

<https://doi.org/10.15407/plit2025.02.032>

УДК 533.951.8: 621.74.046

В.П. Лихошва, докт техн. наук, проф., зав. відділу; e-mail: plazer_v@i.ua; <https://orcid.org/0000-0003-3396-9793>

О.О. Рейнталь, канд. техн. наук, наук. співроб.; e-mail: reintal@i.ua; <https://orcid.org/0009-0003-4595-3948>

О.П. Шатрава, канд. техн. наук, пров. наук. співроб.; e-mail: shatrava@ptima.kiev.ua; <https://orcid.org/0009-0007-2972-1329>

Р.С. Надашкевич, наук. співроб.; e-mail: 58r80ua80@ukr.net

Л.М. Клименко, пров. інж.-технолог; e-mail: lmklymenko@i.ua; <https://orcid.org/0009-0003-8040-205X>

М.І. Голубчик, пров. інж.; e-mail: mgolubchik@ukr.net; <https://orcid.org/0009-0001-2808-2904>

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

ПЛАЗМОВЕ НАГРІВАННЯ РУХОМОЇ ПЛАСТИНИ В ПРОЦЕСІ ФОРМУВАННЯ БІМЕТАЛЕВИХ ЛИСТОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Дослідження, проведені в цій роботі, спрямовані на оптимізацію технологічної схеми та режимів нагрівання сталевих пластин, яка рухається відносно концентрованого джерела енергії для отримання плоскої поверхневої ванни розплаву в умовах безперервної дії джерела нагрівання. Зусилля авторів були спрямовані на створення математичної моделі, яка відображає реальний фізичний процес плазмового локального нагріву поверхні металевих пластин, а також на пошук методів стабілізації процесу нагрівання, рівномірності його параметрів із метою використання плазмового нагрівання в умовах безперервного технологічного процесу. У роботі представлено результати розрахункових досліджень енергетичних параметрів плазмового струменя, відстані плазмотрона до оброблюваної поверхні та часу дії плазмотрона в зоні обробки або швидкості його переміщення. Встановлені критичні та максимально допустимі режими нагрівання поверхні в окислювальному середовищі, що задовольняють умовам одержання біметалевих виробів при подальшому заливанні розплаву на неї другого шару та рідкофазного з'єднання шарів. Визначено найраціональніший спосіб рівномірного та сталого поверхневого нагрівання металевих пластин. При заданих умовах обробки визначено критичні значення температурних, часових та геометричних параметрів існування мікрометалургійної ванни на поверхні пластини під дією плазмового джерела нагріву. Визначено також оптимальні параметри нагріву, що підвищують сталість та рівномірність цього процесу, а також забезпечують умови створення плоскої поверхневої мікрометалургійної ванни розплаву достатніх розмірів та часу її існування як необхідних передумов для протікання всього безперервного технологічного процесу виробництва біметалічних та багатошарових виробів.

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

Вступ

Сучасні тенденції розвитку промислового виробництва характеризують підвищені вимоги до якості та експлуатаційних властивостей виробів. Розвиток техніки спричинює необхідність створення матеріалів, що мають комплекс властивостей, які забезпечують високу міцність, корозійну стійкість, теплопровідність, жароміцність, зносостійкість та ін. Часто окремі метали та сплави не можуть забезпечити необхідну гаму властивостей. Тому широкого застосування набули шаруваті металеві композиції. Такі матеріали можуть бути виготовлені за допомогою з'єднання різнорідних металів у монолітну композицію, що зберігає надійний зв'язок складових при подальшій технологічній обробці та в умовах експлуатації [1–5]. До таких матеріалів належать біметали — шарові матеріали, що складаються з двох або більше металів і сплавів.

Застосування біметалічних виробів або шаруватих композицій набуває все більшого поширення при виробництві та відновленні зношених деталей у хімічній, нафтохімічній, харчовій та загальномашинобудівній промисловості завдяки отриманню унікальних комплексів властивостей: висока міцність, жароміцність, корозійностійкість, електропровідність, теплопровідність, технологічність та ін. характеризують кожен складу композиційних матеріалів. При цьому композиція може складатися не тільки з двох, але і з більшої кількості металів, що мають різні характеристики.

Результати, наведені в попередніх роботах [6–10], показали визначальне значення теплового стану підкладки, інтенсивності процесів її нагрівання, розподілу енергії по поверхні для забезпечення необхідних умов з'єднання шарів у технологічних процесах виробництва біметалевих або шаруватих виробів.

