

ЗАЛИШКОВІ НАПРУЖЕННЯ В З'ЄДНАННЯХ ТОНКОЛИСТОВОЇ ОЦИНКОВАНОЇ СТАЛІ ПІСЛЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА ПЛАЗМОВОГО ПАЯННЯ

С.В. Максимова¹, І.В. Зволінський¹, В.В. Юрків¹, С.М. Мінаков², В.В. Лисак²

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

²НТУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

При виготовленні тонкостінних конструкцій шляхом зварювання в них з'являються залишкові напруження, які негативно впливають на геометричні параметри і якість отриманих виробів. В роботі представлено результати з оцінки залишкових напружень на зразках-імітаторах з оцинкованої сталі 08пс після МАГ зварювання, плазмового паяння з застосуванням незмінного і модульованого струму. Зниженню залишкових напружень, уникненню розбризкування припою сприяє зменшення тепловкладення при отриманні нероз'ємних з'єднань. Одним з шляхів, що сприяє цьому, є застосування плазмового паяння, яке забезпечує можливість встановлення величини струму незалежно від швидкості подачі присадного матеріалу. Визначення величини залишкових напружень в з'єднаннях проводили магнітопружним методом. В роботі показано, що при плазмовому паянні незмінним струмом розміри зони пластичних деформацій значно менші, ніж при МАГ зварюванні, що пов'язано зі зменшенням кількості введеної в метал теплової енергії. Плазмове паяння незмінним струмом дозволяє зменшити залишкові напруження зі 149, що отримано при зварюванні, до 119 МПа. Подальше зниження залишкових напружень (до 85 МПа) при плазмовому паянні з'єднань з оцинкованої сталі 08пс можливе завдяки застосуванню модульованого струму. Бібліогр. 18, рис. 5.

Ключові слова: МАГ зварювання, плазмове паяння, модульований струм, залишкові напруження, усадкове зусилля, пластична деформація, пружна деформація, погонна енергія, оцинкована сталь, магнітопружний метод

При виготовленні тонкостінних конструкцій, наприклад, кузовів автомобілів, з застосуванням зварювання в них з'являються залишкові напруження, які негативно впливають на геометричні параметри і якість отриманих виробів. Залишкові напруження виникають завжди, причому їх величина в області швів досягає значень, рівних межі плинності. Порушення геометричних параметрів призводить до спотворення форми окремих деталей і потребує застосування трудомістких операцій з припасування в місцях сполучень. Окрім того, спотворення форми елементів конструкції може привести до неприпустимих порушень при експлуатації та викликати перенапруження в окремих перетинах елементів конструкцій. Тому при проектуванні таких конструкцій необхідно вжити заходи щодо запобігання утворенню або зменшенню величини залишкових напружень, що може бути досягнуто відповідним способом зварювання або шляхом застосування альтернативних видів з'єднання [1–3].

Ефективними методами зниження негативно впливу залишкових зварювальних напружень і деформацій в нероз'ємних з'єднаннях є відвід тепла з застосуванням тепловідвідних паст; зменшення тепловкладення в зварювану конструкцію. Для цього використовують висококонцентровані джерела нагріву (електронно-променеве, плазмове, імпульсно-дугове), а також режими зварювання з ма-

лою погонною енергією і високою швидкістю руху джерела тепла (голим електродом по шару флюсу та інші.). За щільністю енергії плазмове джерело тепла знаходиться в проміжному положенні між електродуговими і променевими (електронно-променевим і лазерним) джерелами тепла. Воно дозволяє отримати більш високу щільність теплового потоку на оброблюваному виробі в порівнянні з дуговими джерелами, хоча і поступається променевим за концентрацією енергії, але є значно дешевим і доступнішим за технічним втіленням [4, 5].

При виробництві кузовів автомобілів широко використовують оцинковану сталь. У ряді випадків отримання нероз'ємних з'єднань з даного матеріалу викликає значні труднощі. Цинк починає плавитись при температурі 419,58 °С, а при 907 °С він випаровується. При МАГ зварюванні, коли температура крайок основного матеріалу перевищує температуру кипіння цинку, цинкове покриття вигорає з обох сторін. Для забезпечення корозійної стійкості зруйнований шар цинку необхідно відновлювати, що призводить до додаткових витрат. Попадання цинку в рідкий метал зварювальної ванни призводить до утворення пористості, тріщин, розбризкування, неповного пропалвлення і нестабільного горіння дуги (рис. 1) [6–8].

