

УДК 669.295.539.121

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2024.107.0.74

ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ МІКРОДУГОВИМ ОКСИДУВАННЯМ

Субботін О. В., Білозеров В. В., Субботіна В. В., Волков О. О.,
Князев С. А., Рябоштан В. А.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Анотація. Для підвищення зносостійкості та корозійної стійкості деталей сільськогосподарської, дорожньо-будівельної та гірничодобувної техніки використовується метод мікродугового оксидування (МДО). Нанесення шарів алюмінію на сталевий виріб із подальшим перетворенням частини його на корундову кераміку дасть змогу сформуванню максимальну твердість, зносостійкість і високу міцність зчеплення з основою.

Ключові слова: сталь 40ХС, алюмінієвий сплав, мікродугове оброблення, фазовий склад, товщина покриття, зносостійкість.

Вступ

Найбільшою шкодою гірничодобувним, сільськогосподарським та дорожньо-будівельним машинам завдає абразивне й корозійно-абразивне зношування. Від природного абразиву, що містить здебільшого частинки SiO_2 з твердістю $\text{HV} = 10$ ГПа, можна захиститися тільки за умови застосування матеріалів із твердістю, яка перевищує твердість абразиву [1]. Розв'язком окресленої проблеми є нанесення зносостійких шарів. Підвищення зносостійкості іноді досягається термічним обробленням сталевих деталей (об'ємним або поверхневим), різними хіміко-термічними методами модифікування поверхневих шарів, додатковим наклепом поверхневих шарів. Ефективне застосування високолегованих сталей, що містять значну кількість твердих карбідів, твердих сплавів, керамічних матеріалів, наприклад корундової кераміки. Одним із способів отримання корундової кераміки є метод мікродугового оксидування (МДО). Однак цей спосіб дає змогу створити корундовий шар тільки на алюмінієвих сплавах. Тому перспективним є вивчення питання нанесення шарів алюмінію на сталеві деталі, які зазнають абразивного зношення, з подальшим МДО-обробленням з метою отримання зносостійкого корундового покриття.

Аналіз публікацій

Алюміній та його сплави можна наносити будь-яким із відомих способів [2]. Кожен із перелічених нижче способів має переваги та недоліки. У процесі плакування деформують тільки алюміній, який перед прокаткою нагрівають до $350\text{--}400$ °С і накочують потім на холодну сталь, якщо вона неіржавна, або на-

гріту до $170\text{--}200$ °С, якщо вона вуглецева. Переваги: біметал можна гнути і штампувати завдяки високій пластичності. Покриття з порошкових матеріалів, отримані металіруванням електрофоретичним, електростатичним, детонаційним методами [2], мають високі корозійно захисні властивості. Покриття алюмінієм із розплаву мають перехідний шар із високою твердістю та крихкістю, що значно погіршує механічні властивості покриття [3]. Особливістю газополум'яних алюмінієвих покриттів є наявність пор розміром $2\text{--}20$ мкм, наслідком високої пористості є низька працездатність цих покриттів в агресивних середовищах. Через окислення частинок порошку покриття є відносно твердими та крихкими [4]. Хорошу пластичність, міцність зчеплення і низьку пористість мають алюмінієві покриття, напилені у вакуумі. Такі покриття є практично безпористими за товщини $12\text{--}15$ мкм і не змінюють механічних властивостей основи.

Розглянуті способи мають низьку суттєвих недоліків, що ускладнюють їх використання для реалізації поставленої мети. Найбільш прийнятним способом нанесення шарів алюмінію на сталеві деталі для подальшого МДО-оброблення є плазмове напилення. Матеріал, що напилюється, вводиться в плазмовий струмінь у вигляді порошку, плавиться в ньому та з високою швидкістю спрямовується до напилюваної поверхні [5, 6]. Як плазмоутворювальний газ використовується аргон або азот. Плазмові покриття вирізняються складною лускатою структурою, мають високий рівень залишкових напружень через значну деформацію та швидку кристалізацію напилюваних частинок на холодній підкладці. Шаруватість надає покриттям, напиленим

плазмою, еластичності. Товщина покриттів, отриманих плазмовим напиленням, може варіюватися від 15 мкм до декількох міліметрів, проте покриття завтовшки понад 0,5–1 мм через високий рівень внутрішніх напружень схильні до відшаровування [7, 8]. Пористість таких покриттів перебуває в межах 2–15 %, їх міцність зчеплення з основою становить 10–60 МПа. Загалом перевагами методу плазмового напилення є простота, відносна дешевизна, можливість покривати натурні деталі досить якісними покриттями.

