
НОВІ МЕТОДИ ТА ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЛИТТЯ

<https://doi.org/10.15407/plit2022.02.016>

УДК 533.951.8: 621.74.046

В. П. Лихошва, д-р техн. наук, проф., зав. відділу; e-mail: plazer_v@ukr.net

Р. С. Надашкевич, наук. співроб.; e-mail: plazer_v@ukr.net

О. П. Шатрава, канд. техн. наук, пров. наук. співроб.;

e-mail: shatrava@ptima.kiev.ua

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

ПІДВИЩЕННЯ СТАЛОСТІ ПРОЦЕСУ ПОВЕРХНЕВОГО НАГРІВУ ПЛАСТИНИ РУХОМИМ ПЛАЗМОВИМ ДЖЕРЕЛОМ

Дослідження, які проведено в цій роботі, спрямовані на оптимізацію технологічних схем та режимів нагрівання металевих пластин концентрованим джерелом енергії для отримання пласкої рідкої ванни розплаву в умовах безперервної дії джерела нагріву. А також пошуку методів стабілізації процесу нагрівання, рівномірності його параметрів з метою використання локальної термічної обробки у новому гібридному способі виробництва біметалічних та багатошарових виробів в умовах безперервного технологічного процесу. В роботі представлено результати досліджень параметрів та умов застосування методу поверхневого нагріву металевієї пластини за допомогою плазми. Досліджено критичні та максимально допустимі режими нагрівання поверхні в окислювальному середовищі, що задовольняють умови рідкофазного з'єднання при подальшому заливанні рідкого розплаву. Визначено глибини проплавлення металевих поверхонь за різних умов обробки. Розроблено різні схеми реалізації даного методу локального нагріву, представлено результати експериментальних досліджень та визначено найбільш раціональний спосіб рівномірного та сталого поверхневого нагріву металевієї пластини. Визначено також оптимальні параметри нагріву, що підвищують сталість та рівномірність цього процесу, а також забезпечують умови створення поверхневої мікрометалургійної ванни розплаву достатніх розмірів та часу її існування – як необхідних передумов для протікання всього безперервного технологічного процесу виробництва біметалічних та багатошарових виробів. Для збільшення швидкості обробки, а також для розширення зони впливу джерела нагріву та підвищення продуктивності технологічного процесу в цілому – у роботі запропоновано метод скануючого нагріву, що полягає в накладанні коливальних плазмотрона з плоскопаралельним переміщенням пластини, що оброблюється. У роботі показано, що плоскопаралельне сканування дає можливість підвищити сталість процесу горіння плазмової дуги, а також отримувати зону нагрівання різної ширини, що збільшує номенклатуру виробів, які отримуються для запропонованого вище нового методу створення біметалічних та багатошарових виробів.

Ключові слова: мікрометалургійна ванна розплаву, концентровані джерела енергії, плазмове джерело нагріву, плазмова дуга прямої дії, рідкий метал, біметалеві пласкі вироби.

Вступ

Підвищення якості та ефективності термічного впливу на робочі поверхні деталей пов'язане із застосуванням концентрованих джерел енергії, таких як: газополум'яні, електродугові, плазмові, електронно-променеві, лазерні, іонні тощо. Однак із усіх перерахованих способів локального енергетичного впливу найбільш продуктивним та економічним є плазмовий метод обробки. Він характеризується меншою вартістю, доступністю технологічного обладнання та досить великими розмірами зони термічного впливу [1].

Висока продуктивність і концентрація обробки плазмовим джерелом нагріву, можливість регулювання теплових процесів отримання шарів термічного впливу або оплавлення товщиною від десятків мікрометрів до декількох міліметрів, у тому числі на обмежених ділянках деталей, обумовлює високу універсальність плазмової обробки, що дозволяє отримувати різні металовироби з широким спектром властивостей [2–4].

