

УДК УДК 621.793.72

**Володимир Гвоздецький, к.т.н., с.досл.; Михайло Студент, д.т.н., проф.;
Олександра Студент, д.т.н., проф.; Христина Задорожна, к.т.н.; Олександр
Лук'яненко, к.т.н.; Нестор Мозола**
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Україна

ТРИБОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ, НАПИЛЕНИХ РІЗНОТИПНИМИ ДРОТАМИ

Анотація. Досліджено абразивну зносостійкість та трибологічні характеристики електродугових покриттів із різнотипних електродних дротів. У покриттях, напилених суцільним сталевим дротом (сталі 08Св або 65Г) у парі з порошковим дротом 90Х17Р2ГС, формувалась м'яка (150...450) HV_{0,1} та тверда (600...1000) HV_{0,1} матриці. Зносостійкість таких покриттів була в 1,3...1,4 рази вищою ніж покриття з однотипних ПД 90Х17Р3Г2С2.

Ключові слова: покриття, електродугове напилювання, порошкові дроти, сталеві електроди, трибологічні характеристики

Volodymyr Hvozdet's'kyi, Ph.D.; Mykhailo Student, Ph.D., Prof.; Oleksandra Student, Ph.D., Prof.; Khrystyna Zadorozhna, Ph.D.; Oleksandr Lukyanenko, Ph.D.; Nestor Mozola

TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF ARC COATINGS FROM DIFFERENT TYPES OF WIRES

Abstract. The abrasive wear resistance and tribological characteristics of arc coatings made of different types of electrode wires were studied. In coatings sprayed with solid steel wire (08Sv or 65G steel) paired with 90Cr17B2MnSi cored wire, soft (150...450) HV_{0.1} and hard (600...1000) HV_{0.1} matrices were formed. The wear resistance of such coatings was 1.3...1.4 times higher than coatings made of two similar types of CW 90Cr17B2MnSi.

Keywords: coatings, arc spraying, cored wires, steel electrodes, tribological characteristics

Вступ. Деталі типу «вал» (колінчасті та розподільчі вали, пальці поршнів та мотовила, варіатори, ротори та кришки електромоторів, соломотряси, найрізноманітніші деталі циліндричної форми тощо) експлуатуються у складних умовах контакту з частками абразиву і тому швидко зношуються та унеможливають експлуатацію всього агрегату. Як правило, такі деталі є складними і дорогими і їх заміна на нові істотно здорожує продукцію. В сучасних умовах витрати на відновлення деталей залежать від їх конструктивно-технологічних особливостей і геометрії наявних в них дефектів і становлять 5 – 30% від вартості нових деталей.

Серед усіх газотермічних методів електродуговий метод (ЕДМ) напилювання покриттів вважають технологічно найпростішим, найдешевшим, який не потребує дороговартісного обладнання та легко впроваджується у виробництво. Суттєвим недоліком цього методу є вузький асортимент електродних матеріалів. Використання порошкових дротів, як електродних матеріалів для цього методу дало змогу суттєво розширити сфери його застосування [1. 2]. Покриття, нанесені ЕДМ, від 3 до 10 разів дешевші за нанесені іншими газотермічними методами (газополуменевим, HVOF, HVAF, детонаційним, та плазмовим). Однак низька їх адгезія і когезія та високий рівень залишкових напружень розтягу в отриманих покриттях перешкоджає їх застосуванню за підвищених робочих навантажень. Для підвищення механічних та трибологічних характеристик покриттів використали різнотипні електродні дроти: порошковий дріт (ПД) ПД 90Х17Р2ГС в парі із суцільним дротом (СД) із

маловуглецевої (СД 08) або високовуглецевої (СД 65Г) сталей. Це дало б змогу формувати композиційні покриття, в яких тверді ламелі (їх твердість досягала би (800...1200) $HV_{0,1}$), поєднувалися з м'якими із твердістю (150...450) $HV_{0,1}$ відповідно.

Мета роботи визначити трибологічні характеристики електродугових покриттів із різнотипних електродних дротів.

