

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.791.75.04

DOI [HTTPS://DOI.ORG/10.32782/3041-2080/2026-6-16](https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-16)

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО СТАНУ РОЗПЛАВЛЕНИХ ЕЛЕКТРОДНИХ БРИЗОК ПРИ ЗВАРЮВАННІ ВІДКРИТОЮ ДУГОЮ

**Кассов Валерій Дмитрович,**

доктор технічних наук, професор,  
декан факультету машинобудування  
Донбаської державної машинобудівної академії  
ORCID ID: 0000-0003-3034-7470

**Малигіна Світлана Валеріївна,**

кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри комп'ютерних інформаційних технологій  
Донбаської державної машинобудівної академії  
ORCID ID: 0000-0002-2622-5473

**Бережна Олена Валеріївна,**

доктор технічних наук, професор,  
доцент кафедри автоматизації виробничих процесів  
Донбаської державної машинобудівної академії  
ORCID ID: 0000-0001-6205-1987

**Турчанін Дмитро Михайлович,**

аспірант кафедри підйомно-транспортних і металургійних машин  
Донбаської державної машинобудівної академії  
ORCID ID: 0009-0008-1792-1574

**Бережний Максим Олександрович,**

аспірант кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій  
Донбаської державної машинобудівної академії  
ORCID ID: 0009-0003-2611-2684  
Scopus ID: 59169502800

**Грушко Єгор Олександрович,**

аспірант кафедри автоматизації виробничих процесів  
Донбаської державної машинобудівної академії  
ORCID ID: 0009-0000-2906-8031

*У сучасних умовах перед підприємствами та організаціями, що займаються завданнями зварювального виробництва, постає проблема підвищення продуктивності технологічного процесу, підвищення якості продукції, яка випускається, розробки енергоощадних процесів та випуску конкурентоспроможних виробів. Одним зі способів вирішення цієї проблеми є зниження трудомісткості технологічних процесів з використанням відомих видів зварювання. Основну частку металоконструкцій виготовляють за допомогою напівавтоматичного та автоматичного зварювання, ручного дугового зварювання й зварювання порошковим дротом. Проте всі ці види зварювання разом з відомими перевагами мають суттєвий недолік: набризкування розплавлених електродних крапель як фактор, що підвищує трудомісткість виробництва зварних металоконструкцій та погіршує товарний вигляд виробів. На зачистку від бризок одного погонного метра шва, виконаного ручним дуговим зварюванням, припадає 20–25 % трудомісткості всього процесу, а при автоматичному та напівавтоматичному зварюванні у вуглекислому газі – 30–40 %. Найбільш простим способом, який дає змогу зменшити ймовірність налипання бризок та полегшити їх видалення з поверхні зварюваного металу, є попереднє нанесення на неї захисних покриттів. Представлена математична*

модель теплового стану електродних бризок розплавленого металу після викидання з дугового проміжку при зварюванні відкритою дає змогу оцінити ступінь охолодження краплі розплавленого металу в інтервалі температур навколишнього середовища. Проведено розрахунок температурного поля електродної бризки в різних її точках: у центрі ядра, на поверхні бризок та між ними залежно від часу руху краплі розплавленого електродного металу до контакту зі зварюваною поверхнею. Одержані за запропонованою математичною моделлю результати враховують питому поверхню бризки, її масу, теплофізичні властивості, відстань до поверхні ураження.