Плазмове паяння є перспективним методом з'єднання оцинкованої сталі. Переваги плазмово-

Максимова С.В. – <https://orsid.org/0000-0003-0158-5760>, Зволінський І.В. – <https://orsid.org/0000-0003-1442-7980>,

Юрків В.В. – <https://orsid.org/0000-0001-8440-0391>, Мінаков С.Н. – <https://orsid.org/0000-0001-8607-4120>,

Лисак В.В. – <https://orsid.org/0000-0002-6565-2793>

© С.В. Максимова, І.В. Зволінський, В.В. Юрків, С.М. Мінаков, В.В. Лисак, 2020

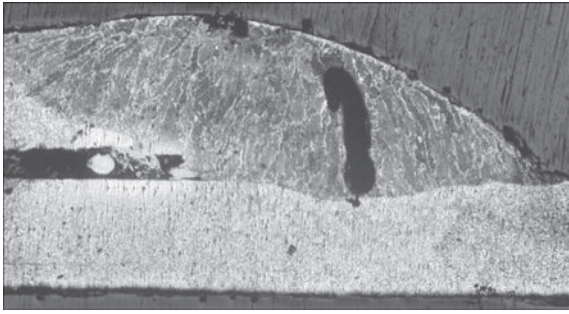


Рис. 1. Макроструктура напускного з'єднання оцинкованої сталі, отриманого шляхом MAG зварювання

го паяння полягають в можливості встановлювати струм незалежно від швидкості подачі присадного матеріалу, що дозволяє зменшити залишкові напруження шляхом зменшення величини струму і отримувати якісні з'єднання зі збереженням цілісності цинкового покриття. Для визначення залишкових напружень застосовують різні методи [5, 9].

Метою даної роботи є визначення величини залишкових напружень, що з'являються в нероз'ємних з'єднаннях оцинкованої сталі 08пс при MAG зварюванні, плазмовому паянні незмінним і модульованим струмом та їх залежність від тепловкладення.

Важливим фактором, що впливає на залишкові напруження і враховує тепловий вплив на одиницю довжини, є погонна енергія q_n [10]. Погонною енергією називається відношення потужності дуги q до швидкості зварювання або паяння:

$$q_n = \frac{q}{V} = \frac{IU_d \eta_n}{V}, \quad (1)$$

де q – потужність дуги, Дж/с; V – швидкість паяння та зварювання, см/с; I – струм паяння та зварювання, А; U_d – напруга дуги, В; η_n – ефективний ККД дуги.

Емпіричним шляхом визначено, що при MAG зварюванні оцинкованої сталі погонна енергія становить 380 Дж/см. Застосування плазмового паяння постійним незмінним струмом дозволило зменшити погонну енергію до 324 Дж/см. Подальше зниження погонної енергії до 273 Дж/см досягається за рахунок використання плазмового паяння модульованим струмом.

Вимірювання залишкових напружень проводили магнітопружним методом з використанням приладу MESTR-411 на зразках-свідках розміром 300×200×0,7 мм.

Градуювання приладу виконували при одноосьовому розтягуванні. Для градуювання використовували плоский зразок, виготовлений з оцинкованої сталі 08пс. Розміри зразка склали 500×50×0,7 мм. Напрямок прокату – уздовж довгої сторони. Зразок закріплювали в затискачах розривної машини Р-10. На зразок встановлювали електромагнітний перетворювач, зорієнтований вздовж напрямку прикладеного навантаження. Зразок на-

вантажували до появи в ньому напружень на рівні 80 % від межі плинності, оскільки подальше навантаження зразка може викликати в ньому пластичні деформації. Діючі напруження визначали як відношення зусилля навантаження до площі поперечного перерізу зразка. В процесі навантаження при кожному збільшенні напружень на 0,1 від межі плинності, фіксували показання приладу.

За результатами градуювання визначали градуювальний коефіцієнт T як середнє прирощення напружень на одиницю показань приладу за співвідношенням

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta A_i}, \quad (2)$$

де ΔA_i – приріст показань приладу, відповідне збільшенню показань напружень $\Delta\sigma_i$; N – число вимірювань при навантаженні.

