

Газове паяння тонколистової оцинкованої сталі алюмінієвими припоями

В.А. Поліщук¹ • Н.М. Стреленко¹ • В.Л. Коваленко¹

Received: 3 September 2021 / Accepted: 25 October 2021

Анотація. В даній роботі був проведений перший етап експериментальних досліджень з оцінки основних фізико-хімічних процесів, які визначають якісні характеристики паяного з'єднання тонколистової оцинкованої сталі при газовому паянні системами алюмінієвих припоїв. Зокрема, проведена оцінка здатності до розтікання та змочування алюмінієвих припоїв (AlSi5, AlSi12) на поверхні тонколистової оцинкованої сталі (марки DX56D+Z, товщиною 0,4 мм, і шаром цинкового покриття 45–65 мкм) при поетапному збільшенні площі нагріву основного металу в умовах наявності та відсутності флюсу (Al-Flux 726). Нагрів нависки припою проводився “не напряму”, а через матеріал зразка зі зворотної сторони пластини для максимального збереження антикорозійного цинкового покриття на міжфазній границі взаємодії рідкого припою та основного матеріалу.

Ключові слова: тонколистова оцинкована сталь, алюмінієві припої, газове паяння, питома площа розтікання, краєвий кут змочування.

Вступ

Використання тонколистової сталі (товщиною до 2 мм) значно збільшилось за останні десятиліття з 10% до 90%, що обумовлено необхідністю зниження ваги конструкцій при якій забезпечується підвищення продуктивності кінцевого виробу [1]. Тонколистова сталь з антикорозійним покриттям використовується для конструктивних елементів автомобільної промисловості, авіабудування, житлових будівель, суднобудування, сільського господарства і т. п. Одним з основних факторів, що дозволяє підвищити термін експлуатації тонколистових матеріалів, є наявність захисного покриття із необхідними механічними характеристиками, які відповідають вимогам експлуатації виробу. З металевих покриттів, в світовій практиці, для тонколистової сталі найбільш широко використовуються цинкові [2, 10]. Однак, зварювання, паяння-зварювання та

високотемпературне паяння тонколистової оцинкованої сталі має ряд проблем, перш за все пов'язаних з випаровуванням цинку в околосшовній зоні, зниженням корозійної стійкості, а також формуванням залишкових напружень і деформацій.

На сьогодні альтернативним способом з'єднання тонколистової оцинкованої сталі є електродугове паяння-зварювання способом MIG дротами на основі міді (CuSi3, CuAl8) та використанням інноваційної технології керованого процесу тепловкладення (СМТ), що дозволяє значно знизити кількість тепла необхідного для отримання з'єднань з достатнім рівнем механічних та антикорозійних властивостей. В свою чергу, сучасні темпи розвитку більшості галузей промисловості та розширення номенклатури виробів потребують оптимізації існуючої технології для з'єднання оцинкованої сталі товщиною 0,4–0,7 мм із шаром антикорозійного цинкового покриття 45–65 мкм [3, 9].

Одним із можливих рішень оптимізації технології з'єднання тонколистових оцинкованих сталей є використання системи припоїв на основі алюмінієвих сплавів, які характеризуються значно меншою температурою плавлення (573–625°C) в порівнянні з припоями на основі міді (965–1040°C). Це, в свою чергу, до-

✉ V.A. Polischuk
vitaliypolischuk9@gmail.com

✉ N.M. Strelenko
strelenkon@gmail.com

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

звляє зберегти антикорозійне цинкове покриття, а також знизити рівень залишкових напружень та деформацій. Однак, забезпечення формування якісного паяного з'єднання при використанні алюмінієвих припоїв в значній мірі залежить від збереження достатнього рівня цинкового шару саме на міжфазній границі взаємодії “рідкий припій-антикорозійне покриття- основний метал”, що можливо за умов використання джерел з низьким рівнем тепловкладення та концентрацією енергії [4, 8, 11]. Тому, для вирішення цієї проблеми, у даній роботі запропоновано нагрів припою “не напряму” газовим полум'ям, а через матеріал зразка зі зворотної сторони пластини.

Основною метою дослідження є обґрунтований аналіз основних фізико-хімічних процесів, які визначають якісні характеристики паяного з'єднання із тонколистової оцинкованої сталі при газовому паянні системою алюмінієвих припоїв. Проведена оцінка здатності алюмінієвих припоїв (AlSi5, AlSi12) до розтікання і змочування поверхні оцинкованої сталі при поетапному збільшенні площі нагріву основного металу газовим полум'ям в умовах наявності та відсутності флюсу.

