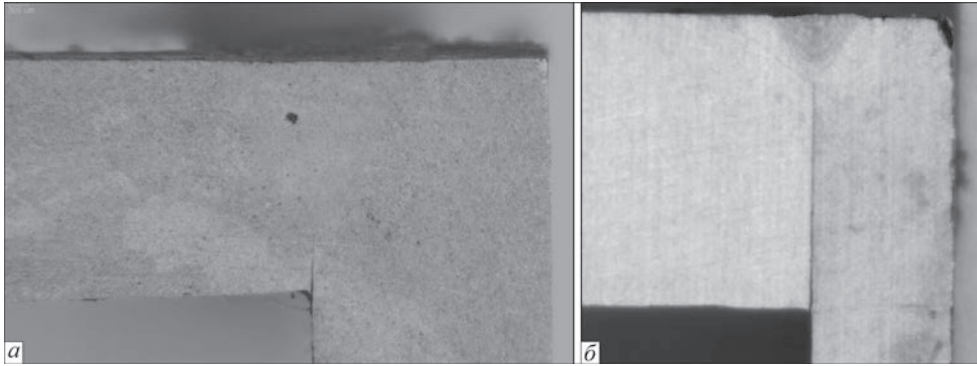


Рис. 3. Поперечні шліфи кутових з'єднань сплаву 7075, виконаних лазерним зварюванням: *a* – з потужністю 800 Вт і швидкістю 41,7 мс/с; *б* – з потужністю 400 Вт і швидкістю 66,7 мм/с

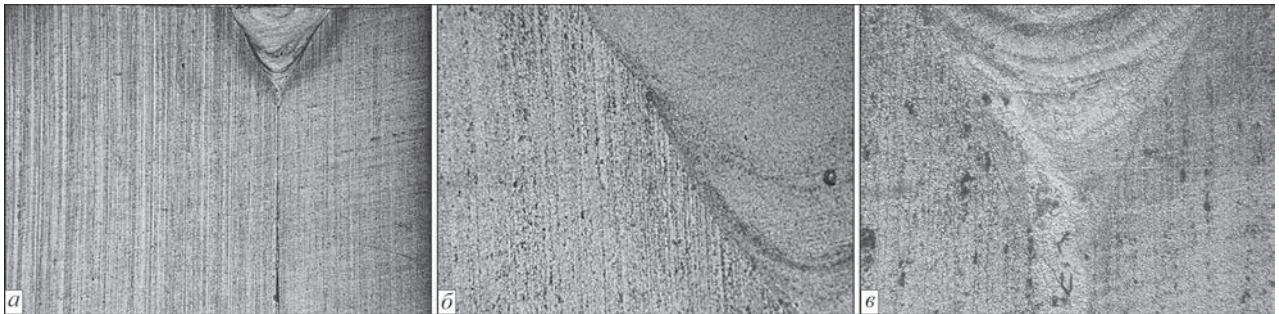


Рис. 4. Мікроструктури з'єднань сплаву 7005, отриманих лазерним зварюванням: *a* – загальний вигляд проплавлення, $\times 50$; *б* – зона сплавлення, $\times 250$; *в* – стрічкові виділення оксидного типу в кореневій зоні, $\times 500$

умови формування швів без каверн (пор), тріщин і підрізів на поверхні може бути застосовано більшу потужність при меншій швидкості (рис. 3, *a*). Проте, це викликає невідповідність критерію глибини провару. Для відповідності даному критерію у сполученні з зазначеними умовами формування з'єднання було скореговано режим (рис. 3, *б*).

При лазерному зварюванні зразків зі сплаву 7005 було отримано шви шириною і глибиною біля 0,6 мм (рис. 4, *a*). В шві виявлено одиничні пори

розміром 10...15 мкм (рис. 4, *б*). Загальна сумарна об'ємна частка дефектів (V_D) в металі шва становить порядку 2 %. В центрі металу шва структура складається із зерен рівновісної форми розміром $Dg = 10...15$ мкм. Ближче до лінії сплавлення в металі шва спостерігаються зерна подовженої форми із розміром $Dg = (5...10) \times (15...25)$ мкм (коефіцієнт форми 2,5...3,0). В кореневій частині металу шва виявлено стрічкові виділення оксидного типу розміром $l_{Al_2O_3} = 15...20$ мкм (рис. 4, *в*).

