

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.791.75.04

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-25>**ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО
ЗНОСОСТІЙКОГО ШАРУ ПРИ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОМУ НАПЛАВЛЕННІ
ПОРОШКОВИМИ СТРІЧКАМИ****Бережна Олена Валеріївна,**

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

Кассов Валерій Дмитрович,

доктор технічних наук, професор
Донбаської державної машинобудівної академії
ORCID ID: 0000-0001-6205-1987

Турчанін Дмитро Михайлович,

аспірант
Донбаської державної машинобудівної академії
ORCID ID: 0009-0008-1792-1574

Перспективним напрямом відновлення зношених та зміцнення нових деталей є формування поверхневого шару з необхідними експлуатаційними властивостями. Одним із найбільш поширених технологічних процесів є дугове наплавлення, але воно має ряд недоліків, які включають суттєву зміну початкового фазового стану матеріалу покриття і значний термічний вплив на матеріал деталі. Запобігти утворенню зони термічного впливу значних розмірів дозволяють технології нанесення покриттів, що базуються на короточасній тепловій дії. До таких процесів належить електроконтактний спосіб, що характеризується спільною пластичною деформацією приконтактного об'єму поверхні та присадкового матеріалу з утворенням з'єднання покриття з основним металом. З огляду на короточасність перебігу процесу електроконтактного наплавлення, існують певні складності в прогнозуванні одержуваної якості покриття та відповідності його основним експлуатаційним властивостям. Тому виникає необхідність удосконалення технології відновлення зношених поверхонь електроконтактним методом за рахунок дослідження формування структури наплавленого шару та розробки методів забезпечення програмованого розподілу структурних складників по його перетину, а також за рахунок удосконалення технології виготовлення присадкових матеріалів із градієнтним розподілом властивостей. У представленій роботі проведено дослідження впливу вмісту вуглецю у шихтовому матеріалі сердечнику порошкової стрічки на процес структуроутворення наплавленого шару, враховуючи технологічні параметри процесу електроконтактного наплавлення та подальшої електротермічної обробки.

Ключові слова: електроконтактне наплавлення, підвищення зносостійкості, порошкова стрічка.

Berezshna Olena, Kassov Valeriy, Turchanin Dmytro. Study of structure formation of composite wear-resistant layer during electric contact surfacing with powder tapes

A promising direction for restoring worn and strengthening new parts is the formation of a surface layer with the necessary operational properties. One of the most common technological processes is arc surfacing, but it has a number of disadvantages, which include a significant change in the initial phase state of the coating material and a significant thermal effect on the part material. Coating application technologies based on short-term thermal action allow preventing the formation of a thermally affected zone of significant size. Such processes include the electrocontact method, which is characterized by the joint plastic deformation of the contact volume of the surface and the filler material with the formation of a connection of the coating with the base metal. Given the short duration of the electrocontact surfacing process, there are certain difficulties in predicting the resulting coating quality and compliance with its main operational properties. Therefore, there is a need to improve the technology of restoring worn surfaces by the electrocontact method by studying the formation of the structure of the deposited layer and developing methods for ensuring the programmed distribution of structural components along its cross section,

as well as by improving the technology for manufacturing additive materials with a gradient distribution of properties. In the presented work, a study was conducted of the influence of the carbon content in the charge material of the core of the powder ribbon on the process of structure formation of the deposited layer, taking into account the technological parameters of the electrocontact deposition process and subsequent electrothermal treatment.

Key words: electrocontact surfacing, increasing wear resistance, powder tape.

Вступ. Довговічність та надійність роботи відновлених деталей машин залежить від численних факторів, одним з яких є правильний вибір складу наплавленого металу, що забезпечує не тільки необхідну зносостійкість металу, але й високу працездатність деталей залежно від умов експлуатації. Широкі можливості конструювання композиційних присадкових матеріалів у вигляді порошкових стрічок дозволяють повною мірою задовольнити усім експлуатаційним вимогам, які часом є несумісними у разі використання електродних матеріалів суцільного перетину. Така перевага перед іншими присадковими матеріалами забезпечується завдяки сполученню компонентів сердечника шихтової композиції з широким діапазоном варіювання складу та матеріалу оболонки, що дає можливість одержувати на поверхні виробу міцний та пластичний наплавлений шар із включеннями тугоплавких частинок, які забезпечують високу зносостійкість металу [1–4].