Матеріали та обладнання

Для проведення дослідів були підготовлені зразки з тонколистової оцинкованої сталі DX56D + Z у вигляді

пластин з наступними геометричними параметрами: довжина 50 мм, ширина 40 мм, товщина 0,4 мм. Хімічний склад і механічні властивості сталі наведені в таблиці 1. Товщина цинкового покриття сталі становить 45–65 мкм.

Вибір даної системи припоїв на основі алюмінію був обумовлений їх низькою температурою плавлення, що дозволить зберегти достатній рівень антикорозійного цинкового покриття на міжфазній границі взаємодії “рідкий припій-антикорозійне покриття- основний метал” і, як результат, забезпечити формування паяного шва з достатніми якісними характеристиками. Для виготовлення навісок припоїв вагою 0,2 г були використані дроти марок AlSi5, AlSi12 діаметром 1,2 мм. Хімічний склад і температура плавлення припоїв наведені в таблиці 2.

Видалення окисних плівок в реакційній зоні паяння забезпечується використанням флюсу AL-Flux 726 для паяння алюмінієвих матеріалів з температурою активації 515–630 °С.

Для здійснення експериментальної частини дослідів була спроектована та виготовлена оснастка для фіксації пластини і газових пальників з можливістю руху по траєкторії, що описує коло із заданим радіусом (рис. 1) та нагріву припою як напряму так і не напряму через матеріал зразка.

У якості джерела тепла була використана модель пальники MT-100 з регулюванням потоку газу.

Характеристики пальника наведені в таблиці 3.


Таблиця 1. Хімічний склад та механічні властивості сталі DX56D+Z EN10346: 2015

DX56D	C, (max %)	Si, (max %)	Mn, (max %)	P, (max %)	S, (max %)	Ti, (max %)
	0,12	0,5	0,6	0,1	0,045	0,3
Межа текучості, МПа					120–180	
Межа міцності, МПа					260–350	
Відносне видовження, % min.					39	
Коефіцієнт деформації, r min.					1,9	

Таблиця 2. Хімічний склад і температура плавлення алюмінієвих припоїв

Марка припою	T _{солідус-ліквідус} , °С	Вміст елементів, мас. %							Класифікація
		Al	Si	Cu	Zn	Mn	Mg	Ti	
AlSi5	573-625	94	5	-	0,2	0,2	0,1	0,15	DIN 1732: SG-AlSi5 Alloy-No.: 3.2245
AlSi12	575-585	87	12	-	0,1	0,3	0,05	0,15	DIN 1732: SG - AlSi12 Alloy-No.: 3.2585

Таблиця 3. Характеристики газового пальника

Температура полум'я	1300 °С	
Температура жала	210–450°С	
Ємність для газу	7 мл	
Еквівалентна потужність	30–70 Вт (регулюється)	
Довжина	19 см	

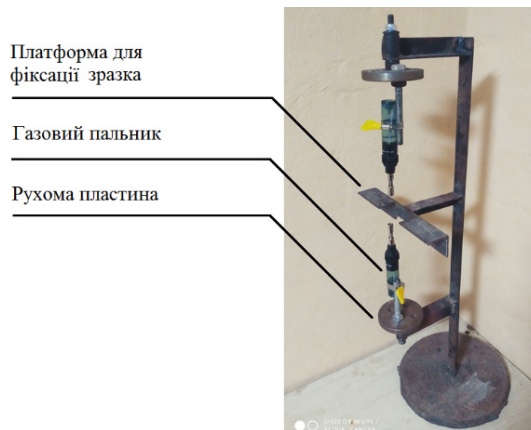


Рис. 1. Оснастка для фіксації пластини і газового пальника

У якості газу для пальника був використаний – ізобутан згідно ТУ У 25.2-2981412878-003:2009.

