

<sup>1</sup>О. Й. Мажейка, канд. техн. наук, проф.,

<sup>1</sup>С. І. Маркович, канд. техн. наук, доц.,

<sup>1</sup>Ю. В. Рябоволик, асп.,

<sup>2</sup>М. М. Студент, канд. техн. наук, стари. наук. співроб.

### МЕТОДОЛОГІЯ ФОРМУВАННЯ І ТРИБОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ЗМІЦНЕННЯ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ

<sup>1</sup>Кіровоградський національний технічний університет

<sup>2</sup>Фізико-механічний інститут імені Г.В. Карпенка

*Досліджено вплив компонентів шихти порошкового дроту на властивості, їх придатність до оброблення лезовим інструментом і наведено трибологічні характеристики електродугових покриттів в парі тертя з текстолітом.*

**Постановка проблеми.** При зміцненні внутрішніх поверхонь пластинчато-роторних насосів, що контактують з текстолітовою пластиною, нанесенням електродугових покриттів (ЕДП) постає ряд завдань:

– створити порошкові дроти (ПД), за допомогою розпилення яких формувалось би покриття, що забезпечує надійну роботу спряження в складних експлуатаційних умовах під впливом абразивного зношування, фретингу за наявності межового шару мастила;

– забезпечити можливість оброблення внутрішніх покриттів лезовим інструментом, оскільки таке оброблення є єдино можливим для оброблення напилених покриттів, що нанесені на внутрішні поверхні деталей;

– мінімізувати знос текстолітової пластини через вплив на характерні недоліки ЕДП – значну шорсткість, пористість і структурну неоднорідність.

**Мета дослідження.** Визначення трибологічних характеристик композиційних ЕДП та придатності до оброблення залежно від умісту елементів шихти ПД.

Розробленню ПД для нанесення зносостійких ЕДП присвячено праці [1; 2; 3], але даних про створення покриттів, які б забезпечували не лише високу зносостійкість, а й придатність до оброблення лезовим інструментом в наукових джерелах немає.

У процесі плавлення ПД у процесі напилення ЕДП шихтові матеріали взаємодіють зі сталеву оболонкою в складних умовах дугового процесу і дії потоку повітря. Під час диспергування розплаву струменем стисненого повітря відбувається інтенсивне окиснення частинок. Такі легувальні елементи, як хром та алюміній, що розчинилися в розплаві, підвищують його опірність до окиснення на всіх етапах формування покриття. Кількість оксидів у покритті з ПД є суттєво меншою, ніж у покритті із суцільного дроту [3]. Також на зменшення кількості оксидів у ЕДП впливає вуглець, що міститься у шихті ПД [2].

Під час плавлення ПД вуглець утворює навколо диспергованих краплин захисну атмосферу за рахунок проходження реакції горіння вуглецю  $C + O_2 = CO_2$ . При цьому кількість вуглецю у покритті суттєво зменшується і залежить від режимів нанесення покриття. На процес вигорання вуглецю в ЕДП впливають такі параметри напилення: напруга дуги, тиск повітряного струменя та дистанція напилення. Як встановлено в працях [1; 3] із суцільних дротів вуглець вигоряє інтенсивніше, ніж з ПД. Таким чином, покриття, які нанесено з однакового дроту суцільного чи ПД, будуть мати різну кількість вуглецю, відповідно різні твердість і величину зносу різця Під час лезового оброблення.

Додаток алюмінію у шихту ПД понад 2%, та хрому понад 8% як елементів, які стабілізують ферит, сприяють утворенню в ЕДП матричної фази – фериту. Твердість фериту є нечутливою до кількості вуглецю у ньому та режимів напилення. Оскільки вуглець існує у таких покриттях має вигляд карбідів хрому, то в них реалізується карбідне зміцнення.

Наявність у шихті ПД менше ніж 2% алюмінію забезпечує у процесі кристалізації покриття утворення мартенситної структури, яка містить залишковий аустеніт. Тобто такі покриття зміцнюються за рахунок мартенситного перетворення.

Одночасна дія вуглецю та легувальних елементів шихти ПД алюмінію та хрому сприяє суттєвому зменшенню кількості оксидної фази в ЕДП, забезпечує твердість покриття на рівні HV330 та підвищує стійкість лезового інструменту під час механічного оброблення.

Додаток у шихту ПД невеликої кількості марганцю забезпечує проходження реакції відновлення марганцем тих оксидів заліза,

невелика кількість яких ще може утворитися у процесі формування ЕДП. Оксиди марганцю мають меншу твердість за шкалою Мооса [4] та чинять меншу абразивну дію на лезовий інструмент під час механічного оброблення ЕДП.