Проте складність вибору складу покриття полягає не тільки в необхідності відповідності характеристик наплавленого шару всім експлуатаційним вимогам, але й у вирішенні питання взаємодії компонентів матеріалу між собою та з металом основи, що є важливим чинником, оскільки утворення в процесі електроконтактного наплавлення в структурі покриття небажаних хімічних поєднань та дефектів (таких як нітриди, гідриди, а також газова пористість) може істотно знизити якість відновлюваного виробу та термін його експлуатації [5].

Методи та методики дослідження. З метою встановлення принципової можливості утворення якісного зносостійкого шару при електроконтактному наплавленні порошковими стрічками було проведено попередні дослідження на модельних зразках. В якості оболонки застосовували стрічку марки 08 кп. В якості шихти сердечника використовували металеві порошки, одержані шляхом переплавлення Fe-порошку

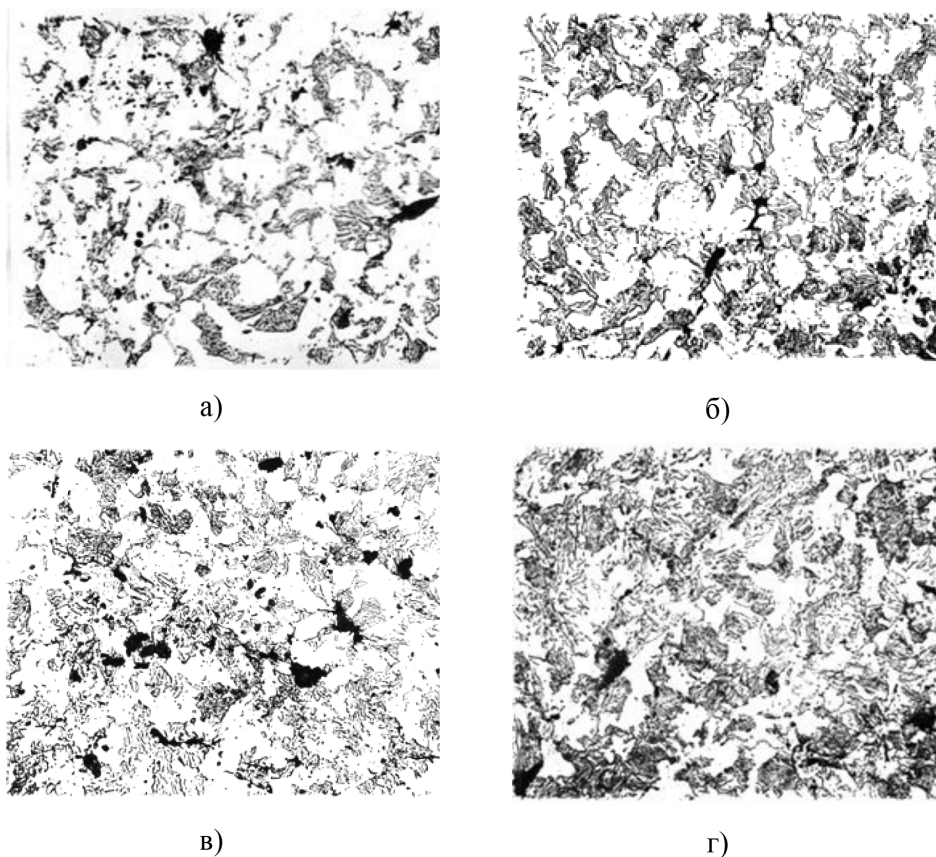


Рис. 1. Мікроструктури зразків, що містять 1,0 % С, після наплавлення (а) та після електротермообробки за температури 400 °C (б), 500 °C (в), 600 °C (г), ($\times 300$)

ПЖ1М, які відрізняються один від одного вмістом у них вуглецю, що дорівнює у кожній суміші послідовно 1,0 % (склад А); 1,5 % (склад В). Наплавлення проводили на режимах, що дозволяють підтримати постійними параметри термічного циклу нагріву, зокрема таких, як максимальна температура нагріву та час її досягнення.