Експериментальні дослідження

Для оцінки здатності алюмінієвих припоїв AlSi5 та AlSi12 до розтікання на поверхні оцинкованої сталі була обрана схема розплавлення навісок припоїв “не напрям”, а через нагрів пластини газовим полум’ям зі зворотної сторони (рис. 2). Такий спосіб нагріву припою дозволить зберегти достатній рівень антикорозійного цинкового покриття на міжфазній границі взаємодії “рідкий припій-антикорозійне покриття- основний метал”, яке виступатиме в ролі проміжного прошарку між поверхнею сталі та алюмінієвого припою для забезпечити формування паяного шва з достатніми якісними характеристиками. На попередньому етапі досліджень паяння тонколистової оцинкованої сталі алюмінієвими припоями проводилося електродуговим MIG/CMT способом, де зразки мали майже повну відсутність формування зчеплення між матеріалом пластини і алюмінієвим припоєм саме в зоні паяного шва – на міжфазній границі взаємодії “рідкий припій-антикорозійне покриття- основний метал”. Проблеми з формуванням паяного з’єднання при електродуговому MIG/CMT паянні спричинені повним руйнуванням цинкового покриття на міжфазній границі взаємодії “рідкий припій-антикорозійне покриття- основний метал”, що підтверджують дослідження на корозійну стійкість [4].

Досліди проводилися в дві серії. Перша серія дослідів виконувалися в умовах відсутності флюсу. У другій серії дослідів на пластину попередньо рівномірним шаром наносився флюс Al-Flux 726 у вигляді порошку масою 0,2 г.

Для кожної із серій, процес розплавлення навісок припоїв здійснювався із поетапним збільшенням площі нагріву основного металу де: позиція пальника № 1 (локальний нагрів) відповідає встановленню пальника нерухомо безпосередньо під навіскою припою; по-

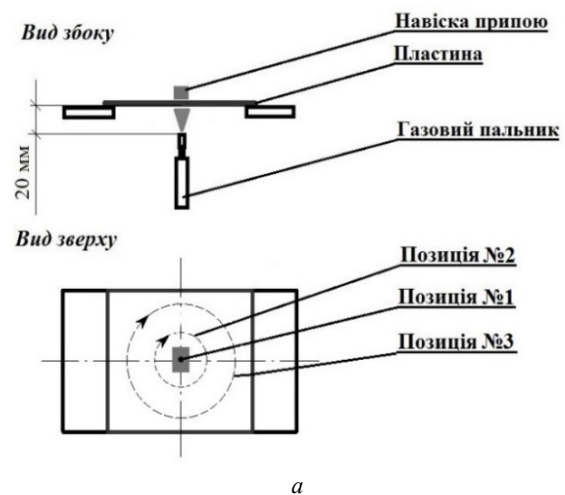


Рис. 2. Спосіб нагріву пластини газовим полум’ям: (а) схема, (б) фото

зиція пальника № 2 відповідає обертанню газового полум’я довкола місця розміщення навіски з радіусом 5 мм; позиція пальника № 3 відповідає обертанню газового полум’я довкола місця розміщення навіски з радіусом 10 мм.

Після охолодження зразків було виконано вимірювання крайового кута змочування та розрахунок питомої площі розтікання (площі, яку займає припій після розтікання, віднесеної до одиниці його маси, $\text{мм}^2/\text{мг}$). Після чого, для оцінки зчеплення припою з основним металом, зразки пройшли випробування були випробувані на згин 90° .

Результати експериментальних досліджень

Розтікання припою в умовах відсутності флюсу

Розрахункові дані показали, що за відсутності флюсу, питома площа розтікання при збільшенні площі нагріву зростає у 6 раз для припою AlSi5, і знаходиться в діапазонах для позиції № 1 $0,35\text{--}0,39 \text{ мм}^2/\text{мг}$ та позиції № 3 $2,26\text{--}2,4 \text{ мм}^2/\text{мг}$ (рис. 3 а, б, в). В свою чергу, питома площа розтікання для AlSi12 зростає в 3 рази і знаходиться в діапазонах для позиції № 1 $0,95\text{--}1,17 \text{ мм}^2/\text{мг}$ та позиції № 3 $2,92\text{--}3,1 \text{ мм}^2/\text{мг}$ (рис. 3 г, д, е).