**Ключові слова:** математична модель, захисне покриття, електродні бризки, температурне поле.

**Kassov Valeriy, Malyhina Svetlana, Berezshna Olena, Turchanin Dmytro, Berezhniy Maksym, Grushko Egor. Mathematical model of the thermal state of melted electrode spatters in open arc welding**

*In today's environment, companies and organizations involved in welding production face the challenge of increasing process productivity, improving product quality, developing energy-saving processes, and producing competitive products. One solution to this problem is to reduce the labor intensity of processes using established welding methods. The majority of metal structures are manufactured using semiautomatic and automatic welding, manual arc welding, and flux-cored wire welding. However, all these welding methods, despite their well-known advantages, have a significant drawback: spattering of molten electrode droplets, which increases the labor intensity of welded metal structures and degrades the product's marketability. Cleaning spatter from one linear meter of a weld made using manual arc welding accounts for 20–25% of the labor intensity of the entire process, while for automatic and semiautomatic CO<sub>2</sub> welding, it accounts for 30–40%. The simplest way to reduce the likelihood of spatter adhesion and facilitate its removal from the surface of the weld metal is to pre-apply protective coatings. The presented mathematical model of the thermal state of electrode spatter after ejection from the arc gap during open-arc welding allows one to estimate the degree of cooling of the molten metal droplet within the ambient temperature range. The temperature field of the electrode spatter was calculated at various points: at the center of the core, on the surface of the spatter, and between them, depending on the time the droplet of molten electrode metal travels before contacting the weld surface. The results obtained using the proposed mathematical model take into account the specific surface area of the spatter, its mass, its thermophysical properties, and the distance to the affected surface.*

**Key words:** mathematical model, protective coating, electrode spatter, temperature field.

**Вступ.** При зварюванні металоконструкцій одна з найбільш трудомістких операцій – очищення деталей від бризок, які міцно зчіплюються з поверхнею основного металу. Раціональний спосіб попередження їх налипання – нанесення спеціальних захисних покриттів. Найбільш поширеними, дешевими та простими у виробництві є захисні покриття на основі водного розчину (як розчинника) [1–2]. Проте досвід використання їх у виробничих умовах виявив істотні недоліки: тривалий час сушіння (1,5–2 г); погана змочуваність забруднених та незнежирених поверхонь; відсутність захисного ефекту при багатопрохідному зварюванні, а також при зварюванні на струмах понад 250А (особливо в умовах крупнокапельного перенесення) через пробій захисного покриття, що призводить до оголення ділянок металу, які захищають; під дією водного розчину деталі піддаються корозії, що веде в разі потрапляння захисного покриття в зону зварювання до виникнення дефектів у зварному шві, поверхня якого в такому разі темнішає [3–6]. Крім того, вони мають низькі зварювально-технологічні характеристики, і при зварюванні відповідальних металоконструкцій їх використання неприпустиме.

При використанні захисних покриттів на основі рідкого скла час сушіння скорочується до 30 хвилин з утворенням щільної захисної плівки.

Проте при їх потраплянні в шов утворюються дефекти. З огляду на високу в'язкість композиції, процес нанесення захисного покриття не може бути механізований. Перед виконанням лакофарбових операцій через високу адгезію до металу, яка ще посилюється при термічному впливі зварювальної дуги, ці покриття видаляються із захищуваних поверхонь за допомогою дробоструминної обробки. Покращення технологічних характеристик цих покриттів базується на ускладненні складу та технології виробництва. Проте і в такому разі не вирішується питання механізації їх нанесення [6; 7].

Захисні покриття на основі лаків та інших органічних речовин висихають протягом 15–30 хвилин, мають високу термостійкість, не впливають на якість зварного з'єднання. Проте такі захисні покриття мають високу вартість, а їх видалення перед проведенням лакофарбових робіт нерідко також можливе лише за допомогою дробоструминної обробки [8–10].

Для створення високоефективного захисного покриття, яке не має вказаних недоліків, необхідний системний підхід до проблеми запобігання приварюванню бризок до поверхні виробу. Зокрема, необхідно оцінити теплове навантаження від крапель розплавленого електродного металу залежно від їх розмірів, швидкості польоту при викиданні з дугового проміжку та відстані до поверхні ураження.

**Методи та методики дослідження.** При розробці моделі необхідно враховувати температуру та розмір бризок, їх теплофізичні властивості, відстань до поверхні ураження. Щодо цього доцільно представити математичні залежності, що пов'язують ці змінні.