Додаток до шихти ПД алюмінію, крім того, що він зменшує кількість оксидної фази у покритті, сприяє зниженню залишкових напружень стискання, підвищенню міцності зчеплення покриття та сталеві основи за рахунок проходження екзотермічної реакції на поверхні основи [5]. Це приводить до підвищення температури у контакті покриття – основа і, як наслідок, підвищення міцності зчеплення. Дослідження показують, що поряд із зростанням адгезії до основи змінюється також і характер відриву покриття від основи. Без алюмінію у шихті ПД характер відриву чисто адгезійний, тобто покриття відриваються по межі розділу покриття – основа, а з додатком алюмінію у шихті ПД – когезійний, тобто відрив проходить по ламелях самого покриття.

Додаток молібдену у шихту ПД підвищує як адгезійну, так і когезивну міцність. Так, додаток 2% молібдену у шихту ПД підвищує міцність на розрив покриття з 130 до 150 МПа [3]. Це зумовлено таким. Молібден, який вводиться у чистому вигляді, має високу температуру плавлення 2620 °С. У процесі утворення розплаву молібден запасав велику кількість тепла та підвищує температуру розплавлених краплин, контактуючи з металевою поверхнею під час кристалізації. Порошок Мо, який вводиться у шихту в чистому вигляді, не встигає розчинитися у розплаві сталеві оболонки, тому у структурі ЕДП він перебуває частково у твердому розчині, а частково у вигляді окремих ламелей молібдену.

Виходячи з наведених вище аргументів, шихта ПД для наплення ЕДП, що придатні до оброблення лезовим інструментом, має містити такі компоненти: високовуглецевий ферохром у складі якого вміст вуглецю феромарганцю, алюмінію та молібдену становить 8%.

**Методика досліджень.** Порошкові дроти формували згідно з методикою поданою у працях [6]. Електродугове покриття наносили електрометалізатором ЕМ-14 методом розпилення ПД діаметром 1,8 мм. Як шихтові матеріали використовували ферохром ФХ-800 (ГОСТ 4757-8), ферокремній ФС-65 (ГОСТ 1415-78), феромарганець ФМн-05 (ГОСТ 4755-80), феромолібден ФМО-60 (ГОСТ

4756-77), алюмінієвий порошок ПА-40. Режими нанесення ЕДП: напруга дуги 32–33V, струм дуги 150–180 А. Розпилювальний газ – повітря, тиск повітряного струменя 0,4–0,6 МПа, віддаль від дуги до зразка 100 мм.

Структуру і хімічний склад ЕДП та аналіз поверхонь тертя зразків після випробувань досліджували на електронному мікроскопі EVO-40 XVP (Carl Zeiss) із системою мікроаналізу EVO-4XVP. Мікротвердість визначали на твердомірі ПМТ-3.

Трибологічні дослідження проводили на установці СМЦ-2 за схемою диск–колодка в умовах граничного тертя. Контактне навантаження 3–24 МПа, швидкість ковзання 0,67 м/с. Мاستило – М10Г2К (ГОСТ 8584-78). Матеріал колодки – текстоліт. Покриття наносили на зразки у вигляді диска (матеріал – сталь 45) діаметром 40 мм та шириною 10 мм і шліфували до робочої товщини 1 мм. Еталон зносостійкості – сталь ШХ-15 твердістю HRC-62.

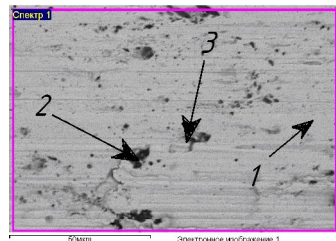
**Результати трибологічних досліджень покриттів у парі з текстолітом.** Для оцінювання зносостійкості пари тертя покриття з ПД – текстоліт – досліджували покриття з ПД різної твердості (табл.1).

Таблиця 1

**Склад досліджуваних порошкових дротів**

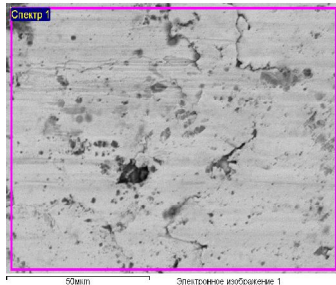
Номер покриття	Склад ПД, хімічний склад (компонентний склад), %	Твердість HV
1	Fe86 Cr6 Al4 Si2 Mo1 C0,5 (FeCr30+FeMo20+FeSi+FeMn+Al10)	350
2	Fe84 Cr10 Al4 C2 (FeCr60+Fe25+Al10+C5)	450
3	Fe83 Cr6 Al8 B3 (FeCrB60+Al40)	700

Установлено, що зі збільшенням умісту алюмінію у шихті ПД на поверхні тертя покриття з текстолітом утворюються менш тонкі оксидні плівки (на поверхні тертя є менше кисню) (рис.1, в) на основі оксидів заліза, які леговані всіма елементами, які є у шихті ПД. Проте є більше оксидів  $Al_2O_3$ , які утворилися у структурі покриття у процесі напилення.