Матеріали й методи

У роботі використані підкладки з конструкційної сталі марки сталь 35, ГОСТ 1050-88 (ДСТУ 7809:2015).

Беручи за основу результати досліджень [11, 12], будемо розглядати формування плазмової дуги непрямої дії у вигляді об'ємного джерела енергії, що діє разом із газовим потоком, який формується на вході плазмотрона. При цьому подача плазмоутворювального газу (повітря) відбувається через порожнистий катод (рис. 1).

Плазмоутворюючий газ подається на коаксіальний вхід плазмотрона під постійним тиском p . Конструкція плазмотрона передбачає закручування газового потоку завдяки наявності тангенційно направлених каналів у середині вхідної частини.

Дуга горить у внутрішньому каналі порожнистого катода. У цій області надавали об'ємне джерело тепла.

При визначенні об'ємного джерела енергії, що імітує електричну дугу, враховували два компоненти нагрівання: 1) за рахунок тепловиділення Джоулевого тепла та 2) випромінювання. Тепловиділення враховували за методикою, описаною в [13], згідно з якою, напруженість електричного поля, що вважається сталою за перерізом дуги, по довжині дуги визначається за формулою:

$$E = \frac{I}{S \int \sigma ds}, \quad (1)$$

де I — струм дуги, (А); σ — електропровідність плазми, (1/(Ом·м)); S — площа поперечного перерізу дуги, (м²).

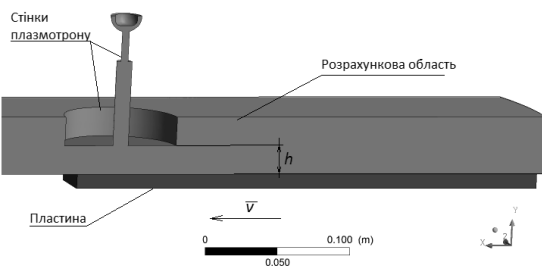


Рис. 1. Схема проведення розрахунків нагрівання металевієї пластини плазмовим струменем (у розрізі площини XOY)

де u_{rad} — питома потужність випромінювання (Вт/м³).

Для задавання об'ємного джерела енергії у вибраній області використовували метод R -функцій, який дозволяє будувати рівняння $\omega(x, y, z)$ для областей Ω довільної геометричної форми, що мають такі властивості:

$$\omega(x, y, z) = \begin{cases} \omega > 0, (x, y, z) \in \Omega \\ \omega > 0, (x, y, z) \in \partial\Omega \\ \omega > 0, (x, y, z) \notin \Omega \end{cases} \quad (3)$$

Для побудови рівняння $\omega(x, y, z)$ потрібно описати область Ω у вигляді виразу, утвореного за допомогою операцій алгебри логіки з подальшою їх заміною відповідними R -функціями [14]. Найбільш поширена R -функція, що використовується для цього, така:

$$\bar{x} \equiv -x;$$

$$x \wedge y = x + y - \sqrt[2]{x^2 + y^2}; \quad (4)$$

$$x \vee y = x + y + \sqrt[2]{x^2 + y^2}.$$

Після побудови даним способом рівняння області Ω інтенсивність об'ємного джерела енергії W , що діє в цій області, можна задати так:

$$W = W \cdot H(H(\omega) - 1/4), \quad (5)$$

де H — функція Гевісайда.

З урахуванням рівнянь (2) та (3) вираз (5) буде мати такий вигляд:

$$W = \begin{cases} \sigma E^2 - u_{rad}, (x, y, z) \in \Omega \\ 0, (x, y, z) \notin \Omega \end{cases} \quad (6)$$

При моделюванні плазми робили такі припущення:

- плазма оптично прозора;
- плазмений потік має постійну форму та рівномірний по довжині, тобто $S = \text{const}$, а $W \neq f(x, y, z)$.
- розсіюванням плазми на виході з плазмотрона нехтували.

У задачі враховували нелінійну залежність електро- та теплохарактеристик повітря від температури (рис. 2–7). Дані були отримані шляхом інтерполяції значень таблиці [15–19].

Початкові та граничні умови.

Тиск плазмоутворювального газу в плазмотроні становить $p = 2$ атм.

Оскільки процес обробки передбачає охолодження плазмотрона, температура на його стінках задавалась як постійна $T_n = 20$ °С. Початкова температура пластини $T_{пл} = 25$ °С.