Швидкість польоту бризки та температура поверхні зварюваної деталі дають підставу вважати, що:

$Q_d \gg Q_m$  де  $Q_d$  – тепло, одержане часткою в дуговому проміжку, Дж;

$Q_m$  – тепло, одержане часткою від розігрітої поверхні металу, Дж.

**Постановка завдання** матиме такий вигляд. Дано сферичне тіло (бризка електродного металу) радіусом  $R$  з розподілом температури у вигляді функції  $f(r)$ . Бризка до її контакту з основним металом пролітає середовище з температурою, меншою температури в дуговому проміжку. Загальне формулювання задачі: знайти розподіл температури всередині бризки в будь-який момент часу за умови, що температура  $T$  в будь-якій точці бризки є функція часу  $\tau$  та радіусу  $r$ . Диференціальне рівняння теплопровідності для такого сферичного тіла при симетричній задачі (тобто рівномірному охолодженні, за якого ізотермічні поверхні становлять собою концентричні сфери), може бути записано так [11; 12]:

$$\frac{\partial [rT(r, \tau)]}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 [rT(r, \tau)]}{\partial r^2} \quad (1)$$

де  $a$  – коефіцієнт теплопровідності, м<sup>2</sup>/с;  $R$  – радіус частки, м.

Початкові та граничні умови мають вигляд:

$$T(r, 0) = f(r); \quad (2)$$

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} = 0; \quad T(0, \tau) \neq \infty; \quad (3)$$

$$-\frac{\partial T(R, r)}{\partial r} + H[T_c - T(R, \tau)] = 0, \quad (4)$$

де  $H =$ ;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К;

$T_c$  – температура, до якої охолодилася поверхня бризки в початковий момент часу, К.

Розв'язуючи задачу операційним методом у тій її формі, яка базується на знаходженні відображення  $L(s)$  від функції  $f(\tau)$  за допомогою перетворювача Лапласа за умов (2) та (4):

$$T_L(r, s) - \frac{T_0}{s} = B \frac{\text{sh} \sqrt{\frac{s}{a}} r}{r},$$

де  $B$  – постійна.

Гранична умова (4) для відображення матиме вигляд:

$$-T_L'(R, s) + H \left[ \frac{T_s}{s} - T_L(R, s) \right] = 0.$$

Використовуючи рекомендації [11], розв'язання поставленої задачі набуде вигляду:

$$\theta = \frac{T(r, \tau) - T_0}{T_c - T_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{R \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \mu_n} e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (5)$$

є  $A_n$  – початкові теплові амплітуди, які визначаються зі співвідношення:

$$A_n = (-1)^{n+1} \frac{2Bi \sqrt{\mu_n^2 + (Bi - 1)^2}}{\mu_n^2 + Bi^2 - Bi},$$

$\mu_n$  – прості корні, які визначаються з характеристичного рівняння:

$$\text{tg} \mu_n = -\frac{\mu_n}{Bi - 1}, \quad (6)$$

$Bi$  – критерій Біо.

Якщо вважати  $Bi \rightarrow \infty$ , то згідно з рівнянням (6)  $\mu_n = n\pi$ , а початкові теплові амплітуди дорівнюють:

$$A_n = 2(-1)^{n+1}.$$

Тоді рішення (5) набуде вигляду:

$$\theta = \frac{T(r, \tau) - T_0}{T_c - T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \frac{R \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \mu_n} \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (7)$$

де  $Fo$  – критерій Фур'є;

$T_0$  – температура навколишнього середовища, у якому міститься бризка, К.