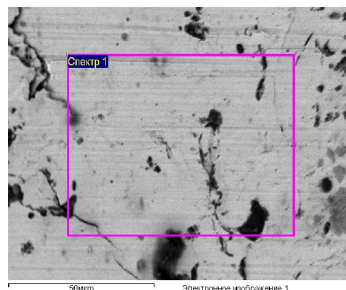
*a*

Елемент	Масова частка, %	Атомна частка, %
O	5,63	16,71
Al	3,33	4,11
Si	1,75	2,96
Cr	4,11	3,75
Mn	1,31	1,13
Fe	82,58	70,21
Mo	2,29	1,13
Всього	100,00	



*б*

Елемент	Масова частка, %	Атомна частка, %
O	5,63	16,71
Al	3,33	4,11
Si	1,75	2,96
Cr	4,11	3,75
Mn	1,31	1,13
Fe	82,58	70,21
Mo	2,29	1,13
Всього	100,00	



*в*

Елемент	Масова частка, %	Атомна частка, %
O K	3,56	11,07
Al K	5,52	4,65
Si K	0,22	0,39
Cr K	4,58	4,39
Fe K	89,13	79,51
Всього	100,00	

Рис. 1. Структура покриттів після тертя в парі з текстолітом та результати спектрального аналізу спектру 1 у відбитих електронах: *a* – покриття 1; *б* – покриття 2; *в* – покриття 3; 1 – твердий розчин на основі  $\alpha$ - або  $\gamma$ -заліза; 2 – оксиди; 3 – пори

Зносостійкість покриття 3, яке має найбільшу твердість, є максимальною.

У текстоліті є абразивні частинки, які зношують покриття. Так, на поверхні сталі ШХ-15, яку брали за еталон зносостійкості,

методом спектрального аналізу виявлено частинки  $Al_2O_3$ , які шаржувались під час тертя з текстоліту. Зі зменшенням твердості напиленого покриття його зносостійкість знижується і стає меншою, ніж зносостійкість еталона – сталі ШХ 15 (HRC-62).

Величина зношування текстоліту навпаки найбільша в парі тертя – з покриттям 3, що має найбільшу твердість (табл. 2).

Таблиця 2

**Величина зносу текстоліту при терті з покриттями та сталлю**

Номер ПД	Ширина лунки, мм
1	3,1
2	3,6
3	5,3
Сталь ШХ-15	3,1

Зі зменшенням твердості покриття до 350 HV зносостійкість текстоліту зростає на 70% унаслідок швидкого притирання поверхні напиленого покриття. Так, на рис.2, а показано, що на поверхні тертя покриття 1 видно суттєві сліди пластичної деформації в окремих ламелях. Це сліди від частинок  $Al_2O_3$ , якими наповнений текстоліт. Притирання поверхні покриття приводить до зникнення видимих міжламелярних меж і, як наслідок, зменшення шорсткості поверхні покриття.

Зі збільшенням твердості покриття сліди пластичної деформації зменшуються (покриття 3, та сталь). Унаслідок цього відбувається більш інтенсивне зношування контртіла напиленим шліфованим покриттям. У процесі тертя такі тверді покриття важко притираються, про що свідчить поверхня тертя (рис. 1, б).

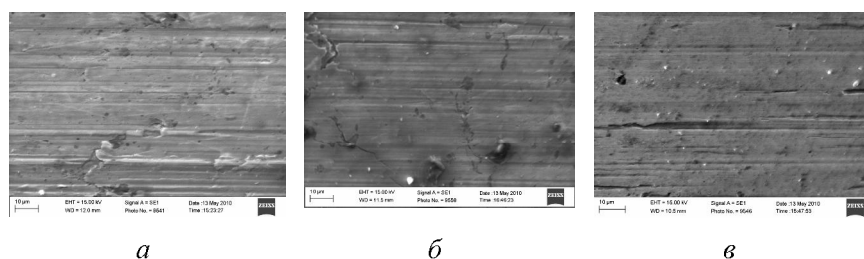


Рис.2. Сліди пластичної деформації на покриттях у наслідок тертя із текстолітом: а – покриття 1; б – покриття 3; в – сталь ШХ-15

Це зумовлено тим, що під час тертя границі зерен між ламелями підвищують шорсткість покриття (рис. 3) вже після шліфування. Чим твердіше покриття, тим більша його шорсткість після шліфування, що зумовлено структурною неоднорідністю покриття.

