

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.91

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).2.13-22](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).2.13-22)

Б.А. Ляшенко, проф., д-р техн. наук, **Л.А. Лопата**, доц., канд. техн. наук
Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренко НАН України, м. Київ, Україна

В.Н. Лопата, канд. техн. наук, наук.співр.

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, м. Київ, Україна

Н.П. Забойкіна, викл.

Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: beryuza@ukr.net; gazoterm@ukr.net; nataliazaboykina@gmail.com

Альтернативна технологія поверхневого зміцнення внутрішніх поверхонь довгомірних деталей

Розглянуто проблему підвищення живучості стволів танкових гармат шляхом нанесення захисних покриттів. Дана їх коротка характеристика та межі застосування. Однак вирішення проблеми забезпеченні зміцнення, відновлення та підвищення строку служби довгомірних деталей (стволів вітчизняних танкових гармат) існуючими технологіями пов'язано зі складністю підготовки й обробки внутрішньої поверхні (каналу ствола) по всій довжині та виключення можливих залишкових деформацій. Запропоновано альтернативну технологію поверхневого зміцнення електроконтактним припіканням порошкових матеріалів. Ця технологія дозволяє наносити покриття товщиною до 3 мм, з міцністю зчеплення до 200 МПа та щільності, що наближається до щільності компактного матеріалу.

електроконтактне припікання, зміцнюючі захисні покриття, термін служби, фізико-механічні властивості

Постановка проблеми. Живучість стволів є основним показником танкових гармат. З метою забезпечення конкурентоспроможності української бронетехніки на зовнішньому ринку озброєнь виникла потреба у забезпеченні живучості стволів вітчизняних танкових гармат на рівні найкращих світових зразків [1-3]. Вирішення проблеми забезпеченні зміцнення, відновлення та підвищення строку служби довгомірних деталей (стволів вітчизняних танкових гармат) пов'язано зі складністю підготовки й обробки внутрішньої поверхні (каналу ствола) по всій довжині та виключення можливих залишкових деформацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для забезпечення живучості стволів з метою захисту поверхні каналу ствола від порохової ерозії та механічного стирання використовуються зміцнюючі захисні покриття (ЗЗП) [4-9]. До них відносяться електрохімічне осадження [4, 6-8, 10, 11], газотермічне напилення (ГТН) [4, 6-9, 12-14], осадження захисних покриттів у вакуумі [15-17], а також способи, що дозволяють зміцнити поверхневі шари деталей, що обробляються шляхом лазерної обробки (ЛО) [6-8, 18], електроіскрового легування (ЕІЛ) [19, 20] та ін. [4-9, 21, 22]. Збільшення терміну служби виробів, що працюють в умовах ударних механічних та теплових навантажень, може бути досягнуто при нанесенні гальванічних металевих покриттів [10, 11]. Найбільшого поширення в промисловості набули хромові покриття та сплави на основі хрому, що наносяться електрохімічним способом [6-8]. Завдяки хрому підвищується стійкість каналу ствола проти впливу порохових газів, його жароміцність та зносостійкість [4]. Однак хромове покриття руйнується при стрільбі, що зумовлено

невисокою міцністю адгезії та когезії хромових покриттів, а також їх крихкістю [4]. Тому найперспективнішим є електроіскровий метод обробки (ЕІО). Електроіскрове легування (ЕІЛ) [19, 20] дозволяє переносити на оброблювану поверхню будь-які струмопровідні метали, у тому числі і тугоплавкі метали, та їх з'єднання. Крім того, виключаються зміна фізико-механічних властивостей оброблюваної деталі та її теплова деформація (процес холодний), спрощується весь технологічний процес та обладнання. Недоліком електроіскрового методу обробки є те, що цей спосіб використовується для зміцнення поверхонь каналів стволів невеликих калібрів і довжин, а також низька продуктивність процесу і необхідність фінішної механічної обробки.

Розроблено спосіб аргонно-дугового гарту внутрішньої поверхні стволів, який є придатним для зміцнення стволів з'являється будь-якого калібру [4]. Однак, запропонована технологія не дозволяє наносити зміцнювальні покриття необхідних товщин, а високі температури процесу негативно впливають на властивості робочих поверхонь деталей.

В даний час для нанесення зміцнюючого захисного покриття на всю довжину напрямної частини каналу ствола використовується метод іонно-плазмового осадження хрому та технологія плакування зварюванням вибухом [4]. Метод іонно-плазмового осадження хрому вимагає проектування та будівництва установки, що дозволяє проводити обробку поверхні каналу ствола по всій довжині, а також тщательную підготовку поверхні та обробку процесу нанесення покриття з метою забезпечення надійної адгезії матеріалу покриття з матеріалом ствола [4]. В даний час технологія плакування зварювання вибухом забезпечує плакування внутрішніх поверхонь труб на довжині 10-12 калібрів (у випадку 125-мм ствола – 1250 ... 1500 мм) [4]. Додатково складністю довгомірного плакування є виключення можливих залишкових деформацій після проведення вибухових робіт [4].