Використовуючи (7), розглянемо дві розплавлені частки – Fe та FeO, діаметром 2 мм кожна, які мають початкову температуру 1600 °С. При охолодженні до 150 °С частка Fe виділяє 154 Дж тепла, а частка FeO – 36,8 Дж. Проте це порівняння не розкриває повністю картину термонавантаження на покриття, оскільки частка FeO в польоті поступово охолоджується, тоді як частка Fe в польоті може навіть нагріватися через протікання реакції з виділенням тепла [12]. Окислення Fe за високих температур відбувається настільки швидко, що за 1 с утворюється оксидна плівка товщиною 0,001 мм. Оскільки швидкість хімічної реакції перебуває в логарифмічній залежності від температури, то реакція окислення протікає більш інтенсивно за високих температур [11]. Випромінювальна здатність є мірою швидкості, з якою випромінюється тепло з поверхні частки. Висока випромінювальна здатність частки особливо важлива у вільному польоті. При зіткненні частки

із захисним покриттям, навпаки, низька випромінювальна здатність. З погляду термічних збурень, що вносяться у вихідний стан захисного покриття, вагоме значення має форма часток, які співударяються з покриттям. При сферичній формі точка контакту, а отже, і теплопередача теплопровідністю мінімальна, і основна частина тепла передається випромінюванням. У разі плоских часток швидкість теплопередачі багатократно зростає. Частина, яка твердіє при польоті, набуває сферичної форми. Якщо вона досягає поверхні покриття в рідкому стані, то при затвердінні вона набуває напівсферичної форми з плоским майданчиком в зоні контакту з покриттям. Так, швидка кристалізація часток, що летять, може бути забезпечена окисненням до  $Fe_2O_3$  (температура плавлення  $1458^\circ C$ ), а не до  $FeO$  (температура плавлення  $1380^\circ C$ ). При цьому взаємодія розплавленої бризки з навколишнім середовищем характеризується утворенням плівок оксидів. Одночасно протікають дифузійні процеси, які посилюються конвекційними потоками та механічним збуренням рідкого металу. У сталі, яка містить  $0,025\%$   $Fe_2O_3$  з  $1\text{ г}$  металу за  $3000\text{ К}$  утворюється  $1,56\text{ см}^3\text{ CO}$ , а в перерахунку на  $1\text{ см}^3$  металу за тієї ж температури –  $11\text{ см}^3$ . Розрахункові значення

тепловмісту часток залежно від їх розмірів (табл. 1) показують, що концентрація тепла зростає в кубі порівняно зі збільшенням діаметра. Тому найбільшу небезпеку для «пробою» покриття мають великі бризки, що кореспондуються з [10].

Так, максимальний ефект підвищення тепловкладення в покриття досягається при збільшенні розмірів бризок та швидкості теплопередачі.

Якщо критерій Біо малий ( $Bi \rightarrow 0$ ), усі коефіцієнти  $A_n \rightarrow 0$ , окрім амплітуди  $A_1=1$ , а  $\mu_1^2=3Bi$ . У такому разі:

$$\theta = 1 - \frac{R \sin \sqrt{3Bi} \left( \frac{r}{R} \right)}{r \sqrt{3Bi}} e^{-3BiFo}$$

Теплові розрахунки з використанням цієї математичної моделі виконані за допомогою пакету скінчено-елементного аналізу LS-DYNA. У процесі руху до моменту контакту з поверхнею зварюваного металу крапля втрачає частину теплоти на променисту та конвективну тепловіддачу (рис. 1, а). Як приклад на рис. 1, б представлено температурне поле краплі: швидкість польоту  $V = 1\text{ м/с}$ ,  $2R = 0,003\text{ м}$ ,  $T_{\text{solidus}} = 1451^\circ C$ ,

Таблиця 1

Випромінювальна здатність різних електродних бризок

Діаметр частки, мм	Крупність частки, меш	Маса частки, мг	Тепловміст, Дж	
			Fe	FeO
1,651	12	18,98	24,8	21,3
0,833	20	2,37	3,5	2,7
0,417	40	0,296	0,4	0,3
0,208	70	0,037	0,05	0,04
0,074	200	0,0017	0,0022	0,0019