До недоліків методу поверхневої обробки слід віднести відносно низьку стабільність розмірів мікрометалургійної ванни, що формується, наявність залишкових термічних напруг, які призводять до зниження тріщиностійкості, хімічної неоднорідності, зниження якості виробів і т. ін. [5–8].

Дослідження в цій роботі спрямовані на оптимізацію технологічних схем та режимів плазмового нагрівання металевих пластин для отримання плоскої рідкої ванни розплаву в умовах безперервної дії. А також пошуку методів стабілізації процесу нагрівання, рівномірності його параметрів з метою використання плазмової обробки у новому гібридному способі виробництва біметалічних та багатошарових виробів в умовах безперервного технологічного процесу [9–11].

Матеріали та методи

Принципова схема (рис. 1) отримання біметалевих плоских виробів заснована на методі рідкофазного з'єднання двох металевих матеріалів (твердої пластини, що нагрівається, і рідкого розплаву, що заливається). У процесі реалізації даного методу обробки, на поверхні пластини 3, формується пласка рідка ванна 5, при впливі струменя плазми 4, сформованої в плазмотроні 1. Рідкий розплав 2 подається на поверхню заготовки і попадає в мікрометалургійну ванну 5, де відбувається з'єднання рідкого металу з матеріалом основи.

Для розробки раціональної схеми технологічного процесу, вибору та оптимізації режимів плазмового нагріву, проведено експериментальні дослідження формування плоскої рідкометалевої ванни розплаву в металевій пластині під впливом плазмового струменя.

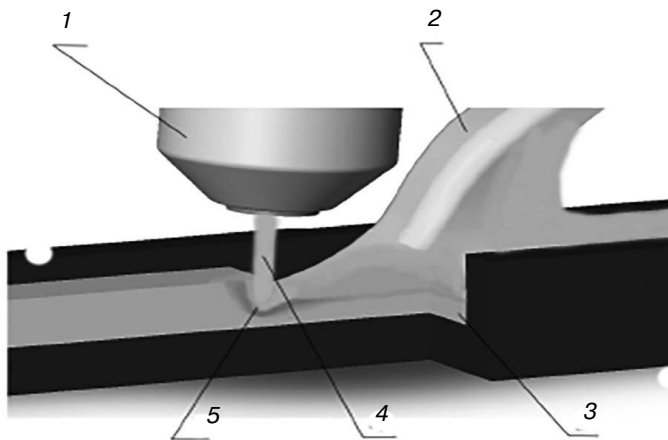


Рис. 1. Принципова схема процесу формування мікрометалургійної ванни та рідкофазного з'єднання розплавленого металу з поверхнею пластини, що нагріта плазмовим струменем: 1 – плазмотрон, 2 – рідкий розплав, 3 – сталева пластина, 4 – струмінь плазми, 5 – мікрометалургійна ванна розплаву

У якості плазмової установки в роботі використано апарат Київ-4М з плазмотроном ВПР-15, в якому формується плазмовий струмінь прямої дії. Даний апарат створено для різання металу, втім вибір даного обладнання обумовлено тим, що енергія, яка виділяється на виході з цього плазмотрона в умовах окислення поверхні металу дозволяє отримати високі швидкості нагріву для переходу металу в рідкий стан. Плазмовий апарат має такі енергетичні характеристики: номінальний робочий струм 300, 200 і 100 А робоча напруга в межах 130–200 В, витрата плазмоутворюючого газу в робочому режимі $2,5-3 \text{ м}^3/\text{хв}$ при тиску в мережі 0,5–0,6 МПа. Апарат дозволяє отримувати високоентальпійний плазмовий струмінь. Плазмоутворюючий газ, що застосовується в даному апараті – повітря, як найбільш дешевий і ефективний.

Результати і обговорення

З метою отримання стабільної форми та розмірів мікрометалургійної ванни, яка утворюється піддією плазмового струменя, досліджено режими енергетичного впливу на поверхню пластини, розміри зон плазмового впливу, а також проаналізовано декілька технологічних схем, запропонованих у процесі досліджень.