Тому актуальним напрямом при зміцненні стволів є розробка та дослідження зміцнювальних технологій на внутрішні поверхні труб довжиною до 5 ... 6 м та відновлення стволів танкових гармат досягли граничного зносу [4].

Постановка завдання. Запропонувати альтернативну технологію зміцнення та відновлення внутрішніх поверхонь труб довжиною до 5 ... 6 м та стволів танкових гармат.

Виклад основного матеріалу. До альтернативних технологій можна віднести технологію електроконтактного припікання покриттів (ЕКПП) [23-25], яка дозволяє наносити покриття товщиною до 3 мм, щільністю до щільності компактного матеріалу і міцності зчеплення до 220 МПа. Електроконтактне припікання гарантує збереження в покритті вихідних властивостей його матеріалу. Процес здійснюється під тиском при прямому пропусканні електричного струму (рис. 1) [23-25].

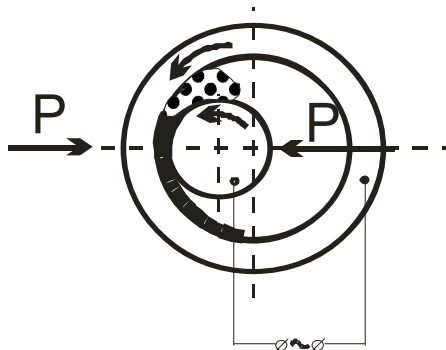


Рисунок 1 - Технологічна схема електроконтактного припікання на внутрішні поверхні циліндричних деталей

Джерело: розроблено авторами на підставі [23, 25]

Електроконтактний спосіб є найбільш перспективним способом зміцнення відновлення, так як він відноситься до способів з мінімально необхідним нагріванням, тим самим, виключаючи термічне деформування деталей, що зміцнюються (ця технологія дозволить усунути такий найбільш характерний дефект каналу ствола, як його роздуття і викривлення). Зона термічного впливу (ЗТВ) на зміцнюєму поверхню становить 0,02...0,3 мм. Відсутність рідкої фази при нанесенні покриттів значно розширює можливості застосування процесу зміцнення поверхонь деталей методом електроконтактного припікання, що дозволяє збільшити товщину формуємого зносостійкого шару в 3 ... 6 разів [23-25]. При відновленні та зміцненні робочих поверхонь деталей електроконтактним припіканням доцільно застосовувати режим процесу, що характеризується силою струму 15 ... 30 кА; тиском припікання до 100 МПа, часом імпульсу 0,04 ... 0,2 с; часом паузи 0,04 ... 0,2 с. Швидкості нагріву при електроконтактному припікання можуть досягати 10^3 ... 10^4 К/с [23-25]. Слід зазначити, що наявність оксидних плівок на зміцнюємих поверхнях практично не знижує міцність зчеплення покриття, так як плівка має високий електроопір і найбільш інтенсивно нагрівається імпульсом струму з подальшим її видаленням із зони опору [23-25].

Нанесення покриття електроконтактним методом може проводитися з попереднім формуванням порошкового шару або в вільно насипанному стані. Попереднє формування шару здійснюється введенням у шихту пластифікатора, з використанням мідної або латунної фольги товщиною 0,1 ... 0,2 мм, попереднім спіканням порошкових брикетів, напиленням [23-25].

Для припікання використовувався спеціально розроблений електрод-інструмент (рис. 2) виготовлений з мідного сплаву, дисперсно-армованого твердими частинками, який дозволяє поєднувати в одній операції нанесення покриттів та фінішну обробку методом пластичного поверхневого деформування (ППД) до граничного розміру, чистоти поверхні та щільності [26].



Рисунок 2 - Електрод-інструмент для нанесення покриття

Джерело: розроблено авторами

Нанесення покриття на внутрішні циліндричні поверхні показано на рис. 3.

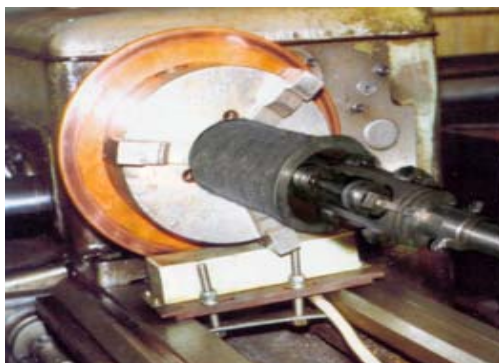


Рисунок 3 - Нанесення покриття на внутрішні циліндричні поверхні

Джерело: розроблено авторами

Висока міцність зчеплення та щільність покриттів пов'язані з такими особливостями технології, як режимами припикання (температура процесу становить (0,8 ... 0,9)Тпл основного компонента матеріалу покриття), малою зоною термічного впливу (рис.4, а) струму на деталь, відсутністю перемішування матеріалів покриття та основи (рис. 4, б), збереженням у покритті легуючих елементів (рис. 5) та їх вихідних властивостей. При дослідженні використовували композиційний порошок КХН-3 (70%Cr₃C₂ та 30% ніхрому (Ni-Cr 80/20)), Електроконтактне припикання відноситься до імпульсних технологій і може виключити подальшу механічну обробку покриттів [23-25].