При використанні будь-яких фізичних методів вимірювання механічних напружень на отримані результати впливає деформування зерен металу в напрямку прокату листа – текстура. Для того, щоб відсторонитися від впливу текстури, необхідно визначити початкове показання приладу для даного типу конструкцій з даної марки сталі.

При визначенні початкового показання приладу електромагнітний перетворювач встановлювали на поверхні листів оцинкованої сталі і орієнтували уздовж прокату. Повертаючи перетворювач навколо власної поздовжньої осі за і проти годинникової стрілки в секторі орієнтовно 30° визначали найбільше показання приладу A_0 . Вимірювання повторювали в 10-15 точках і визначали середнє значення. Це значення є початковим показанням приладу для даного типу конструкцій з даної марки сталі [11, 12].

Для проведення вимірювання залишкових напружень на зварних і паяних зразках електромагнітний перетворювач встановлювали на поверхні зразка вздовж зварного і паяного швів. Вимірювання проводили в середньому перерізі зварного і паяного швів з кроком 5 мм в обидві сторони від шва на зразках-свідках розміром 300×200×0,7 мм в поперечному перерізі на лицьовій і зворотній сторонах з подальшим усередненням отриманих значень (рис. 2).

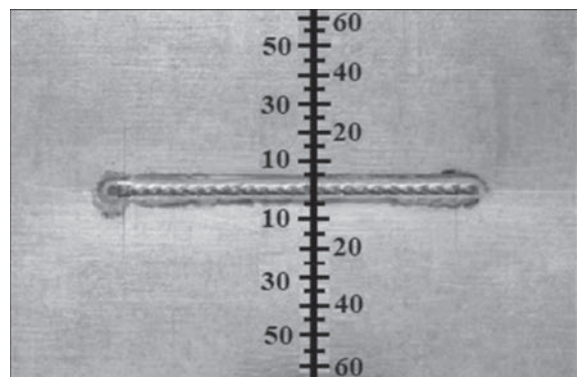


Рис. 2. Зразок оцинкованої сталі з паяним швом

Діючі механічні напруження визначали за співвідношенням

$$\sigma = T(A - A_0), \quad (3)$$

де T – градувальний коефіцієнт; A_0 – початкове показання приладу.

Результати вимірювань залишкових напружень на зразках, що виконані зварюванням плавким електродом (MAG зварювання) і плазмовим паянням представлено на рис. 3.

Як видно з рисунку, характер розподілу залишкових напружень в зварних і паяних зразках ідентичний і відповідає класичному [13, 14]. Так, на зварному зразку в зоні шва мають місце напруження розтягу, максимальна величина яких досягає 149 МПа на осі шва (рис. 3).

Величина залишкових напружень на осі шва трохи менша межі плинності основного металу (175 МПа). З віддаленням від осі шва величина залишкових напружень розтягу плавно знижується. На відстані 10...12 мм від осі з'єднання напруження розтягу стають рівними нулю, потім змінюють знак і переходять в напруження стиску. Напруження стиску спочатку збільшуються, потім зменшуються і вирівнюються.

Аналогічно розподіляються залишкові напруження і в паяних зразках (рис. 3). У даному випадку величина максимальних напружень розтягу на осі з'єднання зменшується до 119 МПа.

Наявність залишкових напружень в з'єднанні може розглядатися як дія усадкового зусилля [13, 15, 16], що викликає спотворення форми (деформацію) зварного і паяного зразків.

Величина такого усадкового зусилля визначається виразом (4) [13, 15]

$$P_{yc} = (|\sigma_p| + |\sigma_{ст.}|) b_n \delta, \quad (4)$$

де σ_p – величина активних залишкових напружень розтягу, МПа; $\sigma_{ст.}$ – величина реактивних залишкових напружень стиску, МПа; b_n – ширина зони пластичних деформацій, м; δ – товщина зварного та паяного зразків, м.