Методика напилювання електродугових покриттів із різнотипних електродних дротів. Для формування покриттів використали різнотипні електродні дроти: порошковий дріт (ПД 90X17P3ГС) і сталевий дріт (СД 08св або СД 65Г). Покриття напиляли на сталеву підкладку з використанням електродугового металізатора із соплом Лавала (рис.1), яке забезпечило надзвукову швидкість повітряного струменю з числом Маха 2 [3]. Параметри напилювання покриттів: напруга 30В, сила струму 150А, тиск повітряного струменю 1,2 МПа, дистанція напилювання 120 мм. Після напилювання покриття шліфували. Його трибологічні характеристики в парі тертя з антифрикційним алюмінієвим сплавом АМО-7-3 досліджували на установці СМЦ- 2 в оливі 5W30 за питомого навантаження 2...10 МПа.

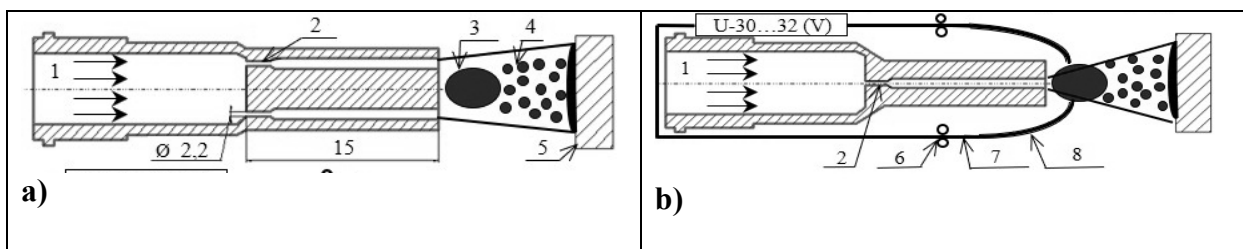


Рисунок 1. Схематичні зображення перерізу сопла металізатора для формування надзвукового потоку повітря (види спереду (а) та зверху (б) відповідно): 1 – потік повітря, 2 – критичний переріз сопла, 3 – розплав електродних матеріалів, 4 – метало-повітряний потік, 5 – сталева підложка з напиленим покриттям на поверхні, 6 – дроти, 7 – напрямні для подавання електродів до зони горіння дуги, 8 – ролики для переміщення дроту.

Експериментальні результати: За контактного навантаження P до 6 МПа покриття, сформовані з електродних дротів (ПД 90X17P2СГ + СД 08), за тертя у парі зі сплавом АМО-7-3 показали низький коефіцієнт тертя $f \sim 0,02...0,025$ (таблиця 1). За питомого навантаження понад 6 МПа значення f зросло, проте навіть за $P = 10$ МПа не перевищило значення 0,04. Для покриття, напиленого парою однотипних ПД 90X17P2СГ, практично незалежно від рівня P значення f було вищим ніж за використання різнотипних електродів.

Таблиця 1. Вплив питомого навантаження P на коефіцієнт тертя f покриттів, напилених різнотипними ддроами, у парі з алюмінієвим сплавом АМО 7-3 за умов граничного мащення синтетичною оливою 5W30

Питоме навантаження P , МПа	Коефіцієнт тертя f покриттів, напилених різнотипними дротами			
	ПД 90X17P2СГ + СД 0,8	ПД 90X17P2СГ + СД 65Г	ПД 90X17P2СГ + ПД 90X17P2СГ	Еталон Ст45
2	0,020	0,015	0,020	0,020
4	0,020	0,020	0,025	0,025
6	0,025	0,020	0,030	0,025
8	0,030	0,025	0,040	0,035
10	0,040	0,040	0,050	0,045

За інтенсивністю зношування I аналізованих пар тертя за умов граничного мащення найкращі характеристики показало покриття з (ПД 90X17P2СГ + СД 08) (таблиця 2). Значення I для покриттів із різнотипних дротів (порошкового та суцільного

сталевого) були в 1,3...1,4 рази нижчими, ніж покриття із ПД90X17P2СГ та в 2,0...2,3 рази нижчі, ніж для сталі 45 (HRC 55).