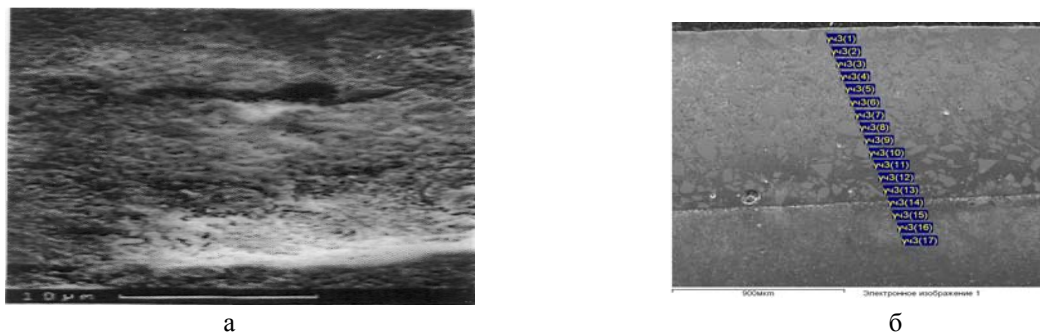
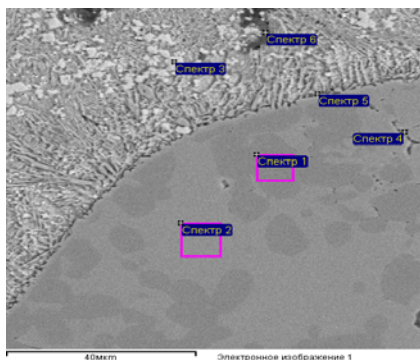


Рисунок 4 - Зона термічного впливу x1000 (а) та характер перехідної зони (б)
Матеріал покриття – композиційний порошок КХН-30: Cr₃C₂ (80%) + Ni (20%)

Джерело: розроблено авторами

Висока адгезійна міцність забезпечується перехідною зоною (рис. 4, б та 5, а), яка утворюється під впливом прискореної дифузії при імпульсному впливі електричного струму та явища електроміграції [27, 28].