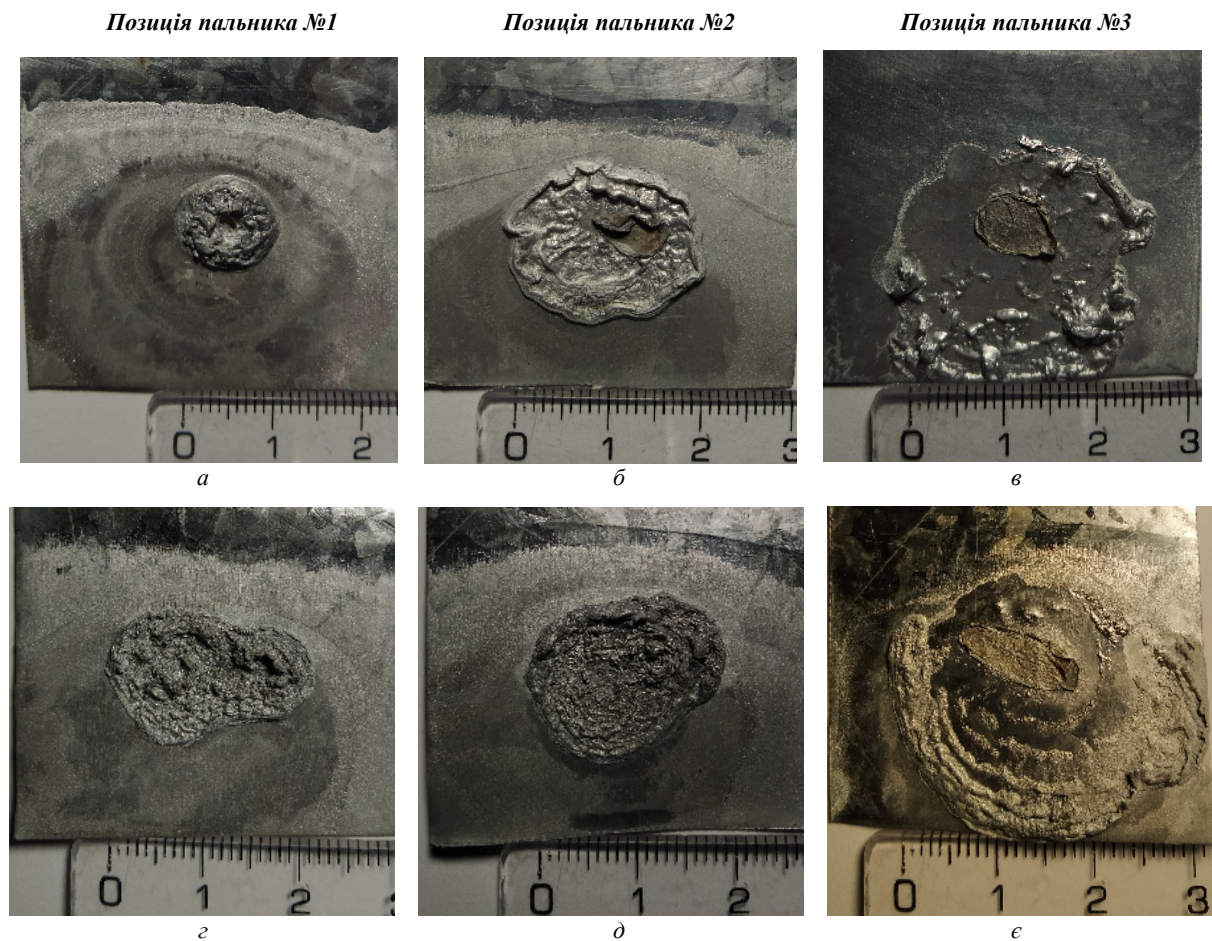


Рис. 3. Навіски алюмінієвих припоїв AlSi5 (а, б, в) та AlSi12 (з, д, е) після нагріву оцинкованих пластин без флюсу

Кількісна характеристика крайового кута для припою AlSi5 знаходиться в діапазоні 37° – 48° для позицій № 1, та 20° – 25° для позиції № 3. Для припою AlSi12 середнє значення крайового кута у позицій № 1 знаходиться в діапазоні 38° – 54° , а у позиції № 3 18° – 23° .

Послідуючі випробування зразків на згин 90° показали, що для зразків виконаних при позиції пальника № 1 є характерними відшарування металу припою від поверхні пластини (рис. 4 а) та розтріскування по всій поверхні (рис. 4 в). Зразки виконані при позиції пальника № 3 (рис. 4 б, з) мають тріщини лише в граничних ділянках припою.