Таблиця 2. Інтенсивність зносу I покриттів, напилених різними варіантами дротів, у парі з алюмінієвим сплавом АМО-7-3 за умов граничного мащення синтетичною оливою 5W30

Питоме навантаження P , МПа	Інтенсивність зносу I , 10^{-12}			
	ПД 90X17P2СГ + СД 0,8	ПД 90X17P2СГ + СД 65Г	ПД 90X17P2СГ + ПД 90X17P2СГ	Еталон Ст45
2	0,025	0,027	0,04	0,07
4	0,03	0,035	0,05	0,1
6	0,04	0,05	0,15	0,17
8	0,1	0,12	0,17	0,25
10	0,15	0,17	0,22	0,35

Висока зносостійкість покриттів зумовлена, насамперед, наявністю в їх структурі ламелей із невисокою мікротвердістю (180...400) HV_{100} (закристалізовані краплини із СД 08, 65Г) та ламелей із високою мікротвердістю (700...1000) HV_{100} (краплини із ПД 90X17P3ГС) відповідно. Залишкові напруження розтягу, що виникають під час напилування покриттів, релаксують за рахунок пластичного деформування м'яких ламелей. Тому під час шліфування в таких покриттях не виникають мікротріщини. Присутність у покриттях твердих фаз боридів, карбідів, а також легованого мартенситу, забезпечувала їх високу зносостійкість, а велика кількість оксидів Fe_2O_3 та V_2O_5 суттєво зменшувала коефіцієнт тертя та час на припрацювання, об'ємну та локальну температуру трибологічного розігрівання в зоні контакту пари тертя. Під час тертя тверді мікрочастинки (оксиди, бориди), які в процесі тертя зношувалися або відірвалися від поверхні покриття, втілювалися у м'який алюмінієвий сплав АМО-7-3 (контртіло) і зменшували період припрацювання пари тертя, а зношування самого покриття відбувалося завдяки цим закріпленим часточкам абразиву (рис. 1).