Отже, аналіз можливих методів нанесення алюмінієвих сплавів на сталь довів, що найприйнятнішим є плазмове напилення, яке дає змогу добувати алюмінієві покриття з подальшим поверхневим обробленням методом МДО для отримання зносостійких корундових покриттів.

Мета й постановка завдання

Метою є створення на сталі 40ХС методом мікродугового оксидування з нанесеним газоплазмовим напиленням алюмінієвого шару зносостійких корундових покриттів.

Виклад основного матеріалу

У роботі описано дослідження корундового покриття, отриманого методом мікродугового оксидування на алюмінієвому сплаві (алюмінієвий порошок АСД-1 (98 % Al)), нанесеному газоплазмовим способом на сталь 40ХС, яка була термічно оброблена: гартування 900 °С, охолодження в масилі, відпуск за 200 °С, охолодження на повітрі (твердість поверхні HV 7,7 ГПа, $\sigma_B = 2000$ МПа, ударна в'язкість становила 50 Дж/см²) [9].

Мікродугове оксидування здійснювалося в лужно-силікатному електроліті (табл. 1), густина струму ~ 20 А/дм², тривалість оброблення до 2 год, забезпечувалося охолодження і барботажа електроліту.

Таблиця 1 – Склад електролітів

№ з/п	Склад електроліту, г/л	
	КОН	Na ₂ SiO ₃
1	1	6
2	2	6
3	2	12

МДО-оброблення сплаву дає змогу сформувати покриття із загальною товщиною ~ 200 мкм, яке має двошарову будову (поверхневий, він же технологічний та основний, він же робочий) (рис. 1). Установлено, що повер-

хневий шар маломіцний і незносостійкий, тому після МДО-оброблення його вилучають на абразивному папері.

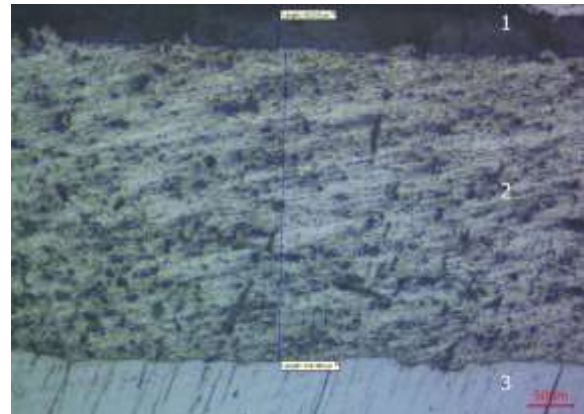


Рис. 1. Мікроструктура поперечного перерізу покриття (x 200): 1 – технологічний шар; 2 – робочий шар; 3 – сталь 40ХС

Залежно від тривалості оброблення, складу електроліту та густини струму можна отримувати як наскрізне оксидування, так і часткове.

Властивості покриття насамперед визначатимуться його фазовим складом. Проведено рентгеноструктурний аналіз покриттів за кімнатної температури на дифрактометрі ДРОН-4 в монохроматизованому випромінюванні К α -Cu. Для розшифрування отриманих дифрактограм використовували картотеку ASTM [10].

Типова дифрактограма покриттів (робочий шар) наведена на рис. 2.

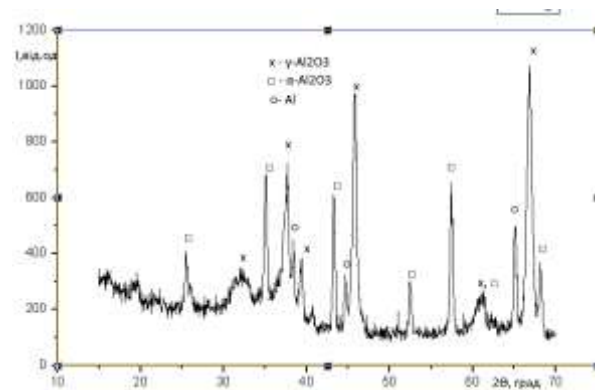


Рис. 2. Фрагмент дифрактограми покриття (електроліт № 1, $\tau = 90$, випромінювання К α -Cu)

Наявність чітких дифракційних піків (ліній) вказує на кристалічну будову покриття. Ідентифікація фазового складу показала, що основними фазами покриття є оксиди алюмінію в модифікації γ -Al₂O₃ та α -Al₂O₃. Спів-

відношення між фазами залежить від складу електроліту й тривалості окисдування. Збіг відносної інтенсивності ліній, експериментально отриманих, з табличними вказує на відсутність текстури оксидних фаз.