У роботі показано дві основні схеми переміщення плазмотрона щодо оброблюваної поверхні: маятниковий та плоскопаралельний спосіб сканування для отримання ширшої зони поверхневого нагріву металевієї пластини.

Схема поперечного сканування маятниковим способом (рис. 2) з позовжнім переміщенням вздовж поверхні пластини передбачає жорстке кріплення плазмотрона 3 на маятниковому важелі 2, що коливається. Коливання важеля з плазмотроном здійснюється генератором коливань 1 з можливістю варіацій. Шток генератора коливань шарнірно з'єднаний з маятниковим важелем 2. Також у цій схемі передбачено зміну та фіксацію відстані від плазмотрона до поверхні, що обробляється.

До переваг даної схеми можна віднести простоту конструкції і малі витрати електроенергії для створення маятникового руху.

Однак, внаслідок нерівномірного розподілу тепла, маятниковий рух призводить до значних заглиблень по краях зони підпалвлення (рис. 3), як порівняти з загальною зоною поверхневого нагрівання пластини. Це зумовлено наявністю зупинок

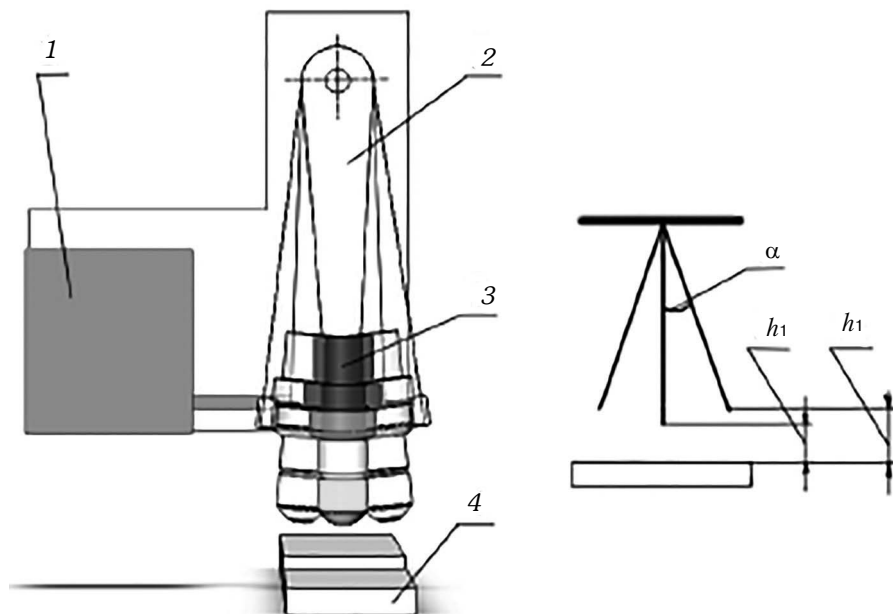


Рис. 2. Схема поперечного сканування маятниковим методом: 1 – генератор коливань, 2 – маятниковий важіль, 3 – плазмотрон, 4 – металева пластини, α – кут відхилення від вертикальної осі, h_1 , h_2 – відстань від заготовки до зрізу сопла плазмотрона

плазмотрону в крайніх точках для зміни напрямку маятникового руху, а також при створенні більшої амплітуди коливань плазмотрону. Дуга плазми від зрізу сопла до заготовки проходить по найкоротшій траєкторії, внаслідок чого при занадто великій амплітуді (кут відхилення плазмотрона від вертикальної осі) плазмотрон здійснює рух до крайньої точки (зміни напрямку руху), при цьому дуга плазми залишається на місці, передаючи надлишкове тепло оброблюваній ділянці поверхні пластины. До того ж в таких умовах відбувається прискорене руйнування сопла плазмотрону. Тобто в даному випадку, в таких умовах, амплітуда зміщення плазмотрона не повинна перевищувати $12-15^\circ$ від вертикальної осі коливань. А це, в свою чергу, накладає обмеження на максимальну ширину зони поверхневого нагріву металевої пластины, використовуючи даний метод маятничого сканування плазмотрона.