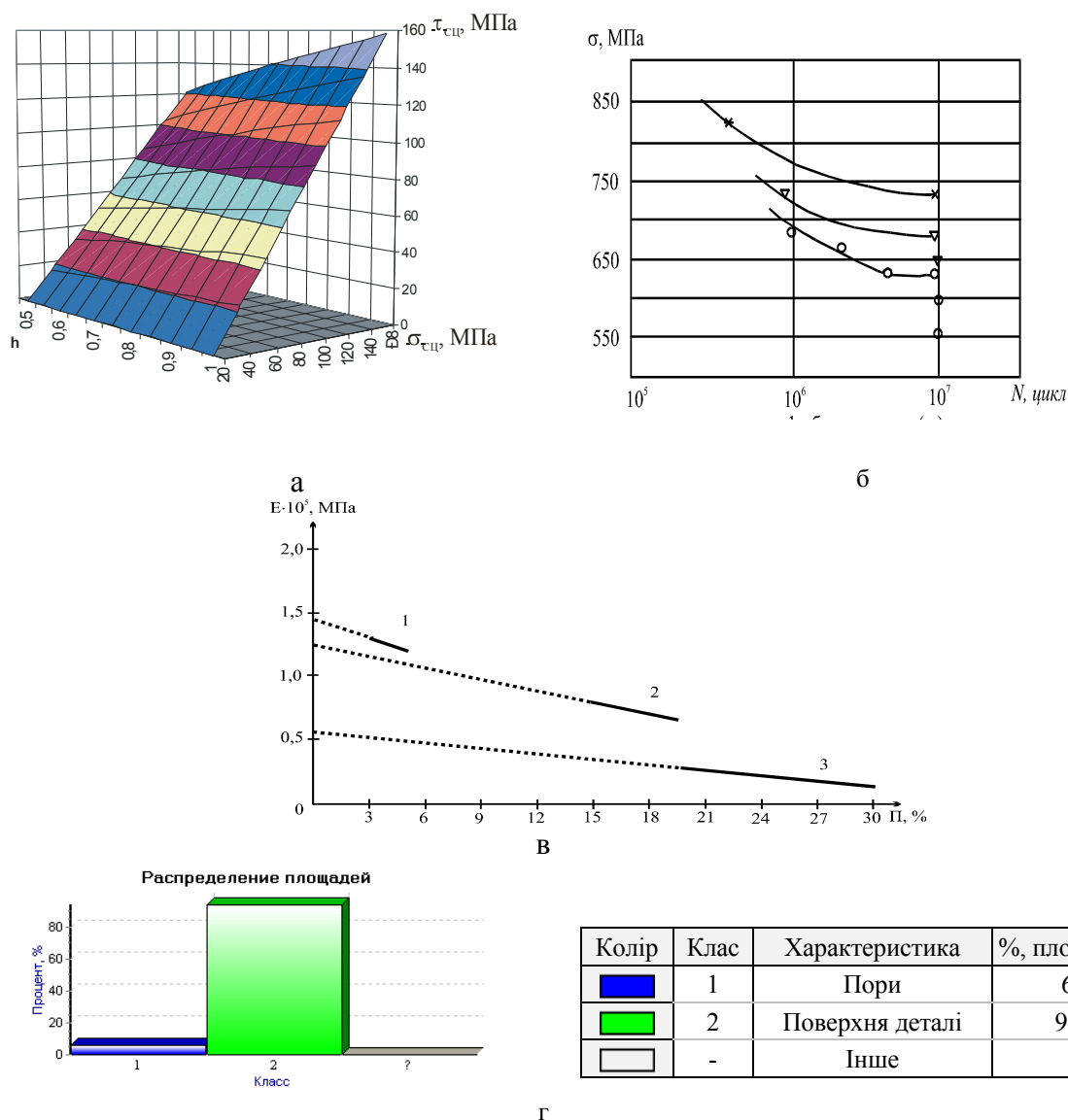


Спектр	C	O	Cr	Fe	Ni
Спектр 1	14.18		84.16	1.66	
Спектр 2	10.53		75.11	14.36	
Спектр 3	35.79	1.94	3.16		1.31
Спектр 4	18.68	13.13	45.63	2.05	5.65
Спектр 5	12.37		37.77	11.74	36.18
Спектр 6	19.97	15.86	16.53	4.37	13.12

Рисунок 5 - Розподіл легуючих елементів у покритті та зміцнюємій поверхні деталі.
Матеріал покриття – композиційний порошок КХН-30: Cr₃C₂ (80%) + Ni (20%)

Джерело: розроблено авторами

Проведені дослідження властивостей покриттів показали, що їх когезійна та адгезійна міцність знаходяться в межах 160 ... 220 МПа (рис. 6, а) [28]. Межа витривалості підвищується в 5 ... 10 разів (рис.6, б), а щільність покриттів наблизилася до щільності компактного матеріалу (рис. 6, в) [28, 29].



○ - без покриття; △ - із напильним покриттям; ☆ - з покриттям, отриманим ЕКП;
 1 – покриття, отримане електроконтактним припиканням; 2 – покриття, отримане електродуговим напильням; 3 – покриття, отримане газополуменевим напильням
 а) когезійна та адгезійна міцність; б) межа витривалості; в, г) щільність покриттів та результати кількісного стереологічного аналізу щільності покриттів, отриманих електроконтактним методом при тиску 40 МПа

Рисунок 6 - Властивості покриттів, отримані електроконтактним припиканням

Джерело: розроблено авторами на підставі [28, 29]

При мінімумі керованих технологічних параметрів процесу електроконтактного припикання (силі та тривалості імпульсів струму, тиску електрода) здійснюється гнучке управління властивостями покриттів.

Висновки. Вирішення проблеми забезпеченні зміцнення, відновлення та підвищення строку служби довгомірних деталей (стволів вітчизняних танкових гармат) пов'язано зі складністю підготовки й обробки внутрішньої поверхні (каналу ствола) по всій довжині та виключення можливих залишкових деформацій.

Для забезпечення живучості стволів з метою захисту поверхні каналу ствола від порохової ерозії та механічного стирання використовуються зміцнюючі захисні покриття: електрохімічне осадження, газотермічне напилення, осадження у вакуумі, лазерну обробку, електроіскрового легування, аргонно-дугове гартування, іонно-плазмове осадження хрому, плакування зварюванням вибухом та ін. Однак вирішення проблеми забезпеченні зміцнення, відновлення та підвищення строку служби довгомірних деталей (стволів вітчизняних танкових гармат) існуючими технологіями пов'язано зі складністю підготовки й обробки внутрішньої поверхні (каналу ствола) по всій довжині та виключення можливих залишкових деформацій.

Запропонувати альтернативну технологію зміцнення та відновлення внутрішніх поверхонь труб довжиною до 5 ... 6 м (стволів танкових гармат) електроконтактного припікання покриттів. Електроконтактний спосіб є найбільш перспективним способом зміцнення та відновлення, так як він відноситься до способів з мінімально необхідним нагріванням, тим самим, виключаючи термічне деформування деталей, що зміцнюються (ця технологія дозволить усунути такий найбільш характерний дефект каналу ствола, як його роздуття і викривлення). Пропонуєма технологія дозволяє наносити покриття товщиною до 3 мм, щільністю до щільності компактного матеріалу і міцності зчеплення до 220 МПа.