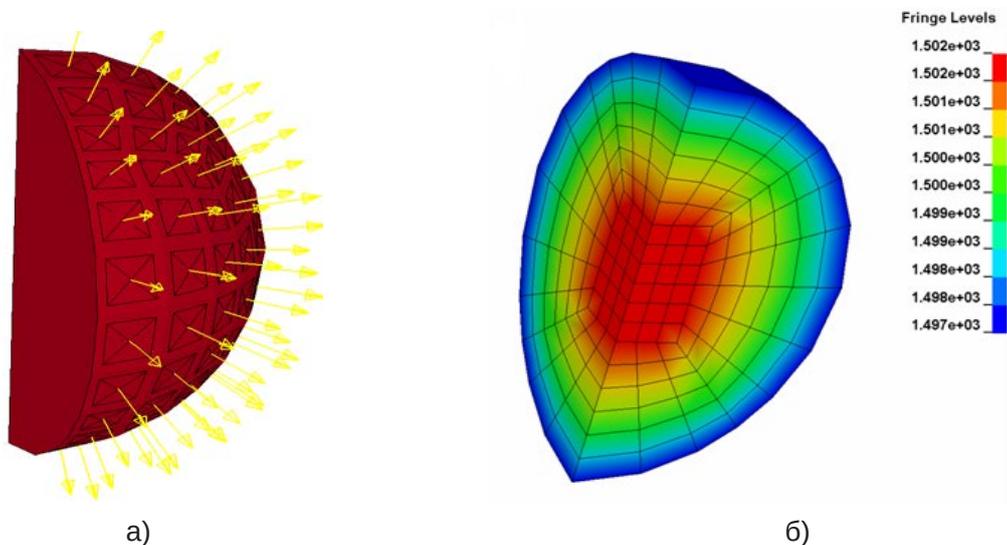
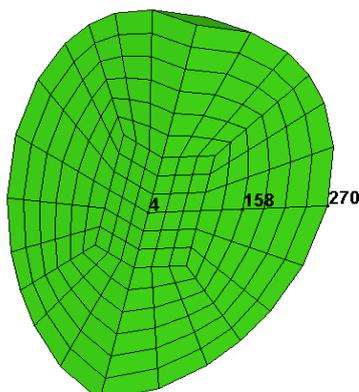


Рис. 1. Теплова модель бризки розплавленого металу з граничними умовами (2) – (4) (а) та її температурне поле (б)

$T_{\text{ліквідус}} = 1510$  °С, теплоємність варіюється від 486 до 250 Дж/(кг · К) при зміні температури від 20 до 1800 °С.

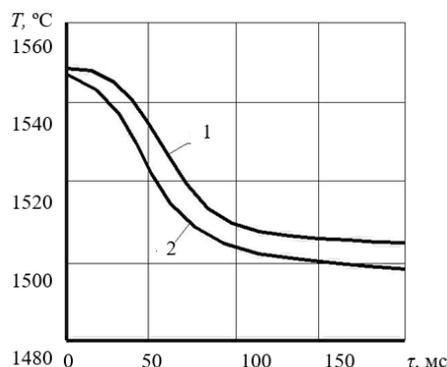
**Результати.** З метою оцінки теплового стану крапель розплавленого електродного металу після викидання з дугового проміжку проведено розрахунок зміни температурного поля електродної бризки в різних точках (рис. 2) (у центрі ядра (А 4), на поверхні бризки (С 270) та між ними (В 158)) залежно від часу її руху до контакту зі зварюваною поверхнею. Аналіз графічних залежностей одержаних результатів розрахунку (рис. 3), а також аналіз представленої математичної моделі теплової поведінки електродної бризки за різних умов показав, що за малих значень  $F_0$  температура в центрі часток майже не змінюється.