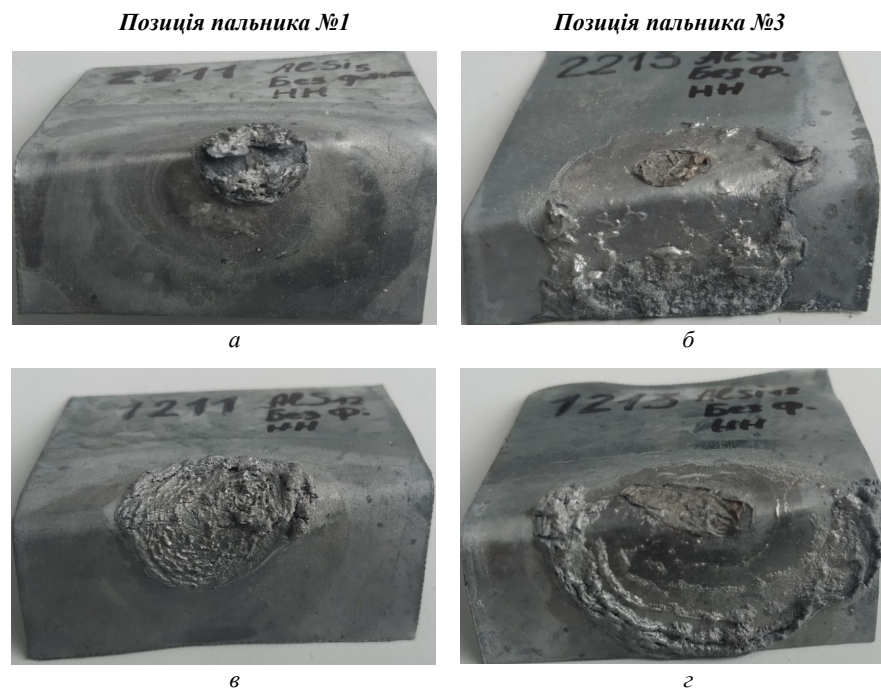


Рис. 4. Вигляд зразків після згину на 90° ($\times 2$): AlSi5 (а, б); AlSi12 (в, з)

Розтікання припою в умовах наявності флюсу

За умов наявності флюсу Al-Flux 726 питома площа розтікання при збільшенні площі нагріву зростає в 1,7 рази для припою AlSi5, і знаходиться в діапазонах для позиції № 1 1,15–1,27 мм²/мг та позиції № 3 1,9–2,26 мм²/мг (рис. 5 а, б, з). В свою чергу, питома площа розтікання для AlSi12 зростає в 1,2 рази і знаходиться в діапазонах для позиції № 1 1,12–1,27 мм²/мг та позиції № 3 1,39–1,64 мм²/мг (рис. 5 з, д, е).

Середнє значення крайового кута припою AlSi5 знаходиться в діапазоні 24°–16° для позиції №1, та 5°–9° для позиції №3. Для припою AlSi12 середнє значення крайового кута у позиції №1 знаходиться в діапазоні 17°–23°, а у позиції №3 2°–5°.

Послідувачі випробування зразків на згин 90° показали, що для зразків при позиції пальника №1 (рис. 6 а, в) є характерним значне відшарування металу припою від основного металу. В свою чергу, зразки виконані за позиції пальника №3 (рис. 6 б, г) мають тріщини лише в місці згину пластину.

Питома площа розтікання

Результати дослідів показали, що в умовах відсутності флюсу, значення питомої площі розтікання для

крайніх позицій пальника № 1 і № 3 суттєво відрізняються і значно зростають при збільшенні площі нагрівання металу пластини. В свою чергу, за умов використання флюсу, значення питомої площі розтікання для крайніх позицій пальника № 1 і № 3 відрізняються в меншій мірі, хоча тенденція до її зростання, при збільшенні площі нагрівання основного металу, також зберігається.

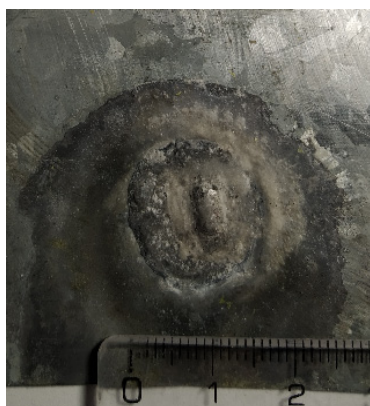
При локальному нагріванні (позиція пальника №1) основного металу, флюс дозволяє досягти кращих показників питомої площі розтікання, ніж без нього. Однак, збільшення площі нагрівання металу основи (позиція пальника № 3) дозволило досягти вищих значень питомої площі розтікання саме в умовах відсутності флюсу.