Список літератури

1. Бондаренко Л.І. Порівняльний аналіз тактико-технічних характеристик артилерійських систем провідних країн світу та Зброєних сил України. *Збірник узагальнених довідково-аналітичних матеріалів*. 1999. С. 45.
2. Foss C.F. *Jane's tank and combat vehicle recognition guide*. Glasgow: Harper Collins Publishers. 1996. 510 p.
3. Терещенко В.І. Деякі проблеми визначення оперативно-тактичних вимог до перспективних зразків артилерійського озброєння. *Артилерійське та стрілецьке озброєння*. 2000. Вип. 2. №5. С. 12-15.
4. Богуслаєв О.В. Підвищення життєвого циклу оснащення на основі захисних технологій: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.07.04 / Нац. аерокосм. ун-т ім. Н.Е. Жуковського "Харків. авіац. ін-т." Харків, 2002. 25 с.
5. Мірненко В.І. Захисні покриття на лопатках компресора силових установок військового ризначення. *Труди Академії*. 2004. №49. С. 222-227.
6. Інженерія поверхні / Ющенко К.А. та ін. Київ, Наукова думка. 2007. 559 с.
7. Пашенко В.М., Кузнєцов В.Д., Солодкий С.П. Проблеми ефективності захисних покриттів у інженерії поверхні машин і обладнання. *Вестник Національного технічного університету України «КПІ»*. 2006. № 49. С. 178-187.
8. Фесенко А.Г., Бечке К.В., Манжеліївський С.В. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин: навч. посіб. Д.: РВВ ДНУ. 2015. 104 с.
9. Значення методів обробки відновлених поверхонь в забезпеченні їх якості і ресурсу відремонтованих деталей / Ковальов М.Ф. та ін. *Інженерія поверхні та реновація виробів: матеріали 20-ї Міжнародної науково-технічної конференції (01–05 червня 2020 р., м. Київ)*. Київ: АТМ України, 2020. С. 40-43.
10. Духота О.І. Науково-технічні основи підвищення довговічності деталей авіаційних трибомеханічних систем за умов їх фретинг-контактної взаємодії: дис. на здобуття наукового ступеня д-ра техн. наук: 05.02.04 / Національний авіаційний університет. Київ, 2019.
11. Вплив технологічних параметрів процесу електрохімічного хромування на експлуатаційні властивості покриттів / Роп'як Л.Я. та ін. *Вісник Сумського національного аграрного*

- університету Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». 2021. Вип. 3 (45). С. 48-56.
12. Lopata O., Smirnov I., Vihilianska N. Use of steel gas thermal coatings to increase wear resistance of parts. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*. 2022. Vol. 105. No. 1. 108–117. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.01.
 13. Espallargas, N. Future Development of Thermal Spray Coatings. 2015, Elsevier Ltd. 286 p. https://www.asminternational.org/edfas/uncategorized/journal_content/56/10192/26188941/PUBLICATION/.
 14. Edward J. Gildersleeve, Robert Vaßen. Thermally Sprayed Functional Coatings and Multilayers: A Selection of Historical Applications and Potential Pathways for Future Innovation *Journal of Thermal Spray Technology*. Pub. Date: 2023-04-27. <https://www.x-mol.net/paper/article/1651623814354448384>. DOI:10.1007/s11666-023-01587-1
 15. Вплив вакуум плазмових покриттів на газообразивну стійкість конструкційних елементів силових установок літальних апаратів військового призначення з титанових сплавів / Колесник В.І. та ін. *Зб. наук. пр. ЦНДІ ЗС України*. 2004. №1 (26). С. 199 -207.
 16. Мірненко В.І. Вакуум-плазмовий метод нанесення багатофункціональних покриттів на лопатки компресора силових установок літальних апаратів військового призначення. *Зб. наук. пр. "Труди академії"*. 2004. №50. С. 276-282.
 17. Рутковський А.В. Конструктивна міцність матеріалів з вакуум-плазмовими покриттями: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. Київ, 2000. 17 с.
 18. Shuja S.Z., Yilbas B.S. Laser melting of alumina-coated steel. *AIChE Journal*. 2011. 57. №9. P. 2547-2554.
 19. Soma Raju K., Faisal N.H., Srinivasa Rao D., Joshi S.V., Sundararajan G. Electro-spark coatings for enhanced performance of twist drills. *Surface and Coatings Technology*. 2008. Vol. 202. №9. P. 1636-1644.
 20. Аналіз міцностних характеристик електроіскрових покриттів / Токарук В.В. та ін. *Проблеми тертя та зношування*. 2021. №3 (92). С. 47-53.
 21. Захист поверхонь тертя дискретними поверхнями / Марчук В. Є. та ін. *Проблеми тертя та зношування*. 2013. №2 (61). С. 80 – 87.
 22. Варваров В.В. Підвищення ресурсу трибосистем в агрегатобудуванні переведенням їх в режим аномально низького тертя та зношування: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.02.04 / Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Харків, 2021. 192с.
 23. Lopata L., Lyashenko B. The technology of electrocontact sintering as an alternative to welding. *Materials science of refractory compounds: materials 4th international samsonov memorial conference* (May 21-23, 2014, Frantsevych Institute for Problems of Materials Science of NASU Kyiv, Ukraine). Kyiv, 2014. P. 95-96.
 24. L. A. Lopata, V. M. Kulyzhskiy, O.V. Lopata, I.V. Smirnov Computational and experimental determination of the density and adhesion strength of powder coatings applied by the electrocontact method. Message 1. Sealing of coatings. *Strength of materials*. 2023. Vol. 55. No4. <https://www.springer.com/journal/11223>
 25. Канарчук В.Є. та ін. Електроконтактне зміцнення як метод інженерії поверхні деталей транспортних засобів при їх виготовленні і відновленні. *Вісник / Збірник наукових праць транспортного університету та транспортної академії України*. 2001. Вип. №5. С. 3-6.
 26. Патент України № 37465А. Електрод для електроконтактного припікання порошків. Лопата Л.А. Опубл. 15.05.2001. Бюл. №4.
 27. Смирнов І.В., Лопата О.В., В.Ф. Мазанко Вплив електропластичного ефекту на дифузійні процеси при електроконтактному припіканні. *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2021)*: матеріали тез доповідей XI Міжнародної науково-практичної конференції (26 - 27 травня 2021 р. м. Чернігів). Чернігів: Національний університет "Очернігівська політехніка". Том 2, С. 19-30. URL: <https://conference-Chernihiv-polytechnic.com/materiali-konferentsiyi/kzyatps-2021/Tezy-2021-Part-2.pdf>
 28. Смирнов І.В., Лопата О.В., Зіньковський А.П. Кобзарь В.Л. Адгезійна міцність та залишкові напруження в покриттях, отриманих електроконтактним методом» *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*: матеріали XII Міжнар. наук.-практ. конф. (25 - 26 травня 2022 р., м. Чернігів). Чернігів, Національний університет «Чернігівська політехніка». 2022. Т. 2. С. 52-55. URL: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcglclefindmkaj/https://conference-chernihiv-polytechnic.com/wp-content/uploads/2023/03/Tezy-2022-Part-5-52.pdf>