Із самого початку для забезпечення в області Ω , що зайнята плазмою, певного середнього значення електропровідності, необхідного для початку ітераційного процесу, задавали температуру повітря $T_\Omega = 10000$ °К.

Значення сили току плазми становили $I = 100$ (А).

Розрахунки дії плазмового струменя на сталеву пластину проводили для таких випадків:

- стаціонарна дія;
- пластина рухається відносно плазмотрона.

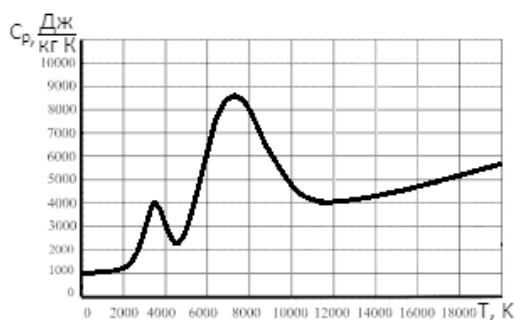


Рис. 2. Залежність питомої теплоємності повітря (C_p) від температури (T)

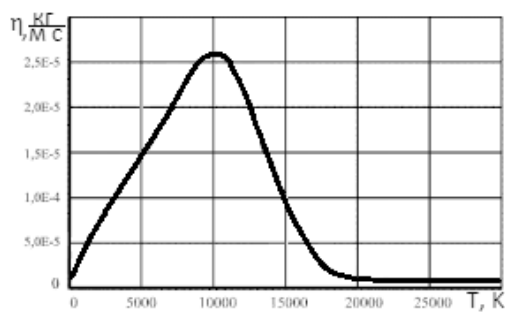


Рис. 3. Залежність динамічної в'язкості повітря (η) від температури (T)

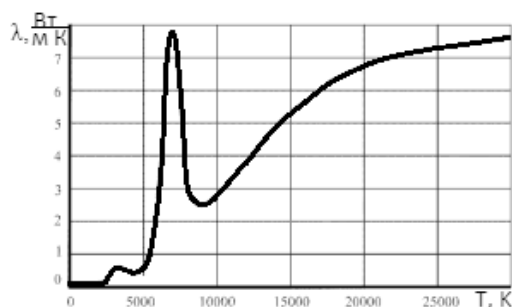


Рис. 4. Залежність теплопровідності повітря (λ) від температури (T)

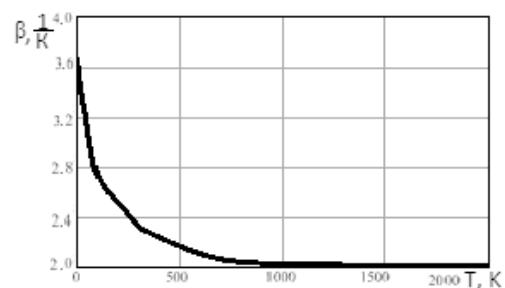


Рис. 5. Залежність коефіцієнту теплового розширення повітря (β) від температури (T)

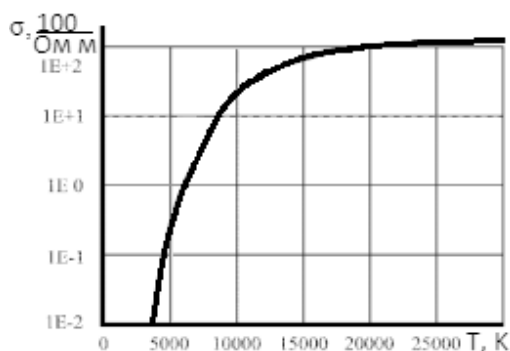


Рис. 6. Залежність електропровідності повітря (σ) від температури (T)

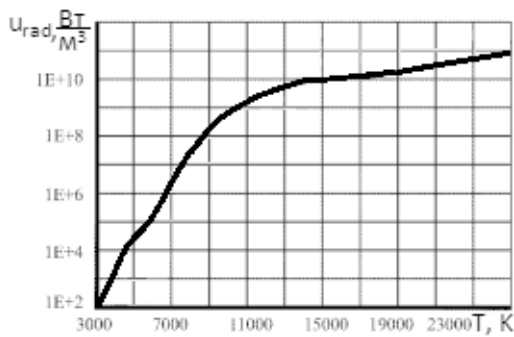


Рис. 7. Залежність питомої потужності випромінювання повітря (U_{rad}) від температури (T)

Під час стаціонарного нагрівання (за схемою нагріву пластини плазмовим рухомих джерелом, рис. 1) плазмотрон встановлювали посередині пластини для уникнення крайових ефектів.