Цикл наплавлення включає такі операції: підведення формуючого електроду та формування шару, що наплавляється з експериментальних порошкових стрічок (ширина 20 мм, товщина 1,8 мм, $K_3 = 35-38$) на окремій ділянці, розміри якої визначаються розмірами електроду; нагрів матеріалу сердечника порошкової стрічки ($I_{зв} = 10-12$ кА, $P = 1,1-2,3$ кН) до температури сплавоутворення; витримка при ній, охолодження наплавленої ділянки з наступною електротермообробкою для виключення необхідності наступної пічної термообробки. Оцінку якості наплавлення здійснювали на контрольних зразках шляхом проведення металографічних досліджень. Зразки складу А після наплавлення (рис. 1, а) мають ферито-перлітну структуру, перліт – пластинчастий.

Графіт – у вигляді дрібних включень невизначеної форми. Мікротвердість перліту – 2900 МПа,

фериту – 2230–2540 МПа. При електротермообробленні до 600 °С (рис. 1, б–г) структура є аналогічною.

При електротермообробленні до 800 °С (рис. 2, а) перліт – зернистий, структурні складники розподілені рівномірно, графіт – у вигляді дрібних включень невизначеної форми, мікротвердість – 1700–1770 МПа. При нагріванні до температури 900 °С (рис. 2, б) з'являються окремі перлітні зерна, графіт у вигляді дрібних включень невизначеної форми, мікротвердість – 2290–2390 МПа. При нагріві до температури 1000 °С (рис. 2, в) структура не змінюється, а мікротвердість становить 2390–2540 МПа. При нагріві до 1300 °С (рис. 2, г) структура стає перліто-феритною, графітові включення мають невизначену форму, мікротвердість становить 1420–1700 МПа.

Зразки після наплавлення складом В (рис. 3, а) мають ферито-перлітну структуру, перліт – пластинчастий, графіт – у вигляді дрібних включень невизначеної форми. Подібну структуру мають наплавлені зразки після електротермообробки до 400 та 600 °С. При нагріві до 900 °С (рис. 3, в) з'являються окремі перлітні зерна, а при електротермообробленні

