

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.791.75.04

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-4-20>

ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДОМ КОМБІНОВАНОЇ ОБРОБКИ

Бережна Олена Валеріївна,

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри АБЕРС

ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»

ORCID ID: 0000-0001-6205-1987

Малигіна Світлана Валеріївна,

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри АБЕРС

ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-2622-5473

Кассов Валерій Дмитрович,

доктор технічних наук,

професор кафедри підйомно транспортних та металургійних машин,

декан факультету машинобудування

Донбаської державної машинобудівної академії

Турчанін Дмитро Михайлович,

аспірант

Донбаської державної машинобудівної академії

ORCID ID: 0009-0008-1792-1574

Бережний Максим Олександрович,

аспірант

Донбаської державної машинобудівної академії

В умовах сучасного виробництва і необхідності економії матеріальних та енергетичних ресурсів актуальною є проблема розроблення ресурсозберезувальних технологій відновлення та ремонту деталей і вузлів машин, що працюють в умовах інтенсивного зношування, що призводить до передчасної відмови обладнання, знижує термін служби машин, а також їх продуктивність, і впливає на якість операцій, які вони виконують. Під час проведення робіт з ремонту обладнання широке використання знаходить процес відновлення деталей машин за допомогою нанесення покриттів, які мають потрібну товщину і володіють попередньо заданими властивостями, які можуть бути отримані за допомогою електроконтактних методів нанесення функціонального шару, що дозволить ефективно розв'язати актуальну задачу подовження терміну служби деталей та вузлів машин. У роботі проведено дослідження впливу технологічних особливостей відновлення поверхні методом електроконтактного наплавлення функціонального шару з метою визначення перспективних шляхів підвищення механічних характеристик нанесених покриттів та підвищення експлуатаційної стійкості відновлених деталей. Представлено порівняльний аналіз одержаних результатів експериментальних досліджень механічних властивостей нанесених функціональних покриттів за стандартною технологією електроконтактного наплавлення та з використанням запропонованих технологічних прийомів, які дозволяють підвищити адгезійну міцність функціонального шару наплавленого електроконтактним методом покриття і знизити термічний вплив на структуру поверхневого шару основного металу деталей. Встановлено, що попереднє нанесення технологічного шару сприятливо впливає на процес формування функціонального покриття, запобігає зниженню залишкових напружень у зоні сплавлення за забезпечення інтенсифікації процесу електроконтактного наплавлення, що дозволяє знизити тепловкладення в основний метал виробу.

Ключові слова: електроконтактне наплавлення, механічні характеристики, підвищення стійкості, покриття.

Berezshna Olena, Malyhina Svetlana, Kassov Valeriy, Turchanin Dmytro, Berezshniy Maksym.
Improving the operational stability of parts by the method of combined processing

In the conditions of modern production and the need to save material and energy resources, the problem of developing resource-saving technologies for the restoration and repair of machine parts and units operating under conditions of intense wear is relevant, which leads to premature failure of equipment, reduces the service life of machines, as well as their productivity and affects the quality of operations performed. When carrying out equipment repair work, the process of restoring machine parts by applying coatings of the required thickness and possessing predetermined properties is widely used. These coatings can be obtained by electrocontact methods of applying a functional layer, which will effectively solve the urgent problem of extending the service life of machine parts and units. The paper studies the influence of technological features of surface restoration by the method of electrocontact surfacing of a functional layer in order to determine promising ways to improve the mechanical characteristics of the applied coatings and increase the operational durability of the restored parts. The article presents a comparative analysis of the obtained results of experimental studies of the mechanical properties of applied functional coatings using the standard technology of electrocontact surfacing and using the proposed technological methods that allow increasing the adhesive strength of the functional layer of the coating deposited by the electrocontact method and reducing the thermal impact on the surface structure. It has been established that preliminary application of the technological layer has a favorable effect on the process of forming the functional coating, prevents a decrease in residual stresses in the fusion zone while ensuring the intensification of the electrocontact surfacing process, which allows reducing heat input into the base metal of the product.

Keywords: electrocontact surfacing, mechanical properties, stability improvement, coating.