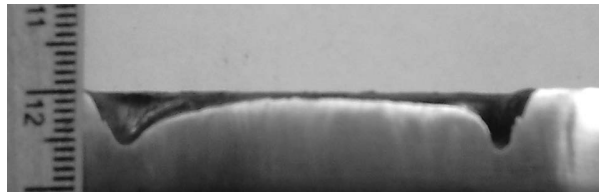


Рис. 3. Поперечний переріз оплавленої поверхні металевої пластины при нагріві рухомим плазмотроном із скануванням маятничим способом

На рис. 4 представлено схему поперечного плоскопаралельного сканування з поступальним рухом вздовж поверхні заготовки.

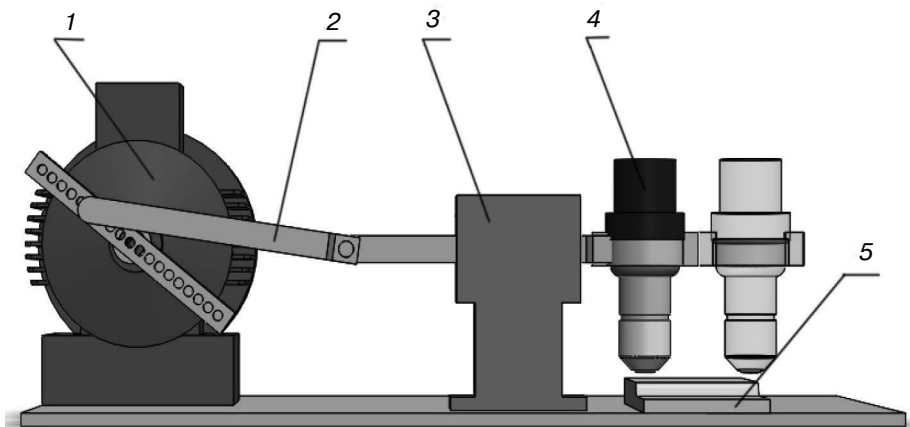


Рис. 4. Схема поперечного плоскопаралельного сканування: 1 – асинхронний двигун, 2 – важільний механізм для плоскопаралельного руху, 3 – направляюча стійка з підшипниками, 4 – плазмотрон, 5 – металева пластина

Поворотно-поступальне плоскопаралельне переміщення плазмотрона 4 здійснюється за рахунок рухомого важеля 2, закріпленого в стійці з підшипниками 3 і з'єднаного з асинхронним двигуном 1. Швидкість обертання двигуна задається за допомогою перетворювача частоти CFM 210. Відмінною особливістю розробленої конструкції є те, що торець сопла переміщається паралельно поверхні заготовки, забезпечуючи при цьому більш рівномірне нагрівання по ширині пластины, порівнюючи з установкою маятничого переміщення плазмотрона.

Внаслідок плазмової обробки з плоскопаралельним скануванням на поверхні металевої пластины утворюється досить рівномірна оплавлена зона розплаву глибиною 3–4 мм та шириною 35–40 мм (рис. 5).

Для визначення критичних та максимально допустимих режимів нагрівання поверхні в окислювальному середовищі, що задовольняють умови рідкофазного з'єднання при подальшому заливанні рідкого розплаву, визначено глибини проплавлення металевих поверхонь за різних умов і параметрів обробки.