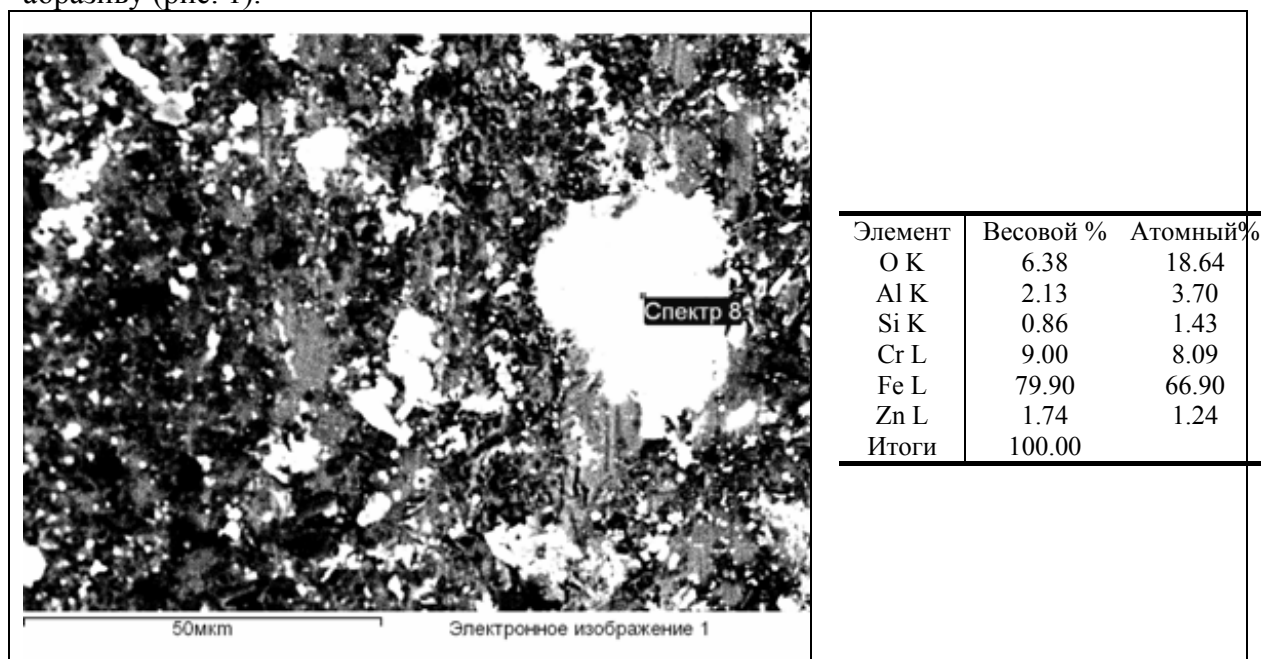


Рис. 1. Шаржування поверхні контртіла (АМО-7-3) часточками (оксидів, боридів, карбідів), відірваними від покриття.

Знос контртіла з антифрикційного алюмінієвого сплаву АМО 7-3 був вдвічі меншим в парі з покриттями із різнорідних дротів ніж з еталоном (сталь 45) навіть за найвищого питомого навантаження 10 МПа (таблиця 3). Внаслідок контакту з

покриттям із пари ПД 90X17P2СГ позитивний ефект на знос контр тіла від їх тертя був дещо меншим.

Таблиця 3. Втрата маси контртіла із антифрикційного алюмінієвого сплаву АМО 7-3 у фрикційній парі з аналізованими покриттями, напиленими різними дротами

Питоме навантаження P , МПа	Знос вкладки зі сплаву АМО 7-3 у парі з покриттями, $\times 10^{-4}$ г			
	ПД 90X17P2СГ + СД 08	ПД 90X17P2СГ + СД 65Г	ПД 90X17P2СГ + ПД 90X17P2СГ	Еталон Ст45
2	2	3	4	7
4	3	4	5	11
6	4	5	13	18
8	11	12	18	27
10	16	18	24	37

Під час тертя за високих питомих навантажень м'які ламелі у структурі покриттів, утворені внаслідок кристалізації крапель розплаву суцільних сталевих дротів, пластично деформувалися (рис. 2). Це суттєво зменшувало шорсткість поверхні покриття та збільшувало поверхню фрикційної взаємодії між поверхнею покриття та контртілом АМО 7-3. Як наслідок інтенсивність зношування поверхні контртіла зменшувалася.