Вступ. Для відновлення та зміцнення швидкозношуваних вузлів широке застосування знаходять електроконтактні способи нанесення покриттів. Проте технологічні можливості таких методів оброблення обмежені низкою недоліків: наявністю тріщин, викришуванням наплавленого шару внаслідок низької міцності зчеплення покриття з основним металом за наплавлення на оптимальних режимах, а також виникненням залишкових напружень у зоні сплавлення покриття з поверхневим шаром виробу (у разі наплавлення сталевих стрічок і порошкових покриттів залишкові напруження становлять близько 0,7–0,8 межі плинності матеріалу покриття [1–4]. Удосконалення технології електроконтактного наплавлення спрямовано здебільшого на зниження тривалості термічного впливу на матеріал виробу та покриття шляхом скорочення часу імпульсу струму за одночасного збільшення його потужності, а також за рахунок підвищення опору в зоні контакту шару покриття з поверхнею виробу [5–6]. Проте такі методи локалізації тепловиділення не дозволяють істотно знизити термомеханічний вплив на матеріал покриття та поверхневого шару виробу. З огляду на це доцільним є застосування технологій комбінованого оброблення поверхні, що включають попереднє нанесення технологічного шару, який має температуру плавлення нижче температури плавлення функціонального шару, а отже, підвищує адгезійну активність матеріалу покриття в разі електроконтактного наплавлення на більш м'яких режимах [7–8].

Методи та методики дослідження. Процес комбінованої обробки поверхні включає такі операції: попереднє оброблення поверхні виробу; нанесення технологічного шару;

електроконтактне наплавлення функціонального шару. У разі нанесення покриттів невеликої товщини на плоскі поверхні, деталі складної форми, а також циліндричні поверхні застосовують дробоструминну обробку, якій піддавались зразки циліндричних деталей зі сталі 45 діаметром 50 мм. Оброблення проводили з використанням корундової крихти за тиску стиснутого повітря 0,4–0,6 МПа. Після дробоструминної обробки деталі обдували сухим стиснутим повітрям для видалення часток абразиву з поверхні. Перерва між дробоструминною обробкою та газополум'яним напиленням повинна бути мінімальною через те, що шорсткувата поверхня, маючи розвинену поверхню, є активною та легко окислюється.

Нанесення технологічного шару виконували методом газотермічного напилення, що дозволяє мінімізувати нагрів оброблюваної деталі за збереження особливостей структури та властивостей матеріалу. Для напилення застосовували самофлюсуючий гранульований порошок на основі нікелевого сплаву ПТ-19Н-01, який містить Fe, що сприятливо впливає на адгезію покриття до сталі в умовах швидкоплинності процесу електроконтактного наплавлення. Гранульований порошок просіювали віброситом на фракцію 40–160 мкм та просушували за температури 150–200 °С протягом 3–5 годин.

Сплав вибраного складу володіє мінімальним опором деформуванню за робочої температури та дозволяє знизити температуру, необхідну для оплавлення функціонального шару. Тепловий вплив на деталь за газополум'яного напилення становить близько 150–350 °С. Продуктивність процесу до 10 кг/г. Дистанція напилення за газополум'яного оброблення визначає швидкість та температуру часток, які

наноситься на поверхню, а також швидкість нагріву поверхні деталі. Тому для зниження термічного впливу на зразки напилення самофлюсуючих твердих сплавів проводили на відстані 200 мм зі швидкістю переміщення розпилювача 0,035 м/хв, тиском кисню та природного газу 0,5 та 0,07 МПа відповідно, а також зі швидкістю обертання зразка 10 об/хв. На поверхню циліндричних деталей наносили технологічний шар товщиною 50 мкм. Поверхня стрічок для електроконтактного наплавлення може містити різні види забруднень, як-от адсорбовані органічні плівки, абразивні частки, оксидні, нітридні та сульфідні з'єднання, тому перед початком процесу наплавлення стрічка проходила попередню підготовку та очищення. Знежирювання стрічки зі сталі 45 товщиною 0,5 мм проводили до повного зникнення жирових забруднень за допомогою гарячого 10%-го розчину їдкої натру. Видалення оксидів здійснювали піско-струминною обробкою корундом. Безпосередньо після нанесення технологічного шару та очищення стрічки проводили електроконтактне наплавлення на режимі: $P = 1,5$ кН; $I_{зв} = 6,5$ кА; $t_{зв} = 0,06$ с, час паузи становить 0,1 с. На ідентичних режимах виконували наплавлення стрічкою того ж типу на циліндричні зразки без попереднього нанесення технологічного шару. Застосовували електроконтактну машину шовного типу для роликового зварювання МШ-2201

з номінальною силою зварювального струму 9 кА та максимальним зусиллям стискання 6,8 кН.