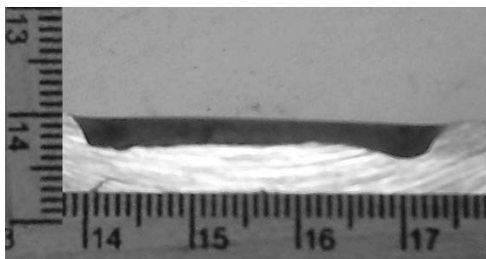


Рис. 5. Поперечний переріз оплавленої поверхні металевої пластини при нагріві рухомим плазмотроном із скануванням плоскопаралельним способом

Для поверхневого нагрівання пластини без глибокого проплавлення доцільно використовувати великі швидкості переміщення плазмотрона. З результатів визначення глибини проплавлення поверхні металевої пластини товщиною 8 мм (рис. 6) плазмою прямої дії при силі струму 100 та 200 А видно, що швидкості переміщення плазмотрона в діапазоні 0,05–0,055 м/с при $I = 100$ А та 0,16–0,17 м/с при $I = 200$ А, дозволяють досягти сталості процесу поверхневого нагріву металевої пластини. При цих швидкостях немає занурення дуги плазми вглиб металу при тривалому впливі.

А при менших швидкостях руху відбувається накопичення тепла в пластині, і дуга плазми занурюється в метал. Геометричні параметри одержаної зони підплавлення: глибина до 0,1 мм, ширина 2 мм. Досягнення аналогічних параметрів підплавлення поверхні заготовки при $I = 300$ А можливе при швидкостях понад 0,27 м/с.

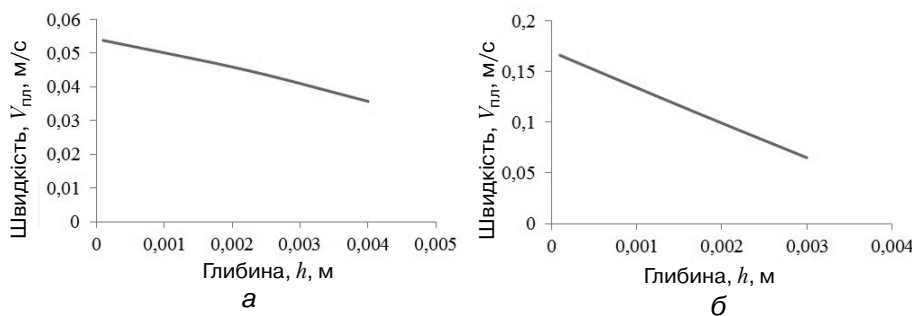


Рис. 6. Величина глибин проплавлення металевої підкладки залежно від значень швидкості переміщення плазмового струменю по поверхні пластини, $V_{пл}$ – швидкість переміщення плазмотрона, h – глибина проплавлення сталевієї пластини при: а – силі струму $I = 100$ А, б – силі струму $I = 200$ А

Для визначення розмірів зони плазмового впливу проведено експериментальні дослідження та отримано результати (рис. 7), які дають можливість визначити залежність форми та макроструктури зони обробки від величини амплітуди та частоти коливань, а також поступальної швидкості переміщення плазмотрона.

З отриманих результатів (рис. 7) видно, що при коливанні частотою в 2 Гц і постійній швидкості поступального руху пластини, спостерігається синусоїдальний слід розплавленого металу (рис. 7, а), тобто відсутня суцільна рідка ванна, що не може відповідати технологічним вимогам процесу обробки. Зі збільшенням частоти коливання до 3,5 Гц (рис. 7, б) неоплавлена зона зменшується, проте недостатньо. Подальше збільшення частоти коливання до 5 Гц (рис. 7, в) формує зону оплавлення по всій ділянці, але з вираженими зонами нерівномірного впливу. При частоті коливань 7 Гц (рис. 7, г) зона проплавлення на металевій пластині під дією плазмового струменю виходить рівномірною по всій ділянці обробки, про що свідчить рівна поверхня без виражених борозен після плазмового впливу. Даний режим обробки в цілому відповідає вимогам стосовно рівномірності зони впливу, сталості процесу нагріву та геометричних параметрів рідкої ванни, що утворюється під дією плазмового струменя на металевій пластині.