Таблиця 3. Результати визначення вмісту основних елементів способом аналітичної растрової електронної мікроскопії в одержаному лазерним зварюванням з'єднанні сплаву 7005

Зона дослідження	Тип аналізу	Вміст елементу, мас. %					
		Al	Mg	Si	Mn	Cu	Zn
Метал шва	Загальний аналіз	92,4...96,22	0,5...0,64	0,13...0,52	0,51...0,88	0,01...0,13	2,4...4,38
Метал шва	Аналіз в об'ємі зерен	91,98...95,91	0,02...0,47	0,4...0,7	0,55...0,87	0,17...0,23	3,02...6,53
ЗТВ	Загальний аналіз	94,0...94,72	0,55...0,74	0,53...0,61	0,41...0,54	0,43	3,55...4,81
ЗТВ	Аналіз в об'ємі зерен	93,01...93,17	0,69...0,7	0,45...0,48	0,58...0,63	0,07...0,23	4,85...5,13
Основний метал	Загальний аналіз	94,66...95,02	0,63...0,66	0,43...0,72	0,27...0,35	0,18...0,29	4,05...4,36
Основний метал	Аналіз в об'ємі зерен	90,41...94,79	0,56...0,92	0,51...0,69	0,49...0,95	0,16	3,38...4,17

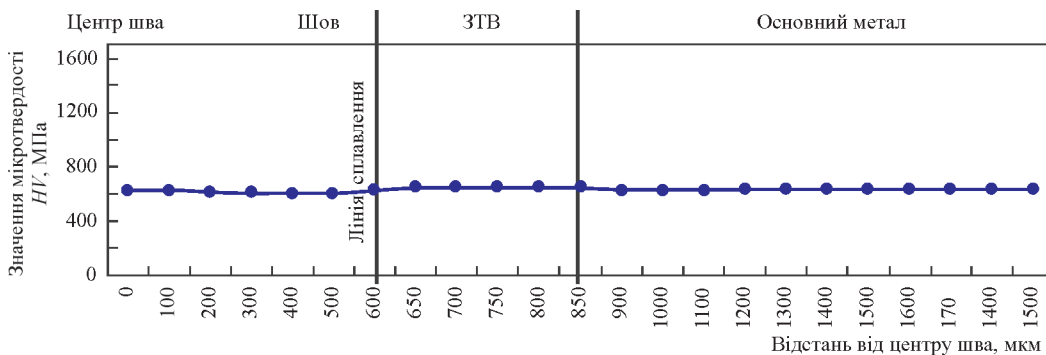


Рис. 5. Розподіл мікротвердості HV (навантаження 100 г) від осі шва в бік основного металу у з'єднанні сплаву 7005



Рис. 6. Мікроструктура з'єднань сплаву 7075, отриманих лазерним зварюванням: а – загальний вигляд проплавлення, $\times 20$; б – пори в кореневій зоні, $\times 250$; в – стрічкові виділення оксидного типу в кореневій зоні, $\times 500$

Зона термічного впливу (ЗТВ) має розмір порядку 225 мкм. Розмір зерен в ЗТВ становить $Dg = (5...10) \times (15...50)$ мкм (коефіцієнт форми 3...5). Нижче шва в матеріалі зварених пластин зернистість становить $Dg = (4...5) \times (10...12)$ мкм з одного боку і $Dg = (5...6) \times (15...20)$ мкм з іншого (коефіцієнт форми 2,5...3).

Мікротвердість HV в центрі шва становить 613...624 МПа, в зоні сплавлення ~ 602 МПа, в ЗТВ підвищується до 631...648 МПа (рис. 5).

Результати розподілу хімічних елементів в зонах з'єднання наведено в табл. 3. Встановлено, що в металі шва і ЗТВ відбувся певний перерозподіл елементів в обсязі зерен і загальному обсязі цих зон. Вигорання легуючих елементів не зафіксовано.