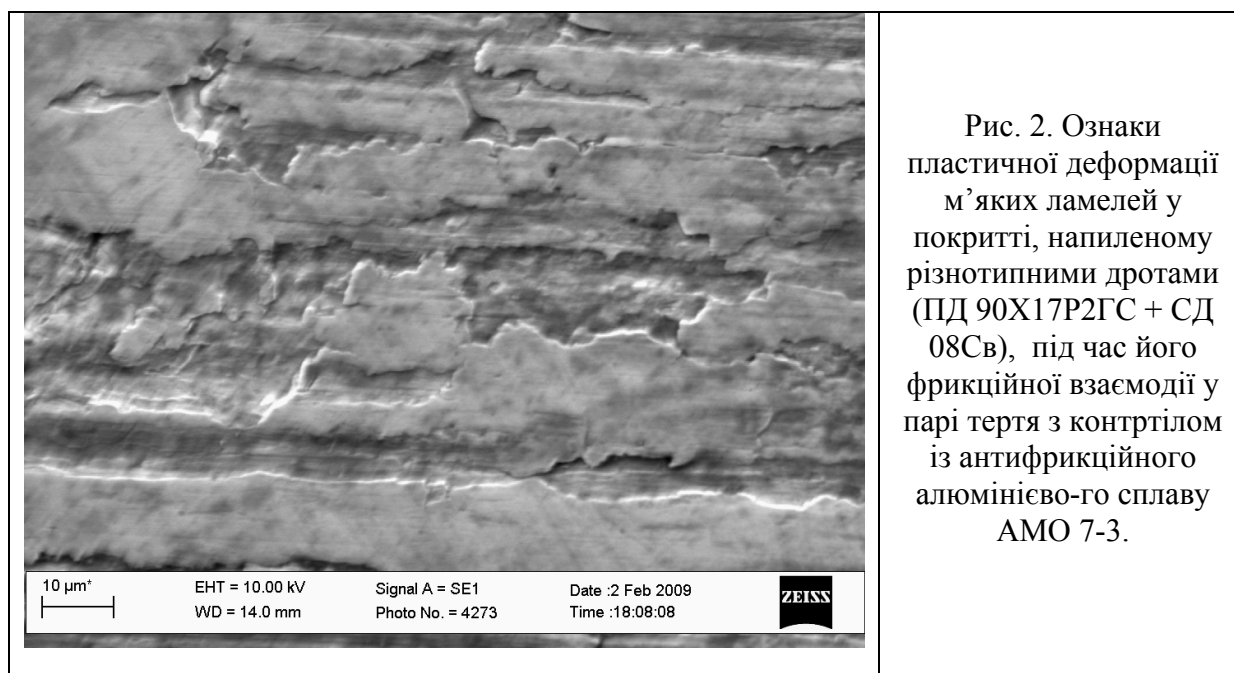


Рис. 2. Ознаки пластичної деформації м'яких ламелей у покритті, напиленому різнотипними дротами (ПД 90X17P2СГ + СД 08Св), під час його фрикційної взаємодії у парі тертя з контртілом із антифрикційного алюмінієво-го сплаву АМО 7-3.

Висновки:

1. Під час напилювання покриттів двома різнотипними дротами (порошкового і суцільного сталевого) формувалося покриття з типовою ламелярною структурою, сформованою закристалізованими краплями розплаву ПД та СД. Внаслідок значної їх відмінності за твердістю в структурі таких покриттів виявили два різних каркаси із м'якої (з краплин СД з твердістю $(150...450) \text{ HV}_{0,1}$) та твердої (з краплин ПД з твердістю $(600...1000) \text{ HV}_{0,1}$) матриць.
2. В умовах тертя за граничного навантаження зносостійкість покриттів із різнотипних дротів була в 1,3...1,4 рази більша, ніж покриття із двох однакових ПД 90X17P3Г2С2 та в 2,0...2,3 рази більша ніж еталону (сталь 45 з твердістю 55 HRC). Під час тертя тверді

мікрочастинки (оксиди, бориди), або зношувалися, або відривалися від поверхні покриття та втілювалися у м'який алюмінієвий сплав АМО-7-3 (як контртіло) і зменшували тривалість періоду припрацювання пари тертя. При цьому зношування покриття відбувалося цим закріпленим абразивом на поверхні контртіла АМО 7-3.

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проєкту № 2022.01/0005 “Концепція відновлення та подовження експлуатаційного ресурсу обладнання найважливіших галузей народного господарства України”.

Перелік посилань

1. Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings / T. R. Stupnyts'kyi, M. M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, V. M. Hvozdets'kyi // *Materials Science*. – 2016. – 52(2). – P. 165–172. DOI:10.1007/s11003-016-9939-8
2. Tribological properties of PEO layers synthesized on arc spray coatings on aluminum alloys in contact with various friction materials / V. Hvozdets'kyi, J. Padgurskas, M. Student, I. Pohrelyuk, O. Student, K. Zadorozhna, O. Tkachuk, R. Rukuiža // *Coatings*. – 2024. – 14(4). – 460. <https://doi.org/10.3390/coatings14040460>
3. The effect of increasing the air flow pressure on the properties of coatings during the arc spraying of cored wires / M. Student, V. Gvozdetsky, O. Student, O. Prentkovskis, P. Maruschak, O. Olenyuk, L. Titova // *Journal of Mechanical Engineering – Strojnický Časopis*. – 2019. – 69, 4. – P. 133–146. [https:// DOI: 10.2478/scjme-2019-0048](https://doi.org/10.2478/scjme-2019-0048)