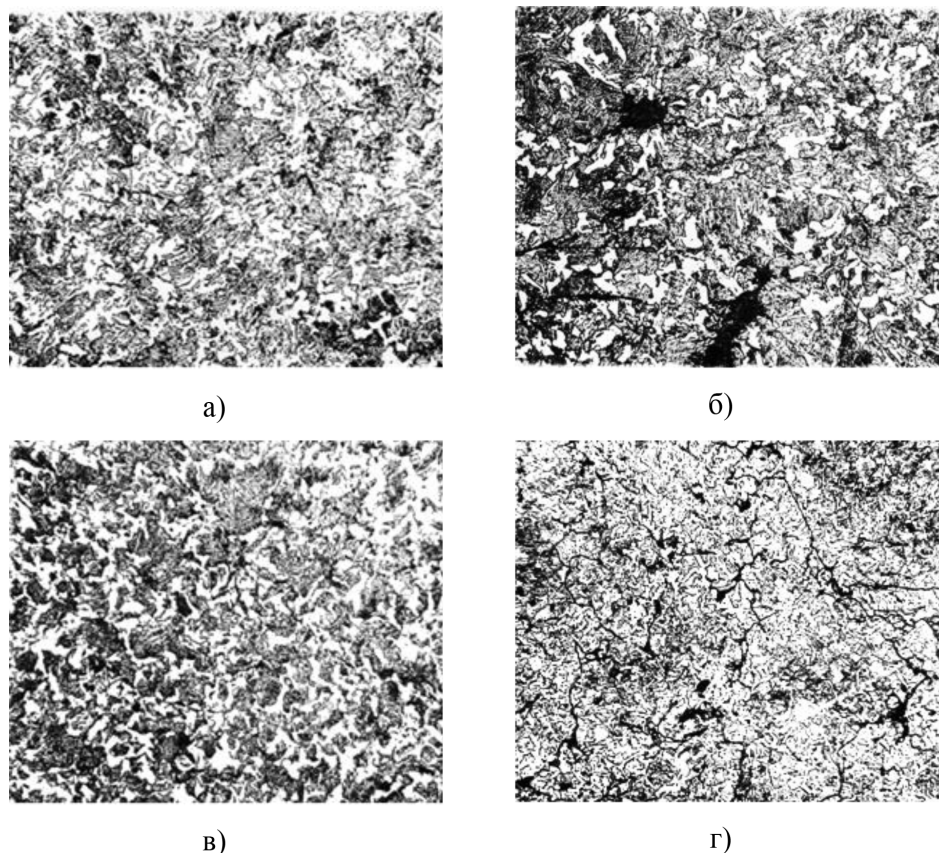


Рис. 2. Мікроструктури зразків, що містять 1,0 % С, після електротермообробки за температури 800 °С (а), 900 °С (б), 1000 °С (в) та 1300 °С (г), ($\times 300$)

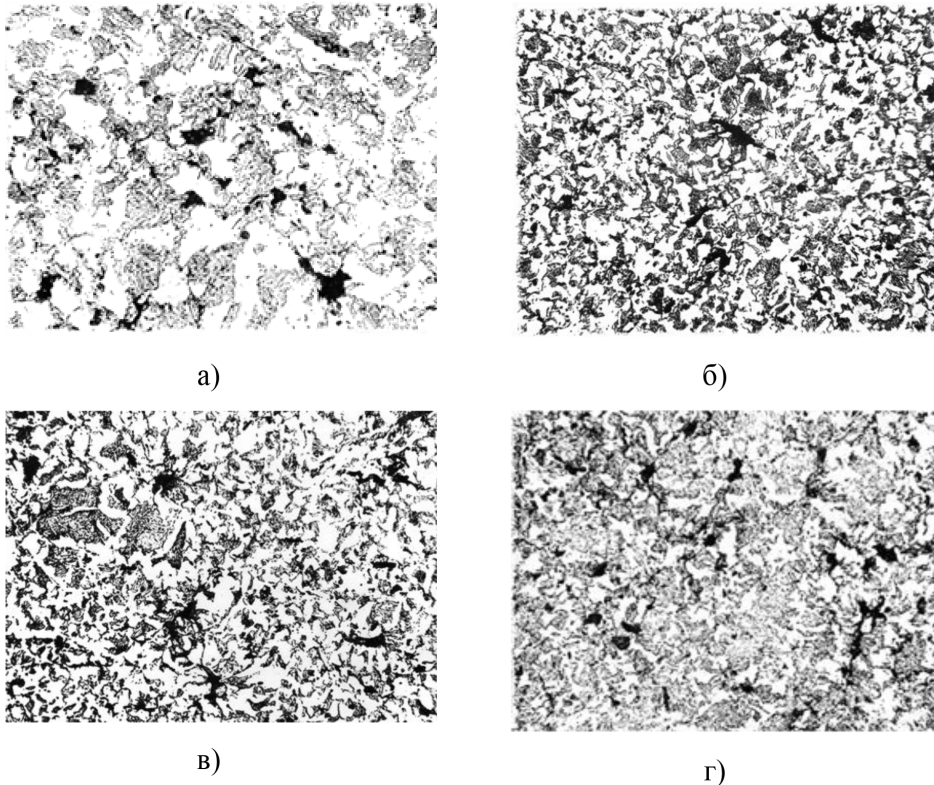


Рис. 3. Мікроструктури зразків, що містять 1,5 % С, після наплавлення (а) та після електротермообробки за температури 800 °С (б), 900 °С (в), 1000 °С (г), (×300)

до 1000 °С наявні окремі перлітні зерна, графіт – у вигляді дрібних включень невизначеної форми, зерно відповідає 7–8 балу.