Відстань від плазмотрона до поверхні пластини: $h = 20$ мм;

геометричні параметри пластини: $330 \times 70 \times 10$ мм;

швидкість руху пластини: $v = 0,013$ м/с.

У розрахунках враховували нелінійну залежність теплових характеристик сталі від температури (рис. 8–10) [20, 21].

Результати та обговорення При нагріванні сталеві пластини, яка рухається відносно плазмотрона зі швидкістю 0,013 м/с, плазмовою дугою із силою току 100 А максимальна температура плазми сягає значення $2,45 \cdot 10^4$ К (рис. 11).

Максимальна швидкість плазмового струменя сягає значень у межах 540..580 м/с та має такий розподіл всередині плазмотрона та за його межами (рис. 12).

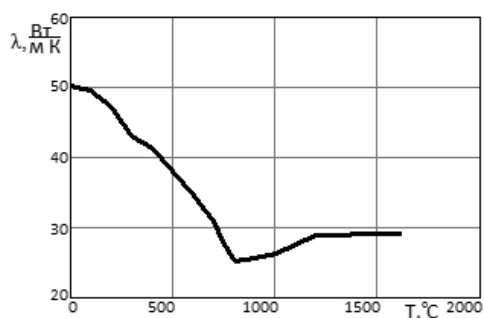


Рис. 8. Залежність теплопровідності сталі 35 (λ) від температури (T)

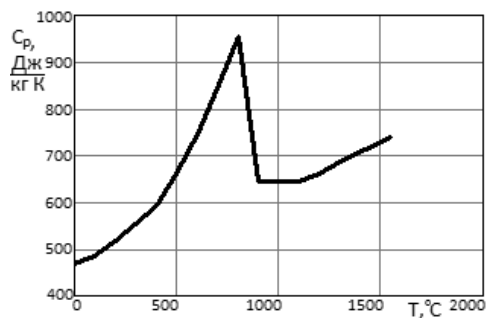


Рис. 9. Залежність питомої теплоємності сталі 35 (C_p) від температури (T)

Максимальна швидкість плазмового струменя сягає значень у межах 540..580 м/с та має такий розподіл всередині плазмотрона та за його межами (рис. 12).

Для полегшення інтерпретації отриманих даних окреслимо максимум температури ізотермою зі значенням 1818 К, що відповідає температурі плавлення сталі 35, із якої виготовлено пластину. Таким чином отримаємо чітко виражену границю розплавленого металу з рідким (рис. 13).

Як видно з рис. 13, уже за 1 с плазмової обробки за таких умов спостерігається

значне проплавлення пластини в центральній її частині. Максимальна величина проплавлення становить 5,3 мм від оброблюваної поверхні. У той же час поверхня пластини зазнає незначного оплавлення, досить рівномірного по всій поверхні пластини в межах дії плазмового струменя (рис. 14).

Рис. 10. Залежність густини сталі 35 (ρ) від температури (T)

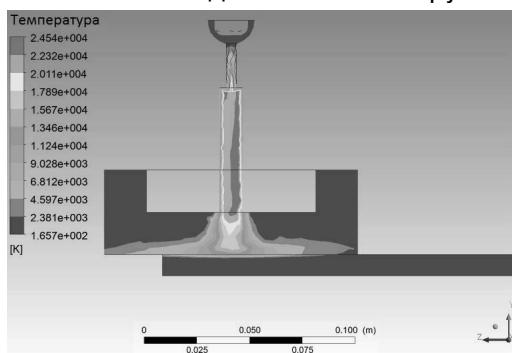
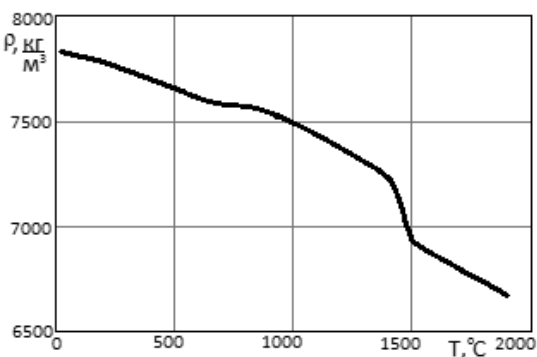