Таким чином, при коливальному переміщенні плазмотрона з частотами 5–7 Гц і швидкостях його поступального руху 0,01–0,035 м/с можливо реалізувати процес отримання рівномірної розплавленої поверхні, підготовленої для заливки металевого розплаву на плоскій сталевій пластині.

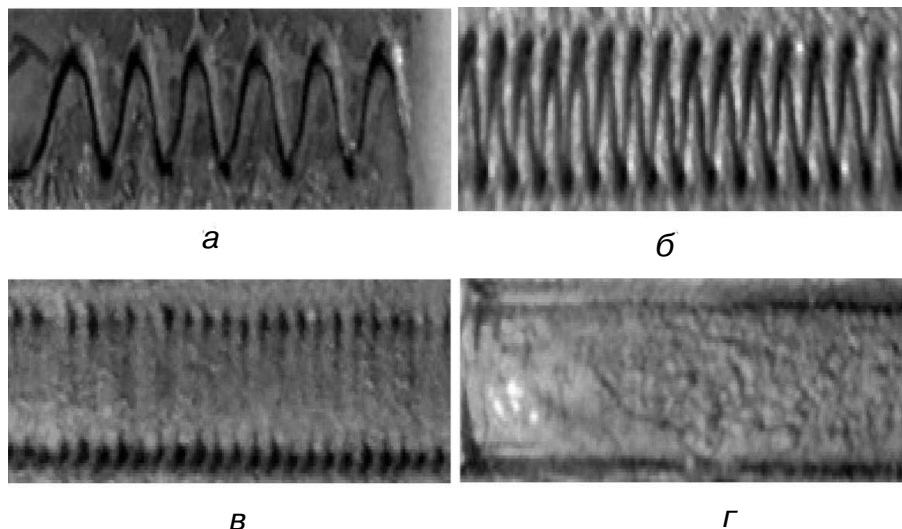


Рис. 7. Стан поверхні металевої пластини після обробки плазмою прямої дії при різних параметрах коливачів і поступальній швидкості переміщення плазмотрона; частота коливачів плазмотрона: а – 2 Гц, б – 3,5 Гц, в – 5 Гц, г – 7 Гц

Висновки

- Швидкості переміщення плазмотрона в діапазоні 0,05–0,055 м/с при $I = 100$ А і 0,16–0,17 м/с при $I = 200$ А, дозволяють досягти задовільних параметрів зони обробки та сталості процесу поверхневого нагрівання металевої пластини в даних умовах.
- При коливальному переміщенні плазмотрона з частотами 5–7 Гц та швидкостях його поступального руху 0,01–0,035 м/с можливо реалізувати процес рівномірного формоутворення мікрометалургійної ванни розплаву для рідкофазного з'єднання металевого розплаву з поверхнею сталевих пластини основи.
- Для збільшення швидкості обробки, а також для розширення зони впливу джерела нагріву та підвищення продуктивності технологічного процесу в цілому – у роботі запропоновано метод скануючого нагріву, що полягає у накладанні коливачів плазмотрона з плоскопаралельним переміщенням пластини, що обробляється.
- Плоскопаралельне сканування дає можливість підвищити сталість процесу горіння плазмової дуги, а також отримувати зону нагрівання різної ширини, що збільшує номенклатуру деталей для обробки запропонованим методом виробництва біметалевих та багатошарових виробів.

Список літератури

- 1 Патон Б. Є. Плазменные технологии на рубеже веков. *Автоматическая сварка*. 2000. № 12. С. 3–5. Отримано з: <https://patonpublishinghouse.com/rus/journals/as/2000/12>
- 2 Бандура А. Н., Гаркуша И. Е., Бирка О. В., Махлай В. А. Модификация конструкционных материалов импульсными плазменными потоками. / 9-ая Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 20–22 сентября 2011 г., Минск, Беларусь. Отримано з: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/045/46045144.pdf
- 3 Лихошва В. П., Надашкевич Р. С. Новый прогрессивный метод получения биметаллических и многослойных изделий. / Тез. доп. на VI міжнар. наук.-практ. конф. «Литье, Металлургия-2017», Запоріжжя, 2017. С. 167–168. Отримано з: https://nmetau.edu.ua/file/lite_metallurgiya_2017.pdf
- 4 Chabak, Yu. G., Fedun, V. I., Pastukhova, T. V., Zurnadzh, V. I., Efremenko, V. G., & Berezhnyj, S. P. (2017). Modification of steel surface by pulsed plasma heating. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*, (4–110), 97–102. Recieved from https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:48093565