Зразки, наплавлені порошковою стрічкою складу В на двоімпульсному режимі (час одного імпульсу наплавлення 2,12 с), (рис. 4, а) мають перлітну структуру. Перліт – дрібнопластинчастий, спостерігаються одиничні дрібні ділянки фериту. Графіт – пластинчастий, розташований як у вигляді окремих скупчень, так і окремими пластинками. Твердість – 109–112 НВ. По границях зерен – неметалеві включення, які потрапляють до розплаву з оболонки порошкової стрічки. При електротермообробленні до 600 °С (рис. 4, б) структура перлітна, перліт – пластинчастий, одиничні дрібні ділянки фериту. Графіт – пластинчастий. Мікротвердість перліту – 2600–3300 МПа.

При нагріві до температури 800 °С (рис. 4, в) перліт – дрібнопластинчастий, на окремих ділянках зернистий. Графіт – пластинчастий. Твердість 95 НВ. Мікротвердість перліту – 2100–2500 МПа. При нагріві до 900 °С (рис. 4, г) спостерігається перліто-феритна структура. Перліт – зернистий, феритні ділянки утворюються по границях зерен. Графіт – пластинчастий. Мікротвердість перліту становить 2330–2540 МПа, а фериту – 2190–2240 МПа.

При нагріві до 1000 °С (рис. 4, д) структура – перліто-феритна. Перліт – дрібнопластинчастий. Феритні ділянки розташовані по границях зерен. Графіт – пластинчастий. Мікротвердість перліту 2610–2650 МПа, фериту – 2200–2240 МПа, по границях зерен мають неметалеві включення. При нагріві до 1300 °С (рис. 4, е) структура перліто-феритна, перліт – пластинчастий, феритні ділянки розташовані по границях зерен, графіт – пластинчастий. Твердість – 116–146 НВ. По границях зерен спостерігаються неметалеві включення.

Результати. Таким чином, аналіз результатів металографічних досліджень показав, що наплавлені зразки (рис. 1, а; рис. 3, а) мають практично однакову структуру металевої основи. Шар, наплавлений складом В, містить і більшу кількість вільного фериту в напавленні. Напавка (рис. 4, а) незважаючи на те, що шихтовий склад містить також 1,5 % С, має перлітну структуру замість ферито-перлітної. Це пояснюється тим, що напавлення проводили у двоімпульсному режимі. Тому в його структурі менше вільного фериту. Під дією високих температур (вище 800 °С) у структурі спостерігається збільшення кількості перліту, що приводить до підвищення твердості. Крім того, має місце певне зменшення величини зерна. При нагріві вище