При лазерному зварюванні зразків зі сплаву 7075 було отримано шви шириною порядку 0,64 мм і глибиною близько 0,74 мм (рис. 6, а). В шві виявлено поодинокі пори розміром $d_n = 10...30$ мкм (рис. 6, б). Загальна сумарна об'ємна частка дефектів (V_d) в металі шва становить близько 3%. Структура в центрі металу шва характеризується зернами рівновісної форми з

розміром $Dg = 15...25$ мкм. Ближче до лінії сплавлення в металі шва спостерігаються зерна подовженої форми розміром $Dg = (5...10) \times (20...50)$ мкм (коефіцієнт форми 2...5). В кореневій частині металу шва виявлено стрічкові виділення оксидного типу розміром $l_{Al_2O_3} = 5...15$ мкм, розташування яких повторює форму кореневої частини (рис. 6, в). Ширина ЗТВ в даному з'єднанні становить 200...240 мкм (рис. 6, а). Розмір зерен в ЗТВ становить $Dg = (10...15) \times (30...50)$ мкм (коефіцієнт форми 3...3,5). Нижче шва в матеріалі зварених пластин зернистість становить $Dg = (10...25) \times (45...50)$ мкм з одного боку і $Dg = (5...25) \times (20...75)$ мкм з іншого.

Мікротвердість HV металу шва складає 958...980 МПа, в зоні сплавлення 829...936 МПа, в ЗТВ підвищується в середньому на 20% відносно металу шва і складає 1030...1070 МПа (рис. 7).

Результати розподілу хімічних елементів в зонах з'єднання наведено в табл. 4. Встановлено, що в металі шва і ЗТВ відбувся певний перерозподіл елементів в обсязі зерен і загальному обсязі цих зон. Вигорання легуючих елементів не зафіксовано.

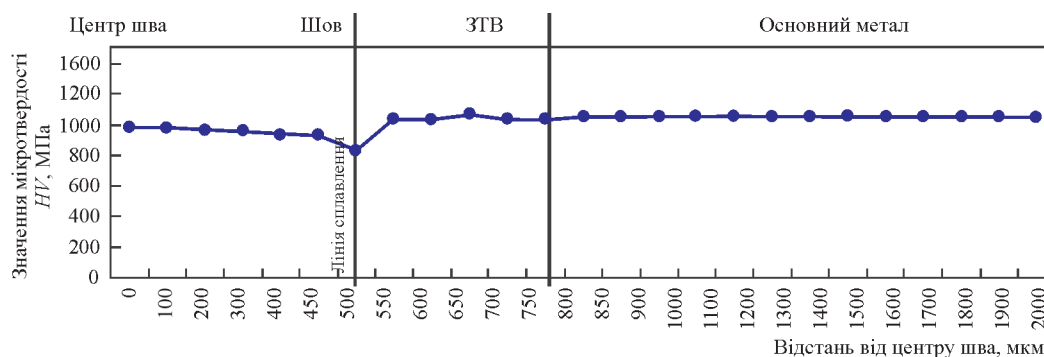


Рис. 7. Розподіл мікротвердості HV (навантаження 100 г) від осі шва в бік основного металу у з'єднанні сплаву 7075

Таблиця 4. Результати визначення вмісту основних елементів способом аналітичної растрової електронної мікроскопії в одержаному лазерним зварюванням з'єднанні сплаву 7075

Зона дослідження	Тип аналізу	Вміст елементу, мас. %					
		Al	Mg	Si	Mn	Cu	Zn
Метал шва	Загальний аналіз	89,79...90,17	1,04...1,11	0,47...0,49	0,08...0,14	1,83...2,02	6,05...6,61
Метал шва	Аналіз в об'ємі зерен	89,33...90,27	0,97...1,01	0,42...0,65	0,12...0,17	1,74...2,04	6,17...7,11
ЗТВ	Загальний аналіз	88,79...89,91	1,05...1,16	0,27	0,12	1,2...2,29	6,78...7,38
ЗТВ	Аналіз в об'ємі зерен	89,53...89,54	1,13...1,24	0,5...0,71	0,05...0,16	1,72...1,84	6,73...6,84
Основний метал	Загальний аналіз	89,84...90,66	0,91...1,1	0,45...0,62	0,13...0,27	1,53...1,86	6,02...6,45
Основний метал	Аналіз в об'ємі зерен	89,84...90,41	1,04...1,12	0,55...0,56	0,12...0,17	1,46...1,63	6,41...6,74