Рис. 11. Розподіл температури у каналі плазмотрона, розрахунковій області та в пластині у перерізі площини ZOY. $I = 100$ А, $h = 20$ мм, $v = 0,013$ м/с

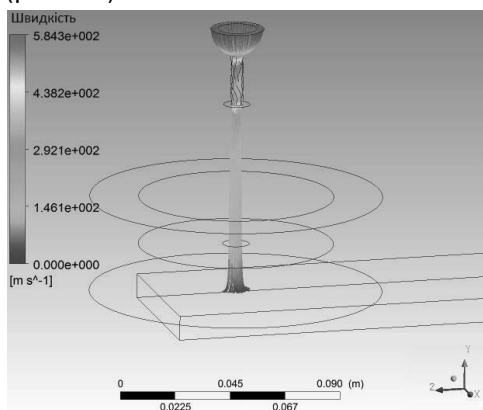


Рис. 12. Розподіл швидкості плазми в плазмотроні та розрахунковій області

Розрахунковий час повного проплавлення пластини до її протилежної поверхні становить 2,3 с (рис. 15, 16).

Отже, за результатами розрахунків при заданих умовах обробки визначено, що максимальна температура плазми сягає значення $2,45 \cdot 10^4$ $^{\circ}\text{K}$.; максимальна швидкість плазмового струменя — значень у межах 540...580 м/с; максимальна величина

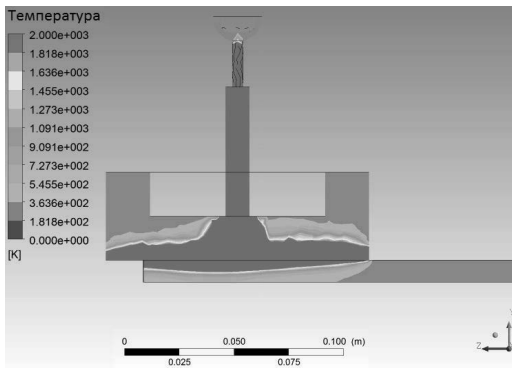


Рис. 13. Розподіл температури в каналі плазмотрона, розрахунковій області та в пластині у перерізі площини ZOY . $I = 100$ А, $h = 20$ мм, $v = 0,013$ м/с, $t = 1$ с

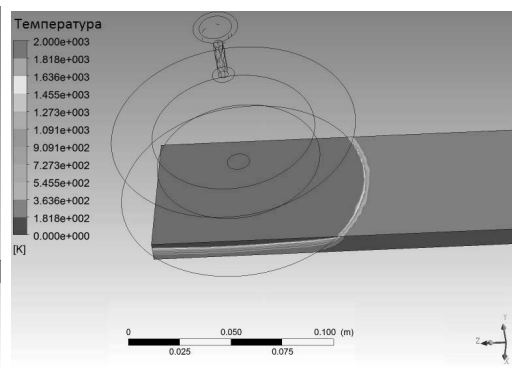


Рис. 14. Розподіл температури на поверхні пластини. $I = 00$ А, $h = 20$ мм, $v = 0,013$ м/с, $t = 1$ с

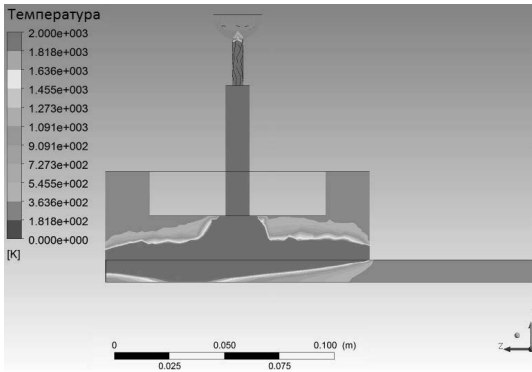


Рис. 15. Розподіл температури в каналі плазмотрона, у розрахунковій області та в пластині у перерізі площини ZOY . $I = 100$ А, $h = 20$ мм, $v = 0,013$ м/с, $t = 2,3$ с

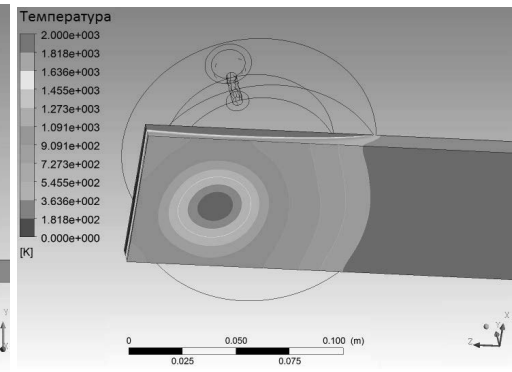


Рис. 16. Розподіл температури на поверхні пластини. $I = 100$ А, $h = 20$ мм, $v = 0,013$ м/с, $t = 2,3$ с

проплавлення становить 5,3 мм від оброблюваної поверхні, а розрахунковий час повного проплавлення пластини до її протилежної поверхні — 2,3 с.