Оцінювання якості формування покриттів проводили за допомогою стандартних методик: визначення ударної в'язкості, дослідження міцності зчеплення покриття на зріз, визначення втомної міцності зразків. Випробування зразків на ударну в'язкість показали, що за комбінованого оброблення поверхні результати на 19 % перевищують значення, одержані для зразків, наплавлених без технологічного шару, і становлять 32,5 Дж/см².

Результати та дискусії. Дослідження залишкових напружень свідчать, що після проведення електроконтактного наплавлення у функціональному шарі діють несприятливі залишкові напруження розтягування. Нанесення технологічного шару дозволяє зменшити їх величину шляхом зниження та більш рівномірного розподілу термічного впливу на зону сплавлення, що також запобігає появі структурних концентраторів напружень. Так, залишкові напруження в покритті без комбінованого оброблення досягають $0,78\sigma_m$ матеріалу покриття, а з використанням технологічного шару знижують на 37 % і становлять у середньому $0,29\sigma_m$. Оскільки відновлений шар зазнає впливу зусилля зсуву, міцність зчеплення з основним металом технологічного та функціонального шару досліджували

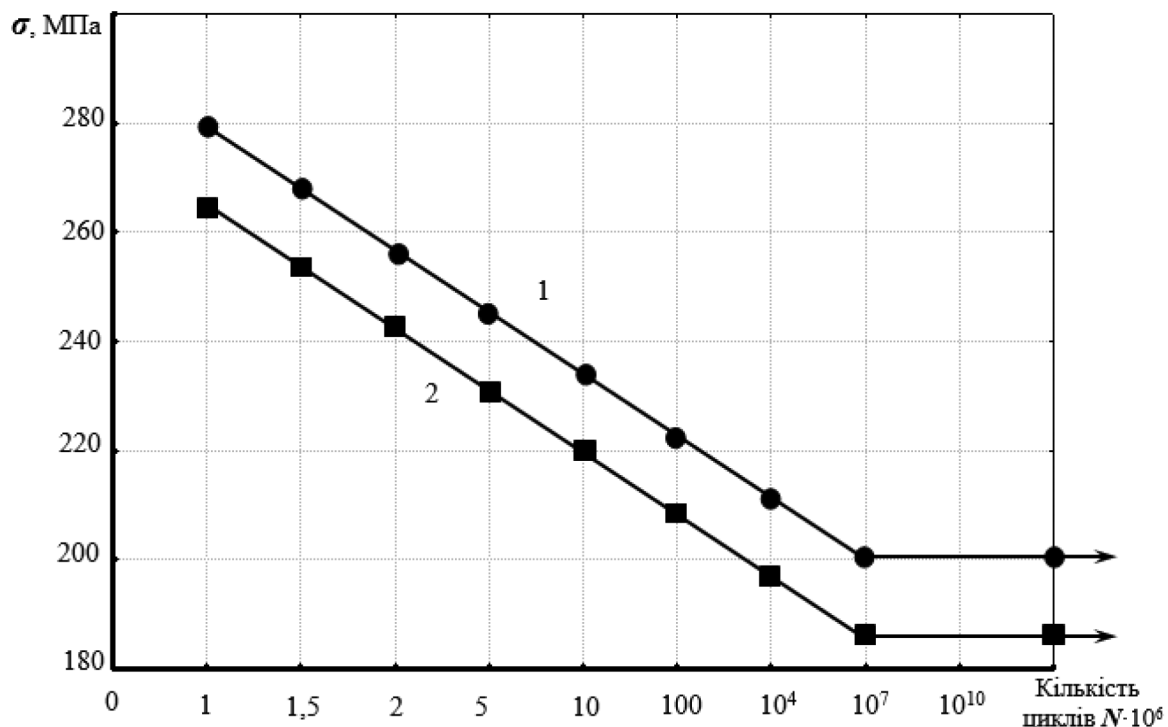


Рис. 1. Результати втомних випробувань циліндричних зразків зі сталі 45 у вихідному стані (1) та наплавлених за комбінованою технологією (2)