**Рис. 2.** Розташування фіксованих точок А 4, В 158, С 270

За одержаними результатами дослідження також встановлено, що зміна температури на поверхні бризки розплавленого електродного металу відбувається в широких межах за малих значень критерію Фур'є  $F_0$  та великих значень критерію Біо  $Bi$ . З аналізу представленої математичної моделі випливає, що зі зниженням критерію Біо середня температура бризки зменшується, а величина розплавленого об'єму бризок залежить від їх теплофізичних властивостей (коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$ , питомої теплоємності  $c$ , коефіцієнта температуропровідності  $a$ ), початкової температури  $T_0$

та розмірів, відстані до поверхні ураження  $L$ , швидкості переміщення  $V_0$ .



**Рис. 3.** Зміна температури бризки  $T$  у фіксованих точках: в центрі – А 4 (крива 1) та на поверхні – С 270 (крива 2) бризки ( $2R = 0,003$  м) в різні моменти часу  $\tau$  після викидання з дугового проміжку (розрахунок виконаний при  $a = 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с,  $c = 400$  Дж/кг · К,  $\lambda = 32$  Вт/м · К,  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $V_0 = 1$  м/с,  $T_0 = 1548$  °С)

**Висновки.** Одержано математичний опис теплової поведінки електродної бризки розплавленого металу після викидання з дугового проміжку, що дає змогу оцінити ступінь її охолодження в інтервалі температур навколишнього середовища та враховує питому поверхню бризки, її масу, теплофізичні властивості, відстань до поверхні ураження. Аналіз моделі показав, що за малих значень  $F_0$  температура в центрі часток майже не змінюється, а зміна температури на поверхні бризки відбувається в широких межах за малих значень  $F_0$  та великих  $Bi$ ; зі зниженням критерію Біо середня температура бризки зменшується. Величина розплавленого об'єму бризок залежить від їх теплофізичних властивостей (коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$ , питомої теплоємності  $c$ , коефіцієнта температуропровідності  $a$ ), початкової температури  $T_0$  та розмірів, відстані до поверхні ураження  $L$ , швидкості переміщення  $V_0$ , і є важливою характеристикою їх стану, яка впливає на ймовірність приварювання до поверхні металоконструкції.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Chen J. H., Sun Z. C., Fan D. Study on the mechanism of spatter produced by basic welding electrodes. *Welding Journal-Including Welding Research Supplement*. 1996. Vol. 75, no. 10. P. 311–316.
2. Molleda F., Mora J., Molleda J. R., Mora E. The importance of spatter formed in shielded metal arc welding. *Materials Characterization*. 2007. Vol. 58, no. 10. P. 936–940. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.09.01>
3. Kang S. K., Na S. J. A mechanism of spatter production from the viewpoint of the integral of specific current action. *Welding journal*. 2005. Vol. 84. P. 188–196.

4. Kang M. J., Kim Y., Ahn S., & Rhee S. Spatter rate estimation in the short-circuit transfer region of GMAW. *Welding Journal*. 2003. Vol. 82, no. 9. P. 238–247. URL: <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=15110215>
5. Fed'ko V. T., Zernin E. A. Main reasons for splashing and methods of protection of welded components against molten metal splashes. *Welding international*. 2005. Vol. 19, no. 6. P. 495–497. <https://doi.org/10.1533/wint.2005.3475>
6. Athi N., Cullen J. D., Al-Jader M., Wylie S. R., Al-Shamma'a A. I., Shaw A., Hyde M. Experimental and theoretical investigations to the effects of zinc coatings and splash on electrode cap wear. *Measurement*. 2009. Vol. 42, no. 6. P. 944–953. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.02.001>
7. Fotovvati B., Namdari N., Dehghanghadikolaei A. On coating techniques for surface protection: A review. *Journal of Manufacturing and Materials processing*. 2019. Vol. 3, no. 1. P. 28. <https://doi.org/10.3390/jmmp3010028>
8. Спосіб виготовлення покриття для захисту поверхні від налипання бризок розплавленого металу: пат. 95020909 Україна: В23К35/36. № 4/1997; заявл. 27.02.1995; опубл. 29.08.1997, Бюл. № 4/1997. 4 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/836465/>
9. Склад покриття для захисту поверхні від налипання бризок розплавленого металу: пат. № 8107 Україна: В23К35/36. № u200500500; заявл. 19.01.2005; опубл. 15.07.2005, Бюл. № 7/2005. 2 с. URL: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/285380/>
10. Kassov V., Berezshnaya E., Malyhin N., Antonenko Y., Zubenko K. Development of the protection coat for metallic structures based on the intercalated graphite compounds. *Materials Science Forum*. 2021. Vol. 1045. P. 9–16. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1045.9>
11. Olson D. L., Dixon R. D., Liby A. L. *Welding: theory and practice*. Elsevier Science Publishers B. V., 2012. 389 p.
12. Karkhin V. A. *Thermal processes in welding*. Springer Singapore, 2019. 478 p.