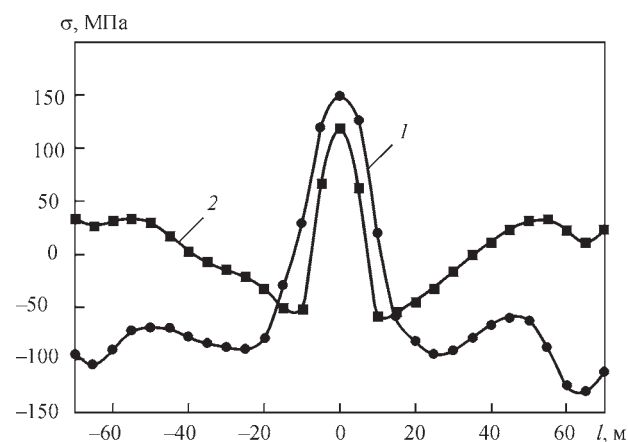


Рис. 3. Розподіл залишкових поздовжніх напружень в середньому перетині паяного зразка в порівнянні зі зварним зразком: 1 – MAG зварювання; 2 – плазмові паяння незмінним струмом

Дійсно, для тонколистових конструкцій, жорсткість яких невелика, наявність такого усадкового зусилля, а, отже, і залишкових напружень, є важливим фактором як з огляду експлуатаційних характеристик конструкції, так і з огляду товарного вигляду.

У зв'язку з викладеним, проаналізуємо кількісні характеристики залишкових напружень в зварних і паяних зразках.

Як видно з результатів експериментів, максимальна величина залишкових активних напружень розтягу зварних і паяних зразків знаходиться на рівні 149 та 119 МПа відповідно. Такий результат експерименту може бути пояснений з позиції механізму утворення залишкових напружень при нерівномірному нагріванні середньої смуги моделі зварного та паяного зразків – пластини з прорізами для загального випадку, коли розміри нагрітої зони менші за розміри самої пластини, тобто $F_{ср.} < F_{кр.}$ (рис. 4) [15].

При нагріванні середньої смуги в ній виникають температурні деформації $e_t = \alpha T$.

Неможливість реалізації середньою смугою виникаючих температурних деформацій через зв'язки середньої смуги з ненагрітими крайніми зонами, викликає в середній смузі пружні деформації скорочення (напруження стиску).

За умовою рівноваги в крайніх смугах виникнуть пружні деформації (напруження) розтягу. При температурі T_1 пружні деформації скорочення середньої смуги досягають свого максимального значення, після чого в середній смузі починають розвиватися пластичні деформації скорочення – $\epsilon_{пл.ср.}$ (рис. 4.).

При подальшому нагріванні пружні деформації середньої смуги залишаються на рівні $-\epsilon_{пл.ср.}$, а починаючи з температури T_1 в середній смузі розвиваються пластичні деформації скорочення.

В інтервалі температур від 500 до 600 °С пружні деформації середньої зони зменшуються до 0. У цей час пластичні деформації середньої смуги різко збільшують темп свого наростання.

На етапі охолодження термодформаційні процеси протікають з протилежними знаками. Разом з тим, як впливає з рис. 4, повної компенсації накопичених при нагріванні пластичних деформацій скорочення не відбувається. В результаті в пластині з прорізами має місце нерівномірний розподіл в поперечному перерізі пластини залишкових пластичних деформацій (в середній смузі вони є, а в крайніх немає), що і є причиною утворення в зварному та паяному з'єднаннях залишкових напружень.

При цьому, якщо метал нагрівався до температури вище 600 °С, величина залишкових напружень розтягу формується на рівні межі плинності. Залежно від співвідношення площ, де виникають залишкові активні напруження розтягу і реактивні напруження стиску, відповідно до умови рівноваги, в реактивній зоні формуються залишкові