Висновки

1. У результаті досліджень створено математичну модель для розрахунків температурного поля при нагріванні металеві пластини плазмовим джерелом енергії, що максимально наближена до умов протікання реального фізичного процесу нагрівання поверхні плоскої заготовки.

2. У результаті проведених розрахунків температурного поля для заданих розрахункових даних (сила струму $I = 100$ А, відстань від плазмотрона до поверхні нагріву $h = 20$ мм, швидкості переміщення плазмотрона $v = 0,013$ м/с), час нагрівання не повинен перевищувати 2,3 с для запобігання повного розплавлення пластини.

3. За результатами розрахунків при заданих умовах обробки визначено, що максимальна температура плазми сягає значення $2,45 \cdot 10^4$ °К та максимальна швидкість плазмового струменя перебуває у межах 540...580 м/с.

4. Таким чином, у результаті досліджень при заданих умовах обробки визначено критичні та оптимальні значення температурних, часових і геометричних параметрів існування мікрометалургійної ванни на поверхні пластини під дією плазмового джерела нагрівання.

Список літератури

- 1 Скляр, В.О. (2014). Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии: Учебное пособие. Донецьк.: ДонНТУ. 224 с.
- 2 Чепурко, М.И., Остренко, В.Я., Глускин, Н.Я. (1984). Биметаллические материалы. Ленинград: Судостроение. 272 с.
- 3 Сиротенко, Л.Д., Шлыков, Е.С., Абляз, Т.Р. (2015). Применение биметаллических материалов в машиностроении: Современные проблемы науки и образования. 2 (1). URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=20462>
- 4 Король, В.К., Гиндельгорн, М. С. (1970). Основы технологи производства многослойных металлов. Москва: Металлургия. 237 с.
- 5 Вуков, А. . (2011). Bimetal production and applications Steel in Translation. Vol. 41 (9), 778–786.
- 6 Шатрава, А.П., Лихошва, В.П. (2020). Новые методы производства литых заготовок из биметаллических материалов. *Литейное производство*, 2, 25–26.
- 7 Zheng, Zh. Shatrava, A.P., Likhoshva, V.P., Pelikan, O.A., Zheng, K. (2020). Structure and Properties of Bimetallic Centrifugally.Cast Milling Rollers. *Materials Science*, Vol. 56 (1), 59–65.
- 8 Марковский, С.А., Шатрава, О.П., Олексенко, І.В., Пелікан, О.А. (2020). Структура та властивості антифрикційних сплавів Fe-Cu-S після лазерної обробки. *Метал та лиття України*, 4, 19–25.
- 9 Лихошва, В.П., Надашкевич, Р.С., Шатрава, О.П. (2022). Підвищення сталості процесу поверхневого пластили рухомим плазмовим джерелом, *Процеси лиття*, 2 (148), 16–23.
- 10 Lykhoshva, V.P., Lykhoshva, A.V., Savin, V.V., Savina, L.V., Shmatko, O.A., Shatrava, A.P. & Tymoshenko, A.M. (2022). Technological features of stability of bimetallic billets steel-cast iron continuous casting .AIP Conference Proceedings 2486, 020013. <https://doi.org/10.1063/5.0112310>
- 11 Планковский, С. И., Цегельник, Е. В., Гарин, В. О. (2010). Моделирование течений в катодных узлах плазменного оборудования при описании дуги объемным источником энергии. *Вестник двигателестроения*. 1, 8-15.
- 12 Kim, Y., Han, J.-G., Kim Youn J. (2005). Numerical analysis of flow characteristics of an atmospheric plasma torch. Center for advanced plasma surface technology: Sungkyunkwan university. 17 p.
- 13 Планковский, С.И., Цегельник, Е.В., Островский, Е.К. (2007). Диффузия атмосферного воздуха через встречный ламинарный поток инертного газа в плазмотроне. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Тематический выпуск: Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов, 25, 72–84.
- 14 Рвачев, В.Л. (1967). Геометрические приложения алгебры логики. Киев: Техніка, 212 с.
- 15 Murphy, A.B., Arundell, C.J. (1994). Transport coefficients of Argon, Nitrogen, Oxygen, Argon-Nitrogen, and ArgonOxygen Plasmas. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 14 (4), 451–490.
- 16 Murphy, A.B. (1995). Transport coefficients of Air, Argon-Air, Nitrogen-Air, and Oxygen-Air Plasmas. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Vol. 15 (2), 279–307.
- 17 Menart, J., Menart, J., Malik, S. (2002). Net emission coefficients for argon– iron thermal plasmas. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 35, 867–874.
- 18 Naghizadeh-Kashani, Y., Cressault, Y., Gleizes, A. (2002). Net emission coefficient of air thermal plasmas *Journal of Physics D: Applied Physics*,. Vol. 35, 2025–2934.
- 19 Дресвин, В.М., Донской, А. В., Гольдфарб, В. М., Клубникин, В. С. (1972). Физика и техника низкотемпературной плазмы. Москва: Атомиздат. 352 с.