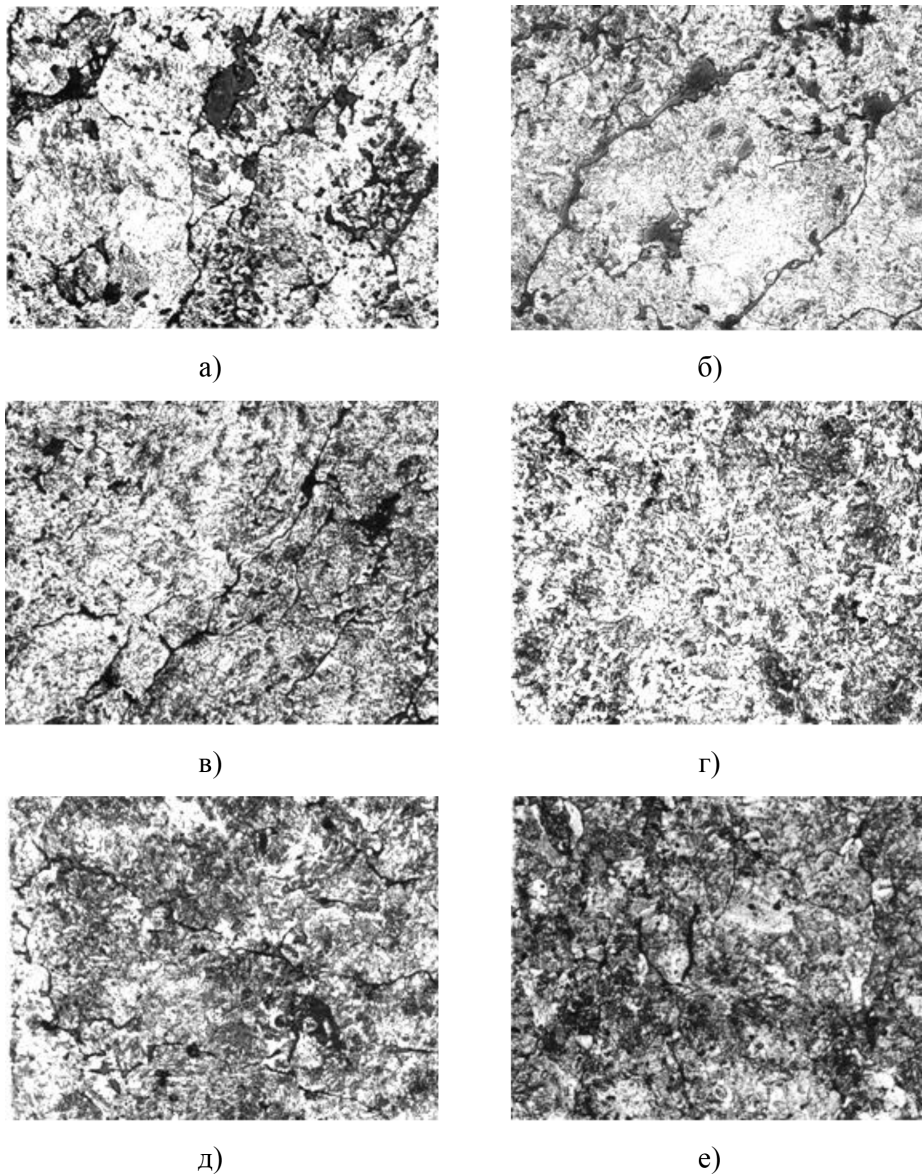


Рис. 4. Мікроструктури зразків, що містять 1,5 % С, після двоімпульсного наплавлення (а) та після електротермообробки при температурі 600 °С (б), 800 °С (в), 900 °С (г), 1000 °С (д) і 1300 °С (е) (×300)

1100 °С разом із тим, що відбувається подальше збільшення кількості перліту, спостерігається певне зростання величини зерна.

Металографічний аналіз зони термічного впливу (рис. 5) показав її незначні розміри при наявності вузької знеуглецьованої зони

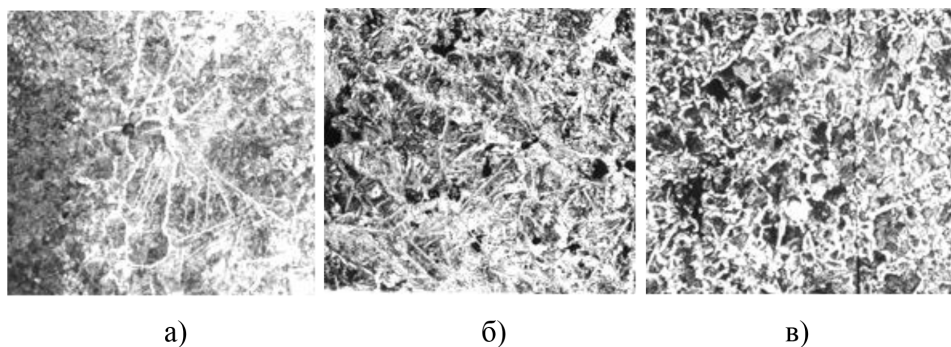


Рис. 5. Мікроструктура зони сплавлення з основним металом

(електроконтактне наплавлення проводили на зразки зі сталі Ст3).