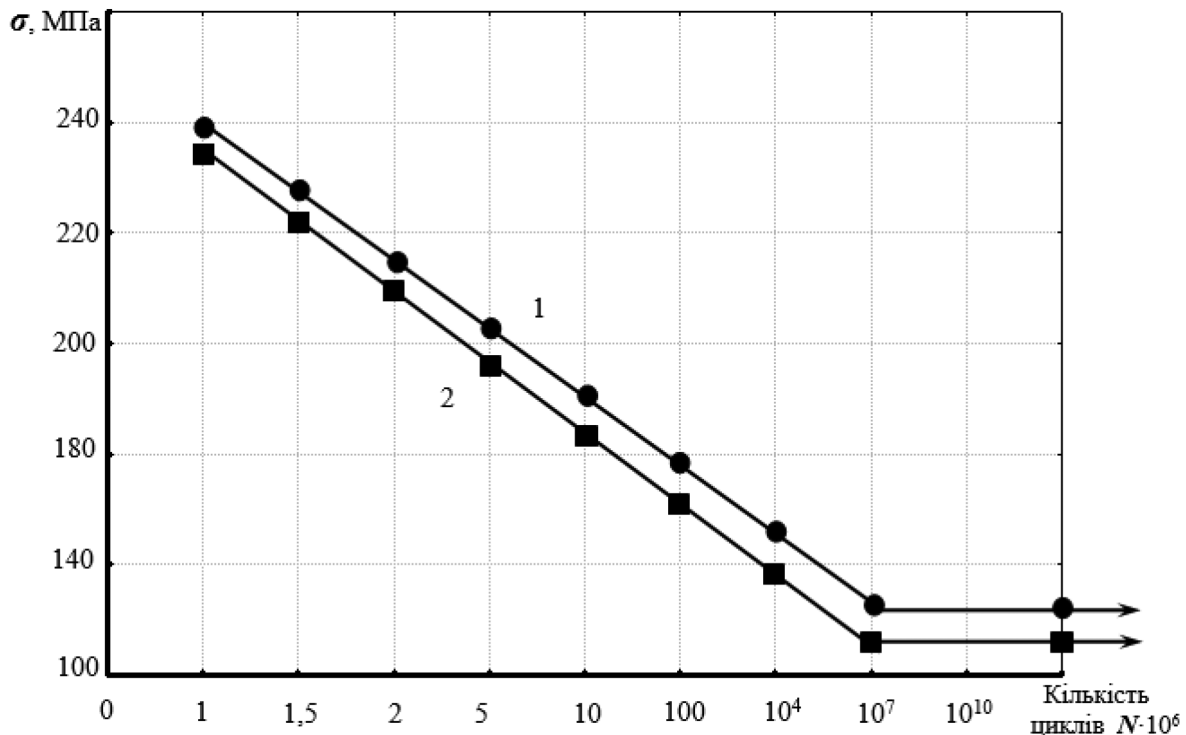


Рис. 2. Результати втомних випробувань циліндричних зразків з концентратором напружень зі сталі 45 у вихідному стані (1) та наплавлених за комбінованою технологією (2)

на зріз. Для визначення міцності зчеплення технологічного шару застосовували зразки, на центральну частину яких наносили покриття товщиною 0,05 мм. Частина зразку без покриття входить у матрицю, в разі вдавлення в яку під дією дотичних напружень відбувається відривання покриття. Величину міцності зчеплення при зсуві визначали як співвідношення зусилля навантаження зрізу до площі циліндричної поверхні. Аналогічним чином перевіряли міцність зчеплення з поверхнею виробу функціонального шару, нанесеного комбінованим обробленням. Результати випробувань становили 105,3 МПа для технологічного шару та 383 МПа – для покриття загалом. Зразки випробували на втомність за змінного вигину в одній площині. Випробуванням піддавали гладкі зразки та зі ступінчастим переходом. Результати втомних досліджень показали незначне зниження втомної міцності наплавлених деталей, порівняно з вихідними зразками (рис. 1, 2).