Краєвий кут змочування

Результати дослідів показали, що зразки виконані за умов використання флюсу мають більш рівномірне розтікання припою і нижчі показники середнього значення крайового кута змочування, ніж в умовах без флюсу.

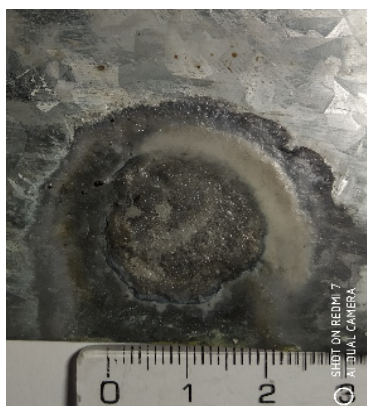
Однак, рівномірність розтікання припою, в умовах відсутності флюсу, значно більше залежить від характеру прикладання тепла, ніж при використанні флюсу.

Позиція пальника №1



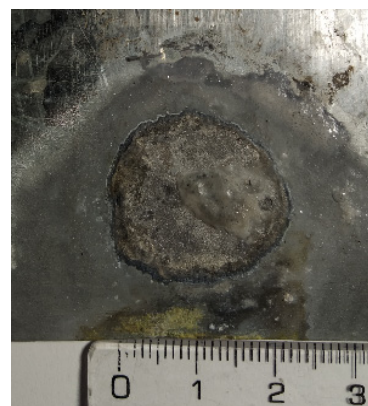
а

Позиція пальника №2

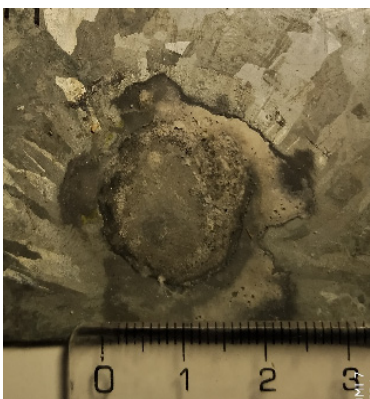


б

Позиція пальника №3



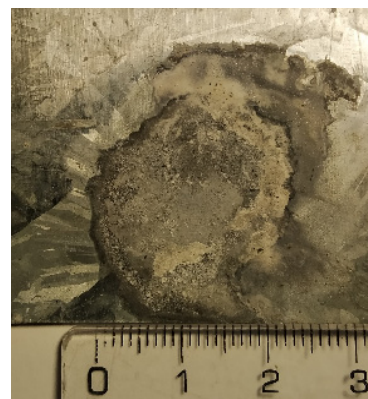
в



г



д



е

Рис. 5 Навіски алюмінієвих припоїв AlSi5 (а, б, в) та AlSi12 (г, д, е) після нагріву оцинкованої пластини газовим полум'ям зі зворотної сторони з використанням флюсу Al-Flux726