При напавленні порошковою стрічкою складу А (рис. 5, а) структура перлітна, наявні окремі голки цементиту. Мікротвердість – 3660–3780 МПа. При напавленні стрічкою складу В (рис. 5, б) структура перлітна, окремі голки цементиту. Мікротвердість – 3860–3940 МПа. При напавленні тією ж стрічкою, але на двоімпульсному режимі (рис. 5, в) структура ферито-перлітна, мікротвердість – 1700–1770 МПа.

Таким чином, вплив вуглецю на властивості напавленого шару на залізній основі

підкоряється загальним закономірностям заліззовуглецевих литих сплавів.

Висновки. Проведені експерименти показали загальне, переважно якісне уявлення про механізм сплавоутворення при електроконтактному напавленні порошковою стрічкою. Можливість фазових перетворень шихтової композиції сердечника в осередку деформації забезпечується завдяки концентрації теплового потоку у заданому напрямку. Показано можливість одержання методом електроконтактного напавлення порошковими стрічками напавленого шару як із чітко вираженою нерівноважною структурою, так і зі структурою, близькою до рівноважної.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Wear-resistant surfacing layer prepared by high efficiency twin-wire indirect arc welding / Dong T. W., Yong Z., Guan L. Z., Chuan W. S. *Materials Science Forum.* – Trans Tech Publications Ltd. 2020. Т. 985. Р. 229–239. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.985.229>
2. Densification during the formation of WC-based coating prepared by electric contact strengthening / Sun Z., Zhu S., Dong W., Ding H., Bai Y., Luo Y., Di P. *Ceramics International.* 2021. Vol. 47(12). Р. 16441–16449. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.01.122>
3. Ponomarev A. I., Plakhov S. A. Research of surface hardness after electrical resistance deposition with a wire. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering.* 2020. Т. 709. №. 3. 7 p. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033023>
4. Research of Electric Contact Welding by a Wire at Restoration of Details of Cars / Marchenko D. et al. *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES).* 2021. Р. 1–5. <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598625>
5. Effects of a stainless steel interlayer on the interfacial microstructure and bonding strength of Cu/Al clad sheets prepared via the powder-in-tube method / Haitao Gao, Lin Wang, Shilei Liu, Jing Li, Charlie Kong, Hailiang Yu. *Journal of Materials Research and Technology.* 2021. Vol. 15. Р. 3514–3524. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.035>

REFERENCES:

1. Dong, T. W., Yong, Z., Guan, L. Z., & Chuan, W. S. (2020). Wear-resistant surfacing layer prepared by high efficiency twin-wire indirect arc welding. *Materials Science Forum.* – Trans Tech Publications Ltd, 985, 229–239. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.985.229>
2. Sun, Z., Zhu, S., Dong, W., Ding, H., Bai, Y., Luo, Y., & Di, P. (2021). Densification during the formation of WC-based coating prepared by electric contact strengthening. *Ceramics International*, 47(12), 16441–16449. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.01.122>
3. Ponomarev, A. I., & Plakhov, S. A. (2020). Research of surface hardness after electrical resistance deposition with a wire. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 709(3), 7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/3/033023>
4. Marchenko, D. et al. (2021). Research of Electric Contact Welding by a Wire at Restoration of Details of Cars. *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598625>
5. Haitao Gao, Lin Wang, Shilei Liu, Jing Li, Charlie Kong, & Hailiang Yu (2021). Effects of a stainless steel interlayer on the interfacial microstructure and bonding strength of Cu/Al clad sheets prepared via the powder-in-tube method. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 3514–3524. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.07.035>

Стаття надійшла: 15.08.2025

Стаття прийнята: 10.09.2025

Опублікована: 10.11.2025