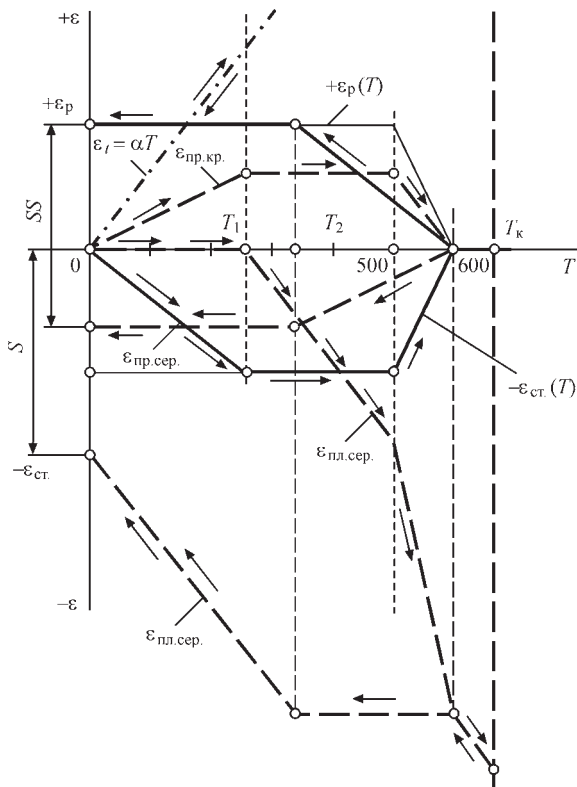


Рис. 4. Схема розвитку деформацій в сталевій пластині з прорізами при $F_{ср} < F_{кр}$ [15]

напруження стиску $-\sigma_{ст.} = \epsilon_{пр.} E$. Враховуючи, що технологія виконання паяних з'єднань передбачає обов'язкове розплавлення присадного металу, тобто нагрів вище $600\text{ }^\circ\text{C}$, величина максимальних напружень розтягу на осі шва для зварних і паяних з'єднань теоретично повинна бути близькою, що підтверджено результатами експериментів (рис. 3). У зоні реактивних напружень стиску, відповідно до механізму їх утворення, формуються реактивні напруження стиску (в крайній зоні пластини). Їх величина визначається умовою рівноваги зусиль в зонах залишкових активних напружень розтягу і реактивних напружень стиску зварного та паяного з'єднань [14]:

$$\sigma_p b_n \delta = -\sigma_{ст.} (h - \delta_n) \delta, \quad (5)$$

$$\sigma_{ст.} = -\frac{\sigma_p b_n \delta}{(h - b_n) \delta}, \quad (6)$$

де h – ширина розглянутого з'єднання.

Як видно з рис. 3, величина залишкових напружень стиску в паяних з'єднаннях менша, ніж в зварних з'єднаннях. Зменшення величини залишкових реактивних напружень стиску, відповідно до виразу (6), можна пояснити зменшенням ширини зони пластичних деформацій.

Очевидно, що таке зменшення величини реактивних і активних напружень призведе до істотного зниження величини усадкового зусилля, а, отже, і до зменшення залишкових деформацій конструкції.

Вивчення точних розмірів ширини зони пластичних деформацій вимагає проведення спеціаль-

них досліджень із залученням специфічних методик досліджень. Тому в даній роботі обмежилися якісною оцінкою порівняння значень ширини зони пластичних деформацій в зварних і паяних зразках. У літературі викладені різні підходи визначення ширини зони пластичних деформацій [13, 17].

Аналізуючи розміри зони пластичних деформацій (рис. 3) із застосуванням методики [17] бачимо, що в паяних з'єднаннях ця зона не перевищує $30 \dots 35\text{ мм}$, в той час як ширина зони пластичних деформацій в зварних з'єднаннях сягає $50 \dots 60\text{ мм}$. Таке суттєве зменшення ширини зони пластичних деформацій в паяних з'єднаннях пояснюється, перш за все, меншою кількістю введеної в метал теплової енергії. Окрім того, при плазмовому паянні теплота в метал вводиться за допомогою висококонцентрованого джерела, що також сприяє зменшенню ширини нагрітих зон і призводить до зменшення ширини зони пластичних деформацій.

Істотним фактором зменшення тепловкладення в з'єднання при плазмовому паянні є також введення теплоти з використанням модульованого струму [18]. Підтвердженням цьому можуть бути результати вимірів залишкових напружень в паяних зразках, що виконані з застосуванням незмінного і модульованого струму (рис. 5).

Як видно з рис. 5, величина максимальних напружень, що розтягують на осі шва при використанні модульованого струму, зменшується до 85 МПа , в порівнянні з паянням на постійному незмінному струмі. Таке зменшення напружень розтягу в зразку пояснюється тим, що зразок паяли на режимі з модульованим струмом при максимальному значенні шпаруватості процесу, тобто при мінімальному значенні часу імпульсу ($\tau_i = 0,05\text{ с}$), який викликає істотне зменшення тепловкладення в основний метал. Таким чином, підтверджено положення про те, що введення теплоти у виріб з використанням модульованого струму забезпечує зниження залишкових напружень.