- 20 Чиркин, В. С. (1959). Теплофизические свойства материалов. Москва: Физматгиз.
- 21 Казанцева, Н.М., Телегин, А.С., Федяева, Л.А. (1991). Теплофизические свойства некоторых марок сталей. *Известия высших учебных заведений: Черная металлургия*, 7, 86–88.

Надійшла 24.03.2025

References

- 1 Sklyar, V. O. (2014) Innovacionnie I resursosberegachie technologii v metallurgii. Textbook. Donetsk: DonNTU, 224 p. [in Russian].
- 2 Chepurko, M. I., Ostrenko, V. Ya., Gluskin, N. Ya. et al. (1984). Bimetallicheskie materialy. Leningrad: Shipbuilding, 272 p. [in Russian].
- 3 Sirotenko, L. D., Shlykov, E. S., Ablyaz, T. R. (2015). Application of bimetallic materials in mechanical engineering: Modern problems of science and education. 2 (1). URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=20462> [in Russian].
- 4 Korol, V. K., Gindelnorn, M. S. (1970). Fundamentals of technology of production of multilayer metals. Moscow: Metallurgy, 237 p. [in Russian].
- 5 Bykov, A. (2011). Bimetal production and applications. *Steel in Translation*. – 2011, Vol. 41 (9), 778–786.6.
- 6 Shatrava, A. P., Likhoshva, V. P. (2020). Novie metody proizvodstva litih zagotovok iz bimetallicheskih materialov. *Foundry production*, 2, 25–26 [in Russian].
- 7 Korol, V. K., Gindelnorn, M. S. (1970). Fundamentals of technology of production of multilayer metals. *Moscow: Metallurgy*, 237 p. [in Russian].
- 8 Markovsky, E. A., Shatrava, O. P., Oleksenko, I. V., Pelikan, O. A. (2020). Structura ta vlastivosti antifrikciynyh splaviv Fe-Cu-S pisma laseranoi obrobky. *Metal and Litty of Ukraine*, 4, 19–25 [in Ukrainian].
- 9 Likhoshva, V. P., Nadashkevich R. S., Shatrava O. P. (2022) Pidvischennya stslosti procesu poverhneвого nagrivu plasiny ruhomim plasmovym. *Proceedings litty*, 2 (148). 16-23 [in Ukrainian].
- 10 Lykhoshva, V. R., Lykhoshva, A. V., Savin, V. V., Savina, L. V., Shmatko, O. A., Shatrava, A. P. & Tymoshenko, A. M. (2022). Technological features of stability of bimetallic billets steel-cast iron continuous casting *AIP Conference Proceedings* 2486, 020013 <https://doi.org/10.1063/5.0112310>
- 11 Plankovsky, S. I., Tsegelnik, E. V., Garin, V. O. (2010). Modelirovanie techeniy v katodnyh uzlah plasmennogo oborudovaniya pri opisani dugi obyomnim istochnikom energii. *Bulletin of engine building*, 1, 8-15 [in Russian].
- 12 Kim, Y., Han, J.-G., Kim, Youn J. (2005). Numerical analysis of flow characteristics of an atmospheric plasma torch. Center for advanced plasma surface technology: Sungkyunkwan university. 17 p.13.
- 13 Plankovsky, S. I., Tsegelnik, E. V., Ostrovsky, E. K. (2007). Diffusia atmosfernogo vozduha cherez vstrechniy laminarniy potok inertnigi gaza v plasmotrone. *Bulletin of the National Tech. University "KPI". Thematic issue: Problems of improving electrical machines and devices*. 25, 72– 84 [in Russian].
- 14 Rvachev, V. L. (1967). Geometricheskie prilozhenia algebry logiki. Kiev: Tekhnika, 212 p. [in Russian].
- 15 Murphy, A. B., Arundell, C. J. (1994) Transport coefficients of Argon, Nitrogen, Oxygen, Argon-Nitrogen, and ArgonOxygen Plasmas. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. Vol. 14 (4), 451–490.
- 16 Murphy, A. B. (1995). Transport coefficients of Air, Argon-Air, Nitrogen-Air, and Oxygen-Air Plasmas. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. Vol. 15 (2), 279–307.