29. O. Lopata, I. Smirnov, A. Zinkovskii Dependence of the elastic modulus of powder coatings on their porosity in electrical contact hardening *International Scientific Journal Problems of Tribology*. Vol 26 No4/102 (2021) C. 28-33. DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-102-4>.

Referenses

1. Bondarenko, L.I. (1999). Porivnial'nyj analiz taktyko-tekhnichnykh kharakterystyk artylerijs'kykh system providnykh krain svitu ta Zbroienykh syl Ukrainy [Comparative analysis of the tactical and technical characteristics of the artillery systems of the leading countries of the world and the Armed Forces of Ukraine]. *Zbirnyk uzahal'nenykh dovidkovo-analitychnykh materialiv - A collection of generalized reference and analytical materials*, 45 [in Ukrainian].
2. Foss, C.F. (1996). *Jane's tank and combat vehicle recognition guide*. Glasgow: Harper Collins Publishers. 510 p.
3. Tereschenko, V.I. (2000). Deiaki problemy vyznachennia operatyvno-taktychnykh vymoh do perspektyvnykh zrazkiv artylerijs'koho ozbroiennia [Some problems of determining the operational and tactical requirements for perspective samples of artillery weapons]. *Artylerijs'ke ta strilets'ke ozbroiennia - Artillery and small arms*, 2, 5, 12-15 [in Ukrainian].
4. Bohuslaiev, O.V. (2002). Pidvyschennia zhyttievoho tsykladu osnaschennia na osnovi zakhysnykh tekhnolohij [Increasing the life cycle of equipment based on protective technologies]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kharkiv [in Ukrainian].
5. Mirnenko, V.I. (2004). Zakhysni pokryttia na lopatkakh kompresora sylovykh ustanovok vijs'kovoho ryznachennia [Protective coatings on compressor blades of military-grade power plants]. *Trudy Akademii - Proceedings of the Academy*, 49, 222-227 [in Ukrainian].
6. Yuschenko, K.A. et al. (2007). *Inzheneriia poverkhni [Surface engineering]*. Kyiv, Naukova dumka [in Ukrainian].
7. Paschenko, V.M., Kuznietsov, V.D. & Solodkyj, S.P. (2006). Problemy efektyvnosti zakhysnykh pokryttiv u inzhenerii poverkhni mashyn i obladnannia [Problems of the effectiveness of protective coatings in surface engineering of machines and equipment]. *Vestnyk Natsional'noho tekhnicheskoho unyversyteta Ukrainy «KPY» - Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI"*, 49, 178-187 [in Ukrainian].
8. Fesenko, A.H., Bechke, K.V. & Manzheliivs'kyj, S.V. (2015). *Metody poverkhnevoho zmitsnennia u protsesi vyhotovlennia detalej mashyn [Methods of surface hardening in the process of manufacturing machine parts]*. D.: RVV DNU [in Ukrainian].
9. Koval'ov M.F. et al. (2020). Znachennia metodiv obrobky vidnovlenykh poverkhon' v zabezpechenni ikh iakosti i resursu vidremontovanykh detalej [The importance of methods of processing restored surfaces in ensuring their quality and service life of repaired parts]. *Surface engineering and product renovation: 20-a Mizhnarodna naukovo-tekhnichna konferentsiia (01–05 chervnia 2020 r.) - Proceedings of the 20th International Scientific and Technical Conference (40-43)*. Kyiv: ATM Ukrainy [in Ukrainian].
10. Dukhota, O.I. (2019). Naukovo-tekhnichni osnovy pidvyschennia dovhovichnosti detalej aviatsijnykh trybomekhanichnykh system za umov ikh fretynh-kontaktnoi vzaiemodii [Scientific and technical bases of increasing the durability of parts of aviation tribomechanical systems under the conditions of their fretting-contact interaction]. *Doctor's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
11. Rop'iak, L.Ya. et al. (2021). Vplyv tekhnolohichnykh parametriv protsesu elektrokhimichnogo khromuvannia na ekspluatatsijni vlastyvoli pokryttiv [The influence of technological parameters of the electrochemical chromium plating process on the operational properties of coatings]. *Visnyk Sums'koho natsional'noho ahrarnoho universytetu Seriia «Mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychykh protsesiv» - Bulletin of the Sumy National Agrarian University Series "Mechanization and automation of production processes"*, 3 (45), 48-56 [in Ukrainian].
12. Lopata, O., Smirnov, I. & Vihilianska N. (2022). Use of steel gas thermal coatings to increase wear resistance of parts. *Scientific Journal of TNTU (Tern)*, 105, 1, 108–117. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2022.01.
13. Espallargas, N. (2015). *Future Development of Thermal Spray Coatings*, Elsevier Ltd. 286 p. https://www.asminternational.org/edfas/uncategorized/journal_content/56/10192/26188941/PUBLICATION/.
14. Edward J. Gildersleeve & Robert Vaßen. Thermally Sprayed Functional Coatings and Multilayers: A Selection of Historical Applications and Potential Pathways for Future Innovation *Journal of Thermal Spray Technology*. Pub. Date: 2023-04-27. DOI:10.1007/s11666-023-01587-1. <https://www.xmol.net/paper/article/1651623814354448384>