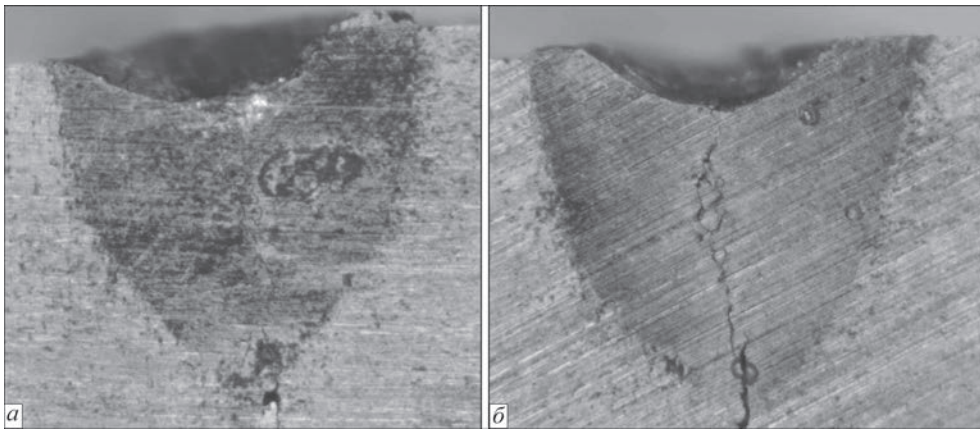


Рис. 8. Поперечні шліфи з'єднань сплаву 7075, виконаних лазерним зварюванням: *a* – $E \approx 25$ Дж/мм; *б* – 35

У разі зварювання сплаву 7005 в кореневій частині шва спостерігається затікання рідкого металу у щілину зварюваного стику (рис. 4, *a*). Це пояснюється високою рідкотекучістю даного сплаву, а також відомим ефектом формування пічкової структури в кореневій зоні (див., наприклад, роботу [9]). Наявність дрібних пор в кореневій частині шва (рис. 6, *б*) у разі зварювання сплаву 7075 пояснюється потраплянням повітря зі стику. Стрічкові виділення оксидної плівки, що спостерігаються при зварюванні обох сплавів, можуть пояснюватися потраплянням до зварювальної ванни фрагментів цієї плівки, які лишилися або утворилися на зварюваних краях.

Відсутність гарячих тріщин у проаналізованих вище зразках пояснюється підібраним високошвидкісним режимом зварювання, при якому погонна енергія становила порядку $E = 5$ Дж/мм (рис. 3, *б*). У разі підвищення погонної енергії до значень $E = 5 \dots 30$ Дж/мм схильність до утворення тріщин збільшується. В цьому діапазоні значень можливими є варіанти одержання швів без тріщин, наприклад, при $E \approx 20$ Дж/мм (рис. 3, *a*), або із зародженням тріщин у корені шва при $E \approx 25$ Дж/мм (рис. 8, *a*). При збільшенні погонної енергії понад ~ 30 Дж/мм у разі зварювання сплаву 7075 виникає загроза утворення гарячих тріщин (рис. 8, *б*). Такі тріщини зароджуються в кореневій зоні шва, у тому числі на кореневих дефектах типу пор, та можуть мати протяжність на всю його висоту.