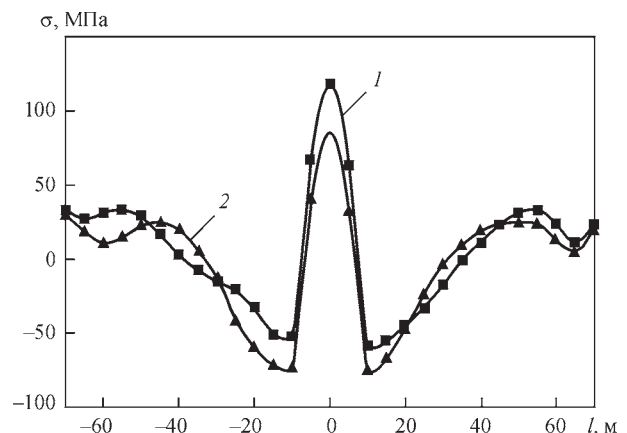


Рис. 5. Розподіл залишкових поздовжніх напружень в паяних зразках, що отримані з використанням плазмового нагріву із застосуванням постійного незмінного і модульованого струму: 1 – плазмове паяння незмінним струмом; 2 – плазмове паяння модульованим струмом

Висновки

1. В результаті проведених досліджень шляхом застосування магнітопружного методу встановлено, що при MAG зварюванні оцинкованої сталі виникають залишкові напруження, величина яких становить 149 МПа при погонній енергії 380 Дж/см.

Застосування плазмового паяння незмінним струмом дозволяє зменшити погонну енергію до 324 Дж/см і залишкові напруження до 119 МПа.

Подальше зменшення погонної енергії до 273 Дж/см і, як, наслідок зменшення залишкових напружень до 85 МПа, забезпечує використання модульованого струму при плазмовому паянні оцинкованої сталі 08пс.

Список літератури/References

1. Козлов С.В., Кириллов Ю.В. (2009) Применение плазменной сварки как способа снижения остаточных деформаций и напряжений в сварных стальных конструкциях. *Збірник наукових праць Українського науково-дослідного та проектного інституту сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського*, **3**, 102–107.
- Kozlov, S.V., Kirillov, Yu.V. (2009) Application of plasma welding as the method for lowering of residual strains and stresses in steel welded structures. *In: Collect. of V.M. Shimano-vsky Ukrniiproektstalkonstruksiya*, **3**, 102–107 [in Russian].
2. Монфаред А.Х., Пантелеенко А.Ф. (2011) Математическое моделирование сварочных деформаций в тонких пластинах. *Вестник Белорусского национального технического университета*, **5**, 19–25.
- Monfared, A.Kh., Panteleenko, A.F. (2011) Mathematical modeling of welding deformations in thin plates. *Vestnik BNTU*, **5**, 19–25 [in Russian].
3. William N. (2008) *Sringer Handbook of Experimental Solid Mechanics*. Reference work. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-30877-7>
4. Paton В.Е. (2000) Plasma technology at the turn of the century. *The Paton Welding J.*, **12**, 3–5.
5. Ситников Б.В (2012) Влияние параметров режима импульсно-дуговой сварки на распределение остаточных напряжений в соединениях АМг6. *Энергосбережение, энергетика, энергоаудит*, **8**, 102, 69–74.
- Sitnikov, B.V. (2012) Influence of pulsed-arc welding parameters on distribution of residual stresses in AMg6 joints. *Energoberezhenie, Energetika, Energoaudit*, **8**, 102, 69–74 [in Russian].
6. Robert K. (2005) Plasma brazing – Advantages and disadvantages compared with MIG brazing. *Welding and Cutting*, **4**, **3**, 147–149.