- 17 Menart, J., Malik, S. (2002). Net emission coefficients for argon–iron thermal. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 35, 867–874.
- 18 Naghizadeh-Kashani, Y., Cressault, Y., Gleizes, A. (2002). Net emission coefficient of air thermal plasmas *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 35, 2925–2934.
- 19 Dresvin, V. M., Donskoy, A. V., Goldfarb, V. M., Klubnikin, V. S. (1972). *Fizika i tekhnicheskoe primeneniye plazmy*. Moscow: Atomizdat. 352 p. [in Russian].
- 20 Chirkin, V. S. (1959). *Teplofizicheskie svoystva materialov*. Moscow: Fizmatgiz. 356 p. [in Russian].
- 21 Kazantseva, N. M., Telegin, A. S., Fedyaeva, L. A. (1991). *Teplofizicheskie svoystva nekotorykh marok staley*. *News of higher educational institutions: Ferrous metallurgy*. 7, 86–88 [in Russian].

Received 24.03.2025

V.P. Likhoshva, Dr. Tech. Sciences, Prof., Head department;
e-mail: plazer_v@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-3396-9793>

O.O. Reintal, Ph.D., science researcher; e-mail: reintal@i.ua;
<https://orcid.org/0009-0003-4595-3948>

O.P. Shatrava, Ph.D., leading science researcher; e-mail: shatrava@ptima.kiev.ua;
<https://orcid.org/0009-0007-2972-1329>

R.S. Nadashkevych, science researcher; e-mail: 58r80ua80@ukr.net

L.M. Klymenko, Lead. Eng.-Technologist; e-mail: lmkylenko@i.ua;
<https://orcid.org/0009-0003-8040-205X>

M.I. Golubchyk, Lead. Eng.; e-mail: mgolubchyk@ukr.net;
<https://orcid.org/0009-0001-2808-2904>

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

PLASMA HEATING OF A MOVING PLATE IN THE PROCESS OF FORMING BIMETALLIC SHEETS MATERIALS

The research conducted in this work is aimed at optimizing the technological scheme and heating modes of a steel plate moving relative to a concentrated energy source to obtain a flat surface bath of melt under conditions of continuous operation of the heating source. The authors' efforts were aimed at creating a mathematical model that reflects the real physical process of plasma local heating of the surface of a metal plate, as well as at finding methods for stabilizing the heating process and the uniformity of its parameters in order to use plasma heating under conditions of a continuous technological process. The work presents the results of computational studies of the energy parameters of the plasma jet, the distance of the plasma torch to the treated surface and the time of the plasma torch in the treatment zone or the speed of its movement. The critical and maximum permissible modes of surface heating in an oxidizing environment are established, which satisfy the conditions for obtaining bimetallic products with subsequent pouring of the melt on it of the second layer and liquid-phase connection of the layers. The most rational method of uniform and stable surface heating of a metal plate has been determined. Under given processing conditions, critical values of temperature, time and geometric parameters of the existence of a micrometallurgical bath on the plate surface under the action of a plasma heating source have been determined. The optimal heating parameters have also been determined, which increase the stability and uniformity of this process, and also provide conditions for the creation of a flat surface micrometallurgical bath of the melt of sufficient size and time of its existence - as necessary prerequisites for the entire continuous technological process of manufacturing bimetallic and multilayer products.

Keywords: micrometallurgical bath of melt, concentrated energy sources, plasma heating source, direct-action plasma arc, liquid metal, bimetallic flat products.