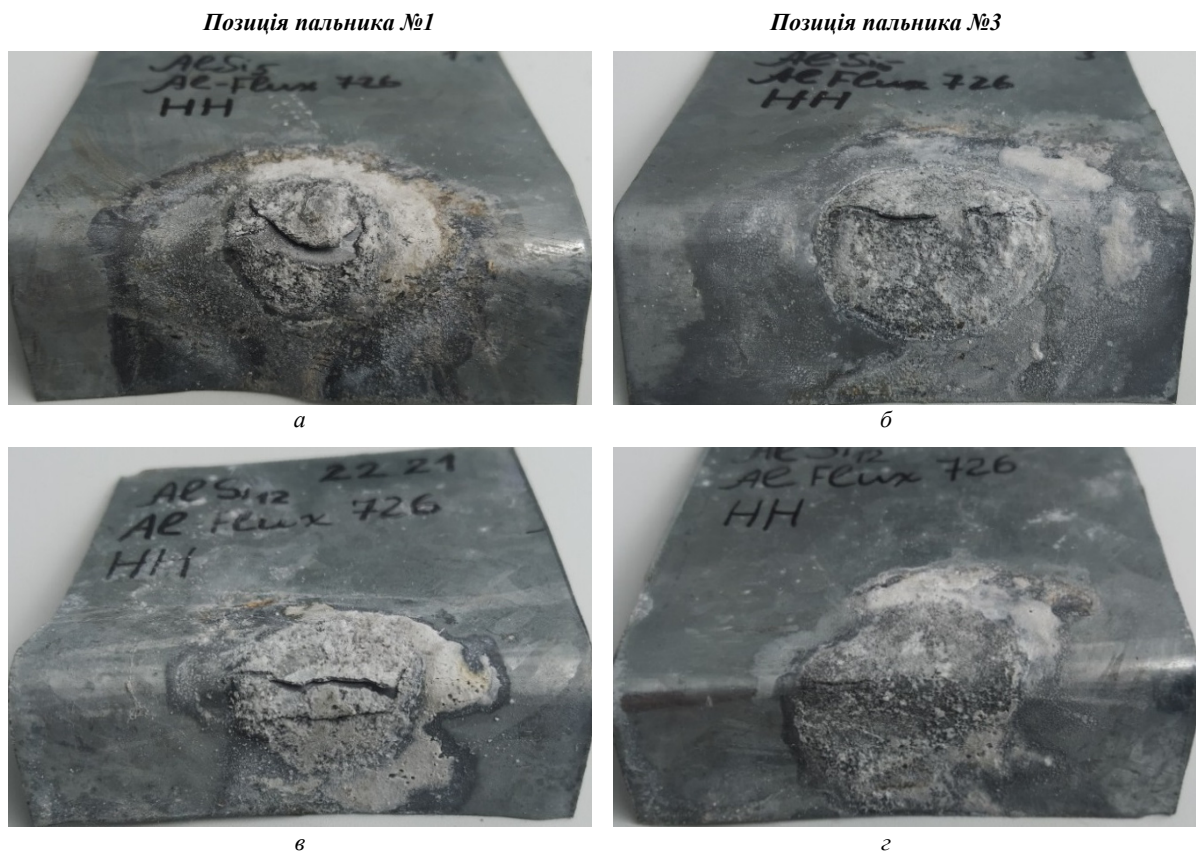


Рис. 6. Вигляд зразків після згину на $90^\circ(\times 2)$: AlSi5 (а, б); AlSi12 (в, г)

Таким чином, було помічено, що при позиції пальника № 3, коли газове полум'я переміщувалось довкола точки розміщення навіски припою з радіусом 10 мм, вже на відстані понад 10 мм від місця початкового розташування навіски припою спостерігаються нерівномірне розподілення припою в зоні нагріву.

Випробування на згин 90°

Випробування на згин 90° показали, що для локального нагріву пластини (позиція пальника № 1) є характерним відшарування припою від металу основи. В свою чергу, при збільшенні площі нагріву (позиція пальника № 3) метал припою не відшаровується, але характеризується появою тріщин. В умовах наявності флюсу тріщини виникають по лінії згину. В умовах відсутності флюсу, розтріскування спостерігається лише в приграничних зонах накопичення металу припою.

Висновки

В даній роботі було встановлено, що досягнути кращих показників питомої площі розтікання алюмінієвих припоїв на поверхні тонколистової оцинкованої

сталі можна без використання флюсу. Однак, в даному випадку рівномірність і площа розтікання в більшій мірі залежать від характеру прикладання тепла, ніж за умов використання флюсу. Також було встановлено, що локальне нагрівання (позиція пальника № 1) тонколистової сталі негативно впливає на зчеплення припою із металом основи, як в умовах використання флюсу, так і без нього, що спричинене частковим руйнуванням шару антикорозійного цинкового покриття на міжфазній границі взаємодії "рідкий припій-антикорозійне покриття- основний метал". В свою чергу, нагрів не лише зони розташування навіски припою, а й металу прилеглого до нього, дозволяє досягти кращих показників розтікання алюмінієвого сплаву, а також зчеплення з тонколистовою сталлю.

Всі паяні з'єднання із тонколистової оцинкованої сталі при газовому паянні алюмінієвими припоями із різною площею нагрівання зі зворотної сторони пластини та наявністю/відсутністю флюсу показали достатній рівень зчеплення припою з поверхнею основного металу.