- 5 Самотугін, С. С., Гагарін В. А., Мазур В. А. *Оптимизация конструкции плазматрона для поверхностной модификации стальных изделий*. / Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наукових праць ДВНЗ «ПДТУ». Маріуполь, 2017. Вип. 35. С. 104–110. Отримано з: <http://eir.pstu.edu/handle/123456789/16697>
- 6 Астрелін В. Т., Бурдаков А. В., Губер Н. А., Ковеня В. М. *Моделирование движения и нагрева неоднородной плазмы*. Прикладная механика и техническая физика. 2001. т. 42. № 6. с. 3–18. Отримано з: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/b9d/b9d67a9fe0df510b1926cdfed949ab22.pdf>
- 7 Чигаров В. В., Кондрашов К. А., Макаренко Н. А., Грановський Н. А. Нагрев плазменной дугой плоского электрода, аксиально подаваемого в плазматрон. *Автоматическая сварка*, № 8, 2007, с. 23–28. Отримано з: <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/2007/08/00>
- 8 Плаховський С. И., Цегельник Е. В., Гарин В. О. Моделирование течений в катодных узлах плазменного оборудования при описании дуги объемным источником энергии. *Вестник двигателестроения*. 2010. №1. с. 8–15. Отримано з: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-techeniy-v-katodnyh-uzlah-plazmennogo-oborudovaniya-pri-opisanii-dugi-obemnym-istochnikom-energii/viewer>
- 9 Shi, J. J., Liu, D. W. and Kong, M.G. Plasma stability control using dielectric barriers in radio-frequency atmospheric pressure glow discharges. *Applied Physics Letters*. 2006. 89 (8), article 081502, pp. 1–3. Recieved from: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.2338647>
- 10 Kim, Sung Je, Heberlein, Joachin, Lindsay, Jon, Peters, John Methods to evaluate arc stability in plasma arc cutting torches. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 43, 2010, pp. 505202. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/50/505202>
- 11 Duan, Z., Heberlein, J. Arc instabilities in a plasma spray torch. *J Therm Spray Tech* 11, 44–51 (2002). <https://doi.org/10.1361/105996302770348961>