Основним показником, що визначає зносостійкість матеріалу, є твердість (мікротвердість) поверхневого шару. Твердість покриттів залежить від вмісту фаз і кількісного співвідношення між ними (табл. 2).

Таблиця 2 – Характеристика МДО-покриттів

Параметри МДО-процесу			Фазовий склад, %		Мікротвердість HV, ГПа
Електроліт (за табл. 1)	j , А/дм ²	τ , хв	α -Al ₂ O ₃	γ -Al ₂ O ₃	
№ 1	20	60	15	85	9,9
		90	42	58	12
		120	61	39	17
№ 2	20	60	3	97	4,7
		90	13	87	6
		120	14	86	6,65
№ 3	20	60	4	96	5,2
		90	40	60	11
		120	48	52	13,2

Найбільша твердість 17 ГПа досягається в покриттях, отриманих в електроліті № 1 за тривалості окисдування 120 хв.

Висновки

Отже, дослідження продемонструвало можливість формування високотвердого (HV \approx 17 ГПа) оксидного покриття на алюмінієвому шарі, нанесеному газоплазмовим напиленням на сталі 40ХС. Добута структура та висока твердість МДО-покриттів є необхідною умовою для забезпечення їх високої зносостійкості внаслідок абразивного зношування та дії корозійного середовища, яких зазнають деталі сільськогосподарських, землерийних та дорожніх машин.

Література

1. Борак К. В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин: дис. д-ра. техн. наук: 05.05.11 / Поліський національний університет, м. Житомир, 2021. 380.
2. Smith T. Plating adds life to product. *Eng. Mater. and des.*, 1981. V. 25. № 2. P. 26–30.
3. Похмурський В. І., Аксенова Е. В. О перспективах використання алюмінію для захисту чорних металів від корозії. *1-а республіканська конференція по корозії та протикорозійному захисту металів: тези основних доповідей.* Львів, 1971. С. 51–52.

4. Cui S. H., Han J. M., Du Y. P., Li W. Corrosion resistance and wear resistance of plasma electrolytic oxidation coatings on metal matrix composites. *Surface and coatings technology.* 2007. Vol. 201. Iss. 9–11. P. 5306–5309.
5. Rogers. Vacuum coating-alternative methods. *Prod. Finish.* 2012. V. 33. № 2. P. 27–28.
6. Корас В. М. Технологія та обладнання для напилення: навч. посібник. Київ: НМЦ ВО, 2000. 152 с.
7. Sanpo N. Solution Precursor Plasma Spray System. *Springer International Publishing*, Heidelberg, 2014. 100 p.
8. Heimann R. B. Plasma Spray Coating. *2nd edition.* VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, VCH Publishers, Inc., New York, 2020. 339 p.
9. Сушко О. В., Посвятенко Е. К., Кюрчев С. В. та ін. Прикладне матеріалознавство: підручник для вищих навчальних закладів III-IV ступенів акредитації. Мелітополь: Forward press, 2019. 352 с.
10. ASTM Card File (Diffraction data cards and alphabetical and grouped numerical index of X-ray diffraction date). Philadelphia: Ed. ASTM. 1969.

References

1. Borak K. V. Complex approach to increasing the durability and wear resistance of tillage machines working bodies: Doctor of Technical Sciences (PhD): 05.05.11 / Polissia National University, Zhytomyr. 2021. 380.
2. Smith T. Plating adds life to product. *Eng. Mater. and des.*, 1981. V. 25. № 2. P. 26–30.
3. Pokhmursky V. I., Aksenova E. V. On the prospects of using aluminium for the protection of ferrous metals from corrosion. *1st Republican Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Metals: Theses of the main reports.* Lviv, 1971. P. 51–52.
4. Cui S. H., Han J. M., Du Y. P., Li W. Corrosion resistance and wear resistance of plasma electrolytic oxidation coatings on metal matrix composites. *Surface and coatings technology.* 2007. Vol. 201. Iss. 9–11. P. 5306–5309.
5. Rogers. Vacuum coating-alternative methods. *Prod. Finish.* 2012. V. 33. № 2. P. 27–28.
6. Koras V. M. Technology and equipment for spraying: Study guide. Kyiv: NMC VO, 2000. 152 p.
7. Sanpo N. Solution Precursor Plasma Spray System. *Springer International Publishing*, Heidelberg, 2014. 100 p.
8. Heimann R. B. Plasma Spray Coating. *2nd edition.* VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, VCH Publishers, Inc., New York, 2020. 339 p.
9. Sushko O. V., Poshviatenko E. K., Kurchev S. V. et al. Applied Materials Science: a textbook for higher education institutions of III-IV accreditation levels. Melitopol: Forward press, 2019. 352 с.
10. ASTM Card File (Diffraction data cards and alphabetical and grouped numerical index of X-ray diffraction date). Philadelphia: Ed. ASTM. 1969.