References

- [1] T. Medgyesi, M. Popescu and C. Opreș, “Problems when joining thin sheets”, *ANNALS of the ORADEA UNIVERSITY*, pp. 53–60, 2011. <https://doi.org/10.15660/AUOFMTE.2011-2.2265>
- [2] V. S. Antoniuk *et al.*, *Pokryttia u prykladobuduvannia: monohrafiia*, Kyiv: Vydavnytstvo “Politekhnika”, 2016.
- [3] L.V. Radionova, and Yu.M. Subbotina, “Preimushchestva i nedostatki sposoba goryachego otsinkovaniya stal'noi polosy. Problemy tsinkovaniya”, *Mashinostroenie: setevoi elektronnyi nauchnyi zhurnal*, 2013, pp. 3–9.
- [4] N.M. Strelenko, V.L. Kovalenko and V.A. Polishchuk, “Elektroduhove CMT ta plazmove paiannia aliuminiievymy prypoiamy tonkolystovoi otsinkovanoi stali”, *Tekhnologicheskie sistemy*, pp. 71–76, 2019. <https://doi.org/10.29010/087.8>
- [5] M. Gatzen *et al.*, “Wetting behaviour of eutectic Al-Si droplets on zinc coated steel substrates”, *Journal of Materials Processing Technology*, No. 214, pp. 123–131, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2013.08.005>
- [6] A.V. Lupachev, “Dugovaya svarka i paika otsinkovannykh uzlov teplotrass i ikh korrozionnaya stoikost'”, *Vestnik polotskogo gosudarstvennogo universiteta*, No. 3, pp. 21–27, 2012.
- [7] M. Gatzen *et al.*, “The role of zinc layer during wetting of aluminium on zinc-coated steel in laser brazing and welding”, *Physics Procedia*, No. 56, pp. 730–739, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.080>
- [8] L. Zhdanov *et al.*, “Peculiarities of thermal dissociation of oxides during submerged arc welding”, *Soldagem & Inspeção*, No. 18, pp. 314–321, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0104-92242013000400003>
- [9] V.A. Polishchuk, V.L. Kovalenko and N.M. Strelenko, “BRAZING OF THIN SHEET GALVANIZED STEEL WITH ALUMINUM SOLDERS”, in *Proc. of the XI Int. Naukovo-praktychnoi Internet konferentsii “Suchasnyi rukh nauky”*, 2020, pp. 426.
- [10] O. Slyvinskyi, Y. Chvertko and S. Bisyk, “Effect of welding heat input on heat-affected zone softening in quenched and tempered armor steels. High Temperature Material Processes”, *An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*, No. 23, 2019, pp. 239–253. <https://doi.org/10.1615/HighTempMatProc.2019031690>
- [11] O. Haievskyi, V. Kvasnytskyi and V. Haievskyi, “Development of a method for optimizing a product quality inspection plan by the risk of non-conformity slippage”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 6, pp. 50–59, 2020. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.209325>

Gas brazing of thin-sheet galvanized steel with aluminum solders

V.A. Polishchuk, N.M. Strelenko, V.L. Kovalenko

Abstract. In this work, the first stage of experimental research was carried out to estimate the main physicochemical processes that determine the qualitative characteristics of a brazed joint made of thin sheet galvanized steel during gas brazing with aluminum solder systems. In particular, an estimation was made of the ability of spreading and wetting of aluminum solders (AlSi5, AlSi12) on the surface of thin sheet galvanized steel (DX56D + Z of 0.4 mm thick and zinc-coated layer of 45–65 microns) at a step-by-step increase in the heating area of the base metal in the presence and absence of flux (Al-Flux 726). The aluminum alloys was heated “not directly,” but through the base metal to maximize the preservation of the anticorrosive zinc coating at the interface between the liquid solder and the base material.

Keywords: thin-sheet galvanized steel, aluminum solders, gas brazing, specific spreading area, wetting angle.

Газовая пайка тонколистовой оцинкованной стали алюминиевыми припоями

В.А. Полищук, Н.М. Стреленко, В.Л. Коваленко

Аннотация. В данной работе был проведен первый этап экспериментальных исследований по оценке основных физико-химических процессов, которые определяют качественные характеристики паяного соединения из тонколистовой оцинкованной стали при газовой пайке системами алюминиевых припоев. В частности, проведена оценка способности растекания и смачивания алюминиевых припоев (AlSi5, AlSi12) на поверхности тонколистовой оцинкованной стали (марки DX56D + Z толщиной 0,4 мм и слоем цинкового покрытия 45–65 мкм) при пошаговом увеличении площади нагрева основного металла в условиях наличия и отсутствия флюса Al-Flux 726. Нагрев навески припоя выполнялся «не напрямую», а через материал образца с обратной стороны пластины для максимального сохранения антикоррозионного цинкового покрытия на межфазной границе взаимодействия жидкого припоя и основного материала.

Ключевые слова: тонколистовая оцинкованная сталь, алюминиевые припои, газовая пайка, удельная площадь растекания, краевой угол смачивания.