Для усунення дефектів в кореневій частині швів доцільно зменшити і стабілізувати пульсації пароголового каналу, які призводять до утворення пічкової структури. Для усунення небезпеки утворення стрічкових виділень оксидної плівки доцільно руйнувати її в зварювальній ванні, наприклад, за рахунок застосування електричної дуги зворотної полярності. З роботи [10] відомо, що гібридні лазерно-дугові процеси сприяють стабілізації пічкової структури кореню швів, а з роботи [11] відомий ефект катодного очищення при застосуванні лазерно-плазмового зварювання. За допомогою лабораторного стенду,

наведеного на рис. 2, *б*, було проведено попередні дослідження з лазерно-мікроплазмового зварювання сплавів 7005 і 7075. Наявність стрічкових виділень оксидного типу (включень оксидної плівки) в переплавленому металі при цьому не була виявлена. Схильність до утворення пор в кореневій частині шва знизилася. Таким чином, одним з достатньо ефективних шляхів усунення виявлених характерних дефектів можна вважати заміну лазерного зварювання гібридним лазерно-мікроплазмовим.

Висновки

1. Встановлено, що при формуванні зварних з'єднань алюмінієвих сплавів серії 7xxx з листів товщиною 1,5 мм зварюванням випромінюванням волоконного лазера із частковим (ненаскрізним) проплавленням на глибину 0,5...0,7 мм виникає ризик утворення пор, зокрема в кореневій зоні, стрічкових виділень оксидної плівки в нижній частині шва, а також гарячих тріщин. Усунення останніх є можливим за рахунок зменшення погонної енергії зварювання нижче 25...30 Дж/мм.

2. Метал швів характеризується рівновісною дрібнодисперсною структурою з розміром зерен 10...15 мкм для сплаву 7005 і 15...25 мкм для сплаву 7075. В зоні сплавлення зерна мають подовжену форму з коефіцієнтом 2,5...3,0 для сплаву 7005 і 2...5 для сплаву 7075. В ЗТВ довжина зерен зменшується, коефіцієнт форми стає 3...5 і 3,0...3,5 для сплавів 7005 і 7075, відповідно.

3. При виконанні лазерного зварювання із малими (~ 5 Дж/мм) значеннями погонної енергії мікротвердість швів і ЗТВ є досить рівномірною і близькою до мікротвердості основного металу. Для сплаву 7075 в районі зони сплавлення спостерігалася зменшення мікротвердості до 20 %, що обумовлено утворенням зерен подовженої форми з коефіцієнтом 2...5.

4. Усунення встановлених недоліків може бути досягнуто за рахунок зменшення пульсацій пароголового каналу із одночасним підвищенням ста-

більності його існування і введення катодного руйнування оксидної плівки.

Робота виконувалась при підтримці проектів:

1. *The National Key Research and Development Program of China – in the framework of the strategy «One Belt – One Road» (grant number 2020YFE0205300);*

2. *Strategic project of the Academy of Sciences of Guangdong Province, (GDAS'Project of Science and Technology Development, 2020GDASYL-20200301001), China;*

3. *Project of the Guangzhou Economic and Technological Development Zone 2019GH19, China.*