Середнє значення твердості напиленого шару до проведення етапу електроконтактного наплавлення становило 35HRC, а твердість функціонального шару після комбінованого оброблення поверхні знаходиться в межах 42–45 HRC.

Висновки. Встановлено, що ефективним напрямом підвищення довговічності та експлуатаційної стійкості деталей є метод комбінованого оброблення поверхні виробу, що забезпечує інтенсифікацію процесу наплавлення шляхом попереднього активування поверхні деталі за допомогою нанесення технологічного шару. Застосування комбінованої технології нанесення покриттів дозволяє зменшити термомеханічний вплив на деталь за підвищення адгезійної стійкості покриттів, завдяки чому знижується рівень залишкових напружень у зоні сплавлення та підвищується міцність зчеплення функціонального шару з поверхнею виробу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Hamed M., Atashparva M. A review of electrical contact resistance modeling in resistance spot welding. *Welding in the World*. 2017. V. 61. P. 269–290. <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0419-4>
2. Wei P. S., Wu T. H. Electrical contact resistance effect on resistance spot welding. *International journal of heat and mass transfer*. 2012. V. 55. № 11–12. P. 3316–3324. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.01.040>
3. Marchenko D. et al. Research of Electric Contact Welding by a Wire at Restoration of Details of Cars. 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). 2021. P. 1–5.

4. Aslanlar S. et al. Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding. *Materials & Design*. 2008. V. 29. № 7. P. 1427–1431. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.09.004>
5. Berezshnaya O. V., Kassov V. D., Gribkov E. P. Combined Technology for the Parts Recovery Operating in Stress Factor Conditions. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2020. URL: https://www.researchgate.net/publication/340326835_Combined_Technology_for_the_Parts_Recovery_Operating_in_Stress_Factor_Conditions
6. 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. P. 9–16. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1045.9>
7. Guzanová A. et al. A study of the effect of surface pre-treatment on the adhesion of coatings. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2014. V. 28. № 17. P. 1754–1771. <https://doi.org/10.1080/01694243.2014.920762>
8. Dobrzański L. A., Dobrzański L. B., Dobrzańska-Danikiewicz A. D. Manufacturing technologies thick-layer coatings on various substrates and manufacturing gradient materials using powders of metals, their alloys and ceramics. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2020. V. 99. № 1. P. 14–41. DOI: 10.5604/01.3001.0014.1598

REFERENCES:

1. Hamed, M., & Atashparva, M. (2017). A review of electrical contact resistance modeling in resistance spot welding. *Welding in the World*. V. 61. P. 269–290. <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0419-4>
2. Wei, P. S., & Wu, T. H. (2012). Electrical contact resistance effect on resistance spot welding. *International journal of heat and mass transfer*. V. 55. № 11–12. P. 3316–3324. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.01.040>
3. Marchenko, D. et al. (2021). Research of Electric Contact Welding by a Wire at Restoration of Details of Cars. 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). P. 1–5.
4. Aslanlar, S. et al. (2008). Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding. *Materials & Design*. V. 29. № 7. P. 1427–1431. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.09.004>
5. Berezshnaya, O. V., Kassov, V. D., & Gribkov, E. P. (2020). Combined Technology for the Parts Recovery Operating in Stress Factor Conditions. *Advances in Materials Science and Engineering*. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/340326835_Combined_Technology_for_the_Parts_Recovery_Operating_in_Stress_Factor_Conditions
6. 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*. P. 9–16. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1045.9>
7. Guzanová, A. et al. (2014). A study of the effect of surface pre-treatment on the adhesion of coatings. *Journal of Adhesion Science and Technology*. V. 28. № 17. P. 1754–1771. <https://doi.org/10.1080/01694243.2014.920762>
8. Dobrzański, L. A., Dobrzański, L. B., & Dobrzańska-Danikiewicz, A. D. (2020). Manufacturing technologies thick-layer coatings on various substrates and manufacturing gradient materials using powders of metals, their alloys and ceramics. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. V. 99. № 1. P. 14–41. DOI 10.5604/01.3001.0014.1598