Надійшла 02.06.2022

References

- 1 Paton B. Ye. (2000). Plasmennyye technology na rubezhe vekov. (Plasma technologies at the turn of the century). *Automaticheskaya svarka*. No. 12. P. 3–5. [in Russian].
- 2 Bandura A. N., Garkusha I. E., Birka O. V., Makhlay V. A. *Modification of structural materials by pulsed plasma flows*. / 9-th International conference "Interaction of radiation with a solid", September 20–22, 2011, Minsk, Belarus. [in Russian].
- 3 Likhoshva V. P., Nadashkevich R. S. (2017). *A new progressive method of producing of bimetal and multilayer products*. / Thesis. add. on VI international science-practical. conf. "Casting, Metallurgy-2017", Zaporizhzhya, pp. 167–168. [in Ukrainian].
- 4 Chabak, Yu. G., Fedun, V. I., Pastukhova, T. V., Zurnadzi, V. I., Efremenko, V. G., & Berezhnyj, S. P. (2017). Modification of steel surface by pulsed plasma heating. *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*, (4–110), pp. 97–102.
- 5 Samotugin, S. S., Gagarin V. A., Mazur V. A. (2017). Optimization of the design of a plasmatron for surface modification of steel products. / *Bulletin of the Priazovsky State Technical University: coll. scientific works. DVNZ "PDTU"*. Mariupol, Ed. 35. pp. 104–110. [in Russian].
- 6 Astrelin V. T., Burdakov A. V., Guber N. A., Kovenya V. M. (2001). Modeling of motion and heating of inhomogeneous plasma. *Applied mechanics and technical physics*. Vol. 42. No. 6. p. 3–18. [in Russian].
- 7 Chigarov V. V., Kondrashov K. A., Makarenko, N. A. Granovskiy N. A. (2007). Plasma arc heating of a flat electrode axially fed into the plasmatron. *Automaticheskaya svarka*. No. 8, 2007, p. 23–28. [in Russian].
- 8 Plakhovskiy S. I., Tsegelnik E. V., Garin V. O. (2010). Modeling of flows in cathode nodes of plasma equipment when describing an arc with a volumetric energy source. *Vestnik dvigatelestroyeniya*. No. 1. P. 8–15. [in Russian].
- 9 Shi, J. J., Liu, D. W. and Kong, M.G. (2006). Plasma stability control using dielectric barriers in radio-frequency atmospheric pressure glow discharges. *Applied Physics Letters*. 89 (8), article 081502, pp. 1–3. Recieved from: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.2338647>

- 10 Kim, Sung Je, Heberlein, Joachin, Lindsay, Jon, Peters, John (2010). Methods to evaluate arc stability in plasma arc cutting torches. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 43, 2010, pp. 505202. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/43/50/505202>
- 11 Duan, Z., Heberlein, J. (2002). Arc instabilities in a plasma spray torch. *J Therm Spray Tech* 11, 44–51. <https://doi.org/10.1361/105996302770348961>

Received 02.06.2020

V. P. Likhoshva, *Dr. Sci. (Engin), Professor, Head department;*

e-mail: plazer_v@ukr.net

R. S. Nadashkevich, *Senior Researcher; e-mail: plazer_v@ukr.net*

A. P. Shatrava, *PhD (Engin), leading science researcher;*

e-mail: shatrava@ptima.kiev.ua

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

INCREASING THE STABILITY OF THE PROCESS OF SURFACE HEATING OF A PLATE BY A MOVING PLASMA SOURCE

The research carried out in this work is aimed at optimizing the technological schemes and modes of heating metal plates with a concentrated energy source to obtain a flat liquid bath of melt under conditions of continuous action of the heat source. As well as the search for methods to stabilize the heating process, the uniformity of its parameters in order to use local heat treatment in a new hybrid method of production of bimetallic and multilayer products in a continuous process. The paper presents the results of research on the parameters and conditions of application of the method of surface heating of a metal plate using plasma. The critical and maximum permissible modes of surface heating in an oxidizing medium that satisfy the conditions of the liquid-phase connection during the subsequent pouring of the liquid melt have been studied. The penetration depths of metal surfaces under different processing conditions are determined. Various schemes of realization of this method of local heating are developed, results of experimental researches are presented and the most rational way of uniform and steady surface heating of a metal plate is defined. The optimal heating parameters that increase the stability and uniformity of this process, as well as provide conditions for creating a surface micrometallurgical melt bath of sufficient size and time of its existence – as necessary prerequisites for the entire continuous technological process of bimetallic and multilayer products. To increase the processing speed, as well as to expand the zone of influence of the heat source and increase the productivity of the technological process as a whole - the method of scanning heating is proposed, which consists in superimposing oscillations of the plasmatron with plane-parallel movement of the processed plate. It is shown that plane-parallel scanning makes it possible to increase the stability of the plasma arc combustion process, as well as to obtain a heating zone of different widths, which increases the range of products obtained for the proposed new method of creating bimetallic and multilayer products.

Keywords. *micrometallurgical melt bath, concentrated energy sources, plasma heat source, direct arc plasma, liquid metal, bimetallic flat products.*