7. Pavol Sejc (2010) MAG zvaranie pozinkovanykh plechov v ochrannom plyne CO₂ a Ar+18%CO₂. *Zvarac*, VII, **3**, 8–13.
8. Pavol Sejc (2002) Oblukove zvaranie MAG ocelovych plechov pokrytych protikoroznym naterrom na baze zinku. *Zvaranie-Svarovani*. **3**, **4**, 71–73.
9. Shonin V.A., Mashin V.S., Khaskin V.Yu., Nedej T.N. (2006) Residual stresses in butt joints of thin sheets from alloy AMg6 after arc and laser-arc welding. *The Paton Welding J.*, **9**, 20–24.
10. Makhnenko O.V, Muzhichenko A.F., Prudky I.I. (2013) Mathematical modelling of stress-strain state of welded panels from titanium alloy VT20. *Ibid*, **2**, 13–19.
11. Мехонцев Ю.Я. (1986) Датчик магнитной анизотропии. А.с. 111331 СССР, МКИ2 G01N27/86.
- Methontsev, Yu.Ya. (1986) *Sensor of magnetic anisotropy*. USSR author’s cert. Int. Cl. 2 G01N27/86 [in Russian].
12. Мінаков С.М. (2012) *Визначення напруженого стану зварних магістральних трубопроводів магнітоанізотропним методом*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ.
- Minakov, S.M. (2012) *Determination of state of main pipelines by magnetoanisotropic method*. In: Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree. Kyiv [in Russian].
13. Трочун И.П.(1964) *Внутренние усилия и деформации при сварке*. Москва, Mashgiz.
- Trochun, I.P. (1964) *Internal forces and deformations in welding*. Moscow, Mashgiz [in Russian].
14. Винокуров В.А. (1968) *Сварочные деформации и напряжения*. Москва, Машиностроение.
- Vinokurov, V.A. (1968) *Welding strains and stresses*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
15. Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М. (1987) *Напряжения и деформации при сварке*. Киев, Вища школа.
- Kasatkin, B.S., Prokhorenko, O.V., Chertov, I.M. (1987) *Strains and stresses in welding*. Kiev, Vyshcha Shkola [in Russian].
16. Прохоренко В.М., Прохоренко О.В. (2009) *Напруження та деформації у зварних з’єднаннях і конструкціях*. Навчальний посібник. Київ, Нац. техн. ун-т.
- Prokhorenko, V.M., Prokhorenko, O.M. (2009) *Stresses and strains in welded joints and structures: Manual*. Kyiv, NTU [in Ukrainian].
17. Николаев Г.А., Куркин С.А., Винокуров В.А. (1982) *Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций*. Кн. I. Уч. пос. для вузов. Москва, Высшая школа.
- Nikolaev, G.A., Kurkin, S.A., Vinokurov, V.A. (1982) *Welded structures. Strength of welded joints and deformations of structures: Manual*. Book 1. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
18. Nurguzhin M., Danenova G., Akhmetzhanov T. (2019) *Computer Modeling of Residual Stresses and Strains at Arc Welding by Modulated Current. Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering*. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_265

RESIDUAL STRESSES IN THIN-SHEET ZINC-COATED STEEL JOINTS AFTER ARC WELDING AND PLASMA BRAZING

S.V. Maksymova¹, I.V. Zvolinsky¹, V.V. Yurkiv¹, S.N. Minakov², V.V. Lysak²

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

²NTU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine

In the manufacture of thin-walled structures by welding, residual stresses appear in them, which negatively affect the geometric parameters and quality of the obtained products. The paper presents the results of evaluation of residual stresses on simulator-samples made from galvanized steel 08ps (semi-killed) after MAG welding, and plasma brazing using constant and modulated current. Lowering of residual stresses and avoidance of brazing filler metal spattering are promoted by reduction of heat input, when making permanent joints. One of the ways contributing to it, is application of plasma brazing, which provides the ability of setting the current, independently of filler material feed rate. Determination of the magnitude of residual stresses in the joints was performed by the magnetoelastic method. It is shown that in plasma brazing with constant current the dimensions of plastic deformation zone are much smaller than in MAG welding, which is associated with a decrease in the amount of thermal energy applied to the metal. Plasma brazing with constant current allows lowering residual stresses from 149, which is obtained by welding, to 119 MPa. Further decrease of residual stresses (to 85 MPa) during plasma brazing of joints of galvanized steel 08ps is possible due to the use of modulated current. 18 Ref, 5 Fig..

Keywords: MAG welding, plasma brazing, modulated current, residual stresses, shrinkage force, plastic deformation, elastic deformation, heat input, zinc-coated steel, magnetoelastic method

Надійшла до редакції 07.08.2020