#### REFERENCES:

1. Chen, J. H., Sun, Z. C., & Fan, D. (1996). Study on the mechanism of spatter produced by basic welding electrodes. *Welding Journal-Including Welding Research Supplement*, 75(10), 311–316.
2. Molleda, F., Mora, J., Molleda, J. R., & Mora, E. (2007). The importance of spatter formed in shielded metal arc welding. *Materials Characterization*, 58(10), 936–940. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2006.09.01>
3. Kang, S. K., & Na, S. J. (2005). A mechanism of spatter production from the viewpoint of the integral of specific current action. *Welding journal*, 84, 188–196.
4. Kang, M. J., Kim, Y., Ahn, S., & Rhee, S. (2003). Spatter rate estimation in the short-circuit transfer region of GMAW. *Welding Journal*, 82(9), 238–247. Retrieved from <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=15110215>
5. Fed'ko, V. T., & Zernin, E. A. (2005). Main reasons for splashing and methods of protection of welded components against molten metal splashes. *Welding international*, 19(6), 495–497. <https://doi.org/10.1533/wint.2005.3475>
6. Athi, N., Cullen, J. D., Al-Jader, M., Wylie, S. R., Al-Shamma'a, A. I., Shaw, A., & Hyde, M. (2009). Experimental and theoretical investigations to the effects of zinc coatings and splash on electrode cap wear. *Measurement*, 42(6), 944–953. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2009.02.001>
7. Fotovvati, B., Namdari, N., & Dehghanghadikolaei, A. (2019). On coating techniques for surface protection: A review. *Journal of Manufacturing and Materials processing*, 3(1), 28. <https://doi.org/10.3390/jmmp3010028>
8. Kassov, V. D. Kushij, T. K., Livshyts, M. H., & Malugina, S. V. (1997). *Sposib vyhotovlennia pokryttia dlia zakhystu poverkhni vid nalypannia bryzok rozplavlenoho metalu* (Patent of Ukraine № 95020909). State Intellectual Property Service of Ukraine. Retrieved from <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/836465/> [in Ukrainian].
9. Chyharov, V.V., & Malugina, S.V. (2005). *Sklad pokryttia dlia zakhystu poverkhni vid nalypannia bryzok rozplavlenoho metalu* (Patent of Ukraine № 8107). State Intellectual Property Service of Ukraine. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/285380/> [in Ukrainian].
10. Kassov, V., Berezshnaya, E., Malyhin, N., Antonenko, Y., & Zubenko, K. (2021). Development of the protection coat for metallic structures based on the intercalated graphite compounds. *Materials Science Forum*, 1045, 9–16. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1045.9>
11. Olson, D. L., Dixon, R. D., & Liby, A. L. (2012). *Welding: theory and practice*, 8, 389 p.
12. Karkhin, V. A. (2019). *Thermal processes in welding*, 492, 478 p.



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 23.12.2025  
 Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.01.2026  
 Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026