Субботін Олександр Володимирович, аспірант кафедри «Матеріалознавство», тел. +38 (067)-530-04-35, subbotin.alex95@gmail.com,

Білозеров Валерій Володимирович, к. т. н., професор кафедри «Матеріалознавство», тел. +38 (067)-575-29-14, belozarov.valerii@gmail.com,

Субботіна Валерія Валеріївна, д. т. н., професор кафедри «Матеріалознавство», тел. +38 (067)-933-20-68, subbotina.valeri@gmail.com,

Волков Олег Олексійович, к. т. н., доцент кафедри «Матеріалознавство», тел. +38 (097) 973-49-74, volkovoleg1978@gmail.com,

Князєв Сергій Анатолійович, к. т. н., кафедра «Матеріалознавство», тел. +38 (050)-160-87-36, obmeninfo Serg@ukr.net,

Рябощтан Валентин Анатолійович, к. т. н., кафедра «Матеріалознавство», тел. +38 (093)-778-69-46, obibobbivalkinobi@gmail.com.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, Україна, 61002.

Control of the size and distribution of residual macronapples by rolling rollers

Abstract. Microarc oxidation (MAO) is used to improve the wear and corrosion resistance of agricultural, road construction and mining machinery parts. Applying layers of aluminum to a steel product and then converting part of it into corundum ceramics will help to create maximum hardness, wear resistance and high adhesion strength. **Problem.** Abrasive and corrosion-abrasive wear causes the greatest damage to agricultural, road construction and mining machines. Natural abrasive, consisting mainly of SiO₂ particles with a hardness of HV = 10 GPa, can only be protected by using materials with a hardness higher than the hardness of the abrasive. The solution to this problem is the application of wear-resistant layers. Increasing wear resistance can be achieved by producing corundum ceramics by the micro-arc oxidation (MAO) method. **Goal.** The goal is to create wear-resistant corundum coatings on 40KhS steel by microarc oxidation with gas-plasma spraying of an aluminum layer. **Methodology.** The X-ray diffraction analysis of the coatings was performed in this work. The X-ray analysis was performed at room temperature using a DRON-4 diffractometer in monochromatic Ka-Cu radiation. When deciphering the obtained diffractograms, the ASTM. **Originality.** The study showed that it is possible to form a high-hardness (HV ≈ 17 GPa) oxide coating on an aluminum layer deposited by gas plasma

spraying on 40KhS steel. **Practical value.** The resulting structure and high hardness of MAO coatings are a prerequisite for ensuring their high wear resistance to abrasive wear and corrosive environments experienced by parts of agricultural, earthmoving and road machines.

Keywords: 40KhS steel, aluminum alloy, microarc treatment, phase composition, coating thickness, wear resistance.

Subbotin Oleksandr¹, graduate student, ORCID: 0000-0002-9422-4480, subbotin.alex95@gmail.com,

Belozarov Valerii¹, PhD, Professor, Department of Materials Science, ORCID: 0000-0002-7623-3658,

belozarov.valerii@gmail.com, **Subbotina Valeriia**¹, professor, Doctor of technical sciences,

Department of Materials Science, ORCID: 0000-0002-3882-0368,

subbotina.valeri@gmail.com, **Volkov Oleg**, Ph. D., Associate Professor at the department of materials science, ORCID: 0000-0001-8797-0322,

volkovoleg1978@gmail.com, **Knyazev Sergiy**¹, PhD, Department of Materials Science, ORCID: 0000-0001-6422-3658,

obmeninfo Serg@ukr.net, **Ryaboshtan Valentyn**¹, PhD, Department of Materials Science, ORCID: 0000-0001-5826-5085,

obibobbivalkinobi@gmail.com.¹National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kirpichova str., 2, Kharkiv, 61002, Ukraine.

Дослідження та фінансування здійснені у межах проєктів: EU #3055 EURIZON “Combined technologies of metallic surface modification by micro-arc oxidation and boriding for critical machine parts with high contact loads” та NRFD ID: 2023.04/0036 “Research and development of device for restoring elements of military equipment by means of discrete-continuous strengthening of structures”.

“Research and funding were carried out within the projects: EU #3055 EURIZON ‘Combined technologies of metal surface modification by micro-arc oxidation and boron plating for critical machine parts with high contact loads’ and Research and NRFD ID: 2023.04/0036 “Research and development of device for restoring elements of military equipment by means of discrete-continuous strengthening of structures”.