15. Kolesnyk, V.I. et al. (2004). Vplyv vakuum plazmovykh pokryttiv na hazoabrazyvnu stijkist' konstruksijnykh elementiv sylovykh ustanovok lital'nykh aparativ vijs'kovoho pryznachennia z tytanovykh splaviv [The influence of vacuum plasma coatings on the gas abrasion resistance of structural elements of power plants of military aircraft made of titanium alloys]. *Zb. nauk. pr. TsNDI ZS Ukrainy - Coll. of science Ave. TsNDI of the Armed Forces of Ukraine, 1 (26)*, 199 -207 [in Ukrainian].
16. Mirnenko, V.I. (2004). Vakuum-plazmovyj metod nanesennia bahatofunktsional'nykh pokryttiv na lopatky kompresora sylovykh ustanovok lital'nykh aparativ vijs'kovoho pryznachennia [Vacuum-plasma method of applying multifunctional coatings on compressor blades of power plants of military aircraft]. *Zb. nauk. pr. "Trudy akademii" - Coll. of science Ave. "Works of the Academy", 50*, 276-282 [in Ukrainian].
17. Rutkovsk'ij, A.V. (2000). Konstruktyvna mitsnist' materialiv z vakuum-plazmovymy pokryttiamy [Structural strength of materials with vacuum-plasma coatings]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].
18. Shuja, S.Z. & Yilbas, B.S. (2011). Laser melting of alumina-coated steel. *AIChE Journal, 57, 9*, 2547-2554.
19. Soma Raju K., Faisal, N.H., Srinivasa Rao D., Joshi S.V. & Sundararajan G. (2008). Electro-spark coatings for enhanced performance of twist drills. *Surface and Coatings Technology, 202, 9*, 1636-1644.
20. Tokaruk, V.V. et al. (2021). Analiz mitsnostnykh kharakterystyk elektroiskrovykh pokryttiv [Analysis of strength characteristics of electrospark coatings]. *Problemy tertia ta znoshuvannia - Friction and wear problems, 3 (92)*, 47-53 [in Ukrainian].
21. Marchuk, V. Ye. et al. (2013). Zakhyst poverkhon' tertia dyskretnymi poverkhniamy [Protection of friction surfaces with discrete surfaces]. *Problemy tertia ta znoshuvannia - Friction and wear problems, 2 (61)*, 80 – 87 [in Ukrainian].
22. Varvarov, V.V. (2021). Pidvyschennia resursu trybosystem v ahrehatobuduvanni perevedenniam ikh v rezhym anomal'no nyz'koho tertia ta znoshuvannia [Increasing the resource of tribosystems in aggregate construction by transferring them to the mode of abnormally low friction and wear]. *Candidate's thesis*. Kharkiv [in Ukrainian].
23. Lopata, L. & Lyashenko, B. (2014). The technology of electrocontact sintering as an alternative to welding. *Materials science of refractory compounds: materials 4th international samsonov memorial conference (May 21-23, 2014, Frantsevych Institute for Problems of Materials Science of NASU Kyiv, Ukraine)*. Kyiv. 2014. P. 95-96.
24. Lopata, L. A., Kulyzhskiy, V. M., Lopata, O.V. & Smirnov I.V. (2023) Computational and experimental determination of the density and adhesion strength of powder coatings applied by the electrocontact method. Message 1. Sealing of coatings. *Strength of materials, 55, 4* <https://www.springer.com/journal/11223>
25. Kanarchuk, V.Ye. et al. (2001). Elektrokontaktne zmitsnennia iak metod inzhenerii poverkhni detalej transportnykh zasobiv pry ikh vyhotovlenni i vidnovlenni [Electrocontact hardening as a method of surface engineering of vehicle parts during their manufacture and restoration]. *Zbirnyk naukovykh prats' transportnoho universytetu ta transportnoi akademii Ukrainy - Bulletin / Collection of Scientific Works of the Transport University and Transport Academy of Ukraine, 5*, 3-6 [in Ukrainian].
26. Patent Ukrayini № 37465A. Elektrod dlya elektrokontaktного pripikannya poroshkiv. Lopata L.A. Opubl. 15.05.2001. Byul. №4.
27. Smyrnov, I.V., Lopata, O.V. & Mazanko V.F. (2021). Vplyv elektroplastychnoho efektu na dyfuzijni protsesy pry elektrokontaktному prypikanni [Influence of the electroplastic effect on diffusion processes during electrocontact cauterization]. *Comprehensive quality assurance of technological processes and systems (KZYATPS - 2021): XI Mizhnarodna nauково-praktychna konferentsiia (26 - 27 travnia 2021 r.) – XI International Scientific and Practical Conference materials of abstracts of reports of (pp. 19-30)*. Chernihiv. Retrieved from: <https://conference-Chernihiv-polytechnic.com/materiali-konferentsiyi/kzyatps-2021/Tezy-2021-Part-2.pdf> [in Ukrainian].
28. Smyrnov, I.V., Lopata, O.V., Zin'kovsk'ij, A.P. & Kobzar', V.L. (2022). Adhezijna mitsnist' ta zalyshkovi napruzhenia v pokryttiakh, otrymanykh elektrokontaktnym metodom [Adhesion strength and residual stresses in coatings obtained by the electrocontact method]. *Comprehensive quality assurance of technological processes and systems: XII Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (25 - 26 travnia 2022 r.) - XII International science and practice conf (pp.52-55)*. Chernihiv. Retrieved from: [chrome-extension//efaidnbmnnnibpcajpcgiclfefindmkaj /https://conference-chernihiv-polytechnic.com/wp-content/uploads/2023/03/Tezy-2022-Part-5-52.pdf](https://conference-chernihiv-polytechnic.com/wp-content/uploads/2023/03/Tezy-2022-Part-5-52.pdf) [in Ukrainian].