Список літератури/References

1. Varshney, D., Kumar, K. (2021) Application and use of different aluminium alloys with respect to workability, strength and welding parameter optimization. *Ain Shams Engineering Journal*, 12, 1, 1143–1152. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.013>
2. Kang, M., Kim, C. (2017) A Review of Joining Processes for High Strength 7xxx Series Aluminum Alloys. *Journal of Welding and Joining*, 35, 6, 79–88. DOI: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.6.12>
3. Löveborn, D., Larsson, J. K., Persson, K.-A. (2017) Weldability of Aluminium Alloys for Automotive Applications. *Physics Procedia*, 89, 89–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2017.08.011>
4. Kang, M., Cheon, J., Kam, D.-H., Kim, C. (2021) The hot cracking susceptibility subjected the laser beam oscillation welding on 6XXX aluminum alloy with a partial penetration joint. *Journal of Laser Applications*, 33, 012032. DOI: <https://doi.org/10.2351/7.0000319>
5. Kim, C.-H., Ahn, Y.-N., Lim, H.-S. (2011) Laser Welding of Automotive Aluminum Alloys. *Journal of Welding and Joining*, 29, 4, 21–26. DOI: <https://doi.org/10.5781/KWJS.2011.29.4.383>
6. Zhao, H., White, D.R., DebRoy, T. (1999) Current issues and problems in laser welding of automotive aluminium alloys. *International Materials Reviews*, 44, 6, 238–266. DOI: <https://doi.org/10.1179/095066099101528298>
7. Korzhyk, V., Khaskin, V., Grynyuk, A. et al. (2022) Comparison of the features of the formation of joints of aluminum alloy 7075 (Al–Zn–Mg–Cu) by laser, microplasma, and laser-microplasma welding. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1/12(115), 38–47. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253378>
8. Holzer, M., Hofmann, K., Mann, V. et al. (2016) Change of Hot Cracking Susceptibility in Welding of High Strength Aluminum Alloy AA 7075. *Physics Procedia*, 83, 463–471. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.048>
9. Fetzer, F. (2018) Fundamental investigations on the spiking mechanism by means of laser beam welding of ice. *Journal of Laser Applications*, 30, 1, 012009-1–012009-9. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.4986641>
10. Shelyagin, V.D., Khaskin, V.Yu., Garashchuk, V.P. et al. (2002). Hybrid CO₂-laser and CO₂ consumable-arc welding. *The Paton Welding J.*, 10, 35–38.
11. Krivtsov, I.V., Shelyagin, V.D., Khaskin, V.Yu. et al. (2007) Hybrid laser-plasma welding of aluminium alloys. *Ibid*, 5, 36–40.

FIBRE LASER WELDING OF ALUMINIUM ALLOYS OF 7xxx SERIES (Al–Zn–Mg–Cu) BY NON-THROUGH THICKNESS WELDS

V.M. Korzhyk^{1,2}, V.Yu. Khaskin^{1,2}, A.A. Grynyuk², S.I. Peleshenko³, Yao Yuhui⁴, S.G. Hryhorenko², V.O. Shcheretskiy², O.S. Kushnarova²

¹China-Ukraine Institute of Welding, Guangdong Academy of Sciences, Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Guangzhou, 510650, China. E-mail: patonjournal@gwi.gd.cn

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

³NTUU «Igor Sikorskiy Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohi Prosp., 03056, Kyiv. E-mail: imz.paton.kpi@gmail.com

⁴Shenzhen Hanzhizi Technology Co., Ltd. 6th Floor, Building B, Bantian International Center, 5 Huancheng South Road, Longgang District, Shenzhen, Guangdong, China, E-mail: 514929948@qq.com

The paper deals with the features of laser welding with incomplete (non-through thickness) penetration of high-strength aluminium alloys of 7xxx series. It was found that at joining of 1.5 mm sheets by fibre laser welding to the depth of 0.5...0.7 mm there arises the risk of formation of pores, in particular, in the root zone, streaks of oxide film in the weld lower part, as well as hot cracks. The latter can be eliminated by reducing the heat input below 25 – 30 J/mm. The weld metal is characterized by an equiaxed finely dispersed structure with grain size of 10...15 ~m for 7005 alloy and 15...25 ~m for 7075 alloy. In the fusion zone, the grains are of an elongated shape with 2.5...3.0 coefficient for 7005 alloy and 2...5 for 7075 alloy. In the HAZ the grain length is reduced, the shape coefficient becomes 3...5 and 3.0...3.5 for 7005 and 7075 alloys, respectively. At performance of laser welding with small (~5 J/mm) values of the heat input, microhardness of the welds and HAZ is rather uniform, and close to that of the base metal. For 7075 alloy microhardness drop to 20% was observed in the fusion zone region, that is due to formation of grains of an elongated shape with shape coefficient of 2...5. The found drawbacks can be eliminated through reduction of pulsations of the vapour-gas channel with simultaneous increase of the stability of its existence and introduction of cathode breaking of the oxide film. 11 Ref., 4 Tabl., 8. Fig.

Keywords: aluminium alloys of 7xxx series, laser welding, weld formation, graininess, defects, ways to eliminate

Надійшла до реакції 28.03.2022

**XXI МІЖНАРОДНИЙ
ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2022**
МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

15 - 18
листопада