29. O. Lopata, I. Smirnov & A. Zinkovskii (2021). Dependence of the elastic modulus of powder coatings on their porosity in electrical contact hardening *International Scientific Journal Problems of Tribology*, 26, 4/102, 28-33 DOI: <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2021-102-4>.

Boris Lyashenko, Prof., DSc., **Larysa Lopata**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Senior Researcher
Institute of Strength Problems named after H.S. Pisarenko of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyev, Ukraine

Vitalii Lopata, PhD tech. sci., Senior Researcher
Institute of electric welding named after E.O. Paton of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyev, Ukraine

Natalia Zaboykina, Lecture
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Alternative technology of surface strengthening of internal surfaces of durable parts

Barrel survivability is the main indicator of tank guns. In order to ensure the competitiveness of Ukrainian armored vehicles on the foreign arms market, there was a need to ensure the survivability of the barrels of domestic tank guns at the level of the best world samples. Solving the problem of strengthening, restoring and increasing the service life of long-dimension parts is associated with the complexity of preparing and processing the inner surface (bore) along its entire length and eliminating possible residual deformations. The problem of increasing the survivability of tank gun barrels by applying protective coatings is considered. Their brief characteristics and limits of application are given. An alternative technology for surface hardening by electrical contact sintering of powder materials is proposed. This technology makes it possible to apply coatings up to 3 mm thick, with a density approaching that of a compact material and an adhesive strength of up to 220 MPa. Electrocontact sintering refers to impulse technologies and can exclude further mechanical processing of coatings

The electrical contact method is the most promising method of strengthening and restoration, as it refers to the methods with the minimum necessary heating, thereby excluding thermal deformation of the parts being strengthened (this technology will allow to eliminate the most characteristic defect of the barrel, such as its swelling and distortion).

For cauterization, a specially developed electrode-tool made of a copper alloy, dispersed-reinforced with solid particles, was used, which allows combining in one operation the application of coatings and the finishing treatment by the method of plastic surface deformation to the limit size, surface cleanliness and density. **electric contact cauterization, strengthening protective coatings, service life, physical and mechanical properties**

Одержано (Received) 22.04.2024

Прорецензовано (Reviewed) 03.06.2024

Прийнято до друку (Approved) 26.06.2024