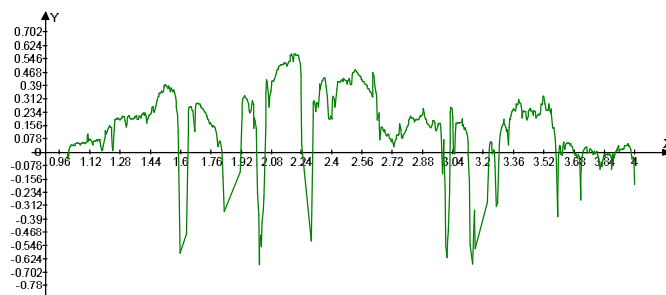


Рис. 3. Шорсткість покриття з ПД 3,  $Ra-4,13$

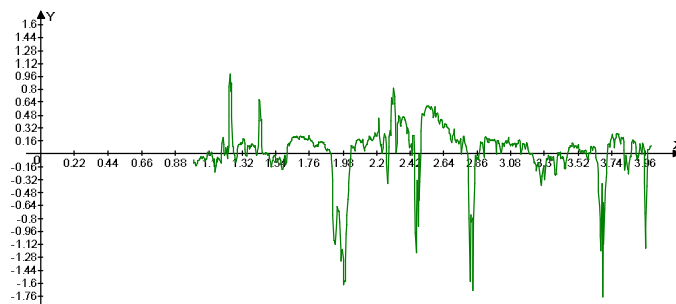


Рис. 4. Шорсткість покриття з ПД 2,  $Ra-1,88$

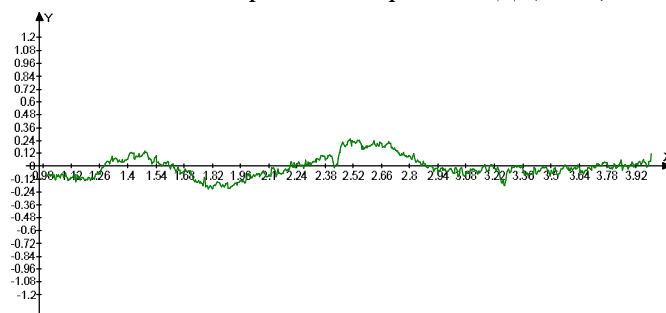


Рис. 5. Шорсткість сталі ШХ-15,  $Ra-0,88$

Покриття з ПД, шихта якого містить підвищений вміст алюмінію, мають високі механічні, але гірші трибологічні характеристики, ніж покриття мартенситного класу. Це зумовлено тим, що в процесі граничного тертя в парі з текстолітом утворюються оксидні плівки, але підвищений вміст алюмінію зумовлює утворення на поверхні тертя оксидів на основі алюмінію. Оксиди алюмінію мають високу твердість і є абразивом.

Наявність молибдену в покритті сприяє утворенню на поверхні тертя плівки сполук молибдену із сіркою ( $\text{MoS}_2$ ), що міститься в мастилi. Дисульфiд молибдену, який утворюється у процесі тертя, також сприяє зменшенню коефіцієнтів тертя та зношуванню пари тертя ВП – текстоліт.

### **Висновки**

1. Проведені дослідження дозволили встановити, що для формування якісних ЕДП зі зміцненням ВП доцільно коригувати склад ПД додаванням [7]: ферохрому 25–35 %, який утворює матрицю покриття; алюмінію 8–12%, який стабілізує феритну структуру, зменшує кількість оксидної фази у покритті, сприяє зниженню залишкових напружень стиску, підвищує міцність зчеплення покриття та основи; кремнію – 12%, який стабілізує дугу; марганцю 8–12%, який відновлює оксиди заліза; молибдену 8–12%, який підвищує адгезійну міцність і сприяє утворенню дисульфiду молибдену на поверхні тертя.

2. Установлено, що твердість ЕДП із структурою мартенситного типу значно суттєво від режимів їх нанесення, а покриття зі структурою феритного типу такої залежності не мають, їх твердість залежить від умісту алюмінію і хрому в покритті.

3. Результати трибологічних досліджень ВП у парі з текстолітом свідчать про те, що найбільш оптимальним за параметрами зносостійкості й оброблюваності є покриття 1, твердістю не вищою ніж 400 HV, яке містить: Fe-86, Cr-6, Al-4, Si-2, Mo-1, C-0,5 % [7]. Шорсткість таких покриттів після випробувань зносу  $Ra = 0,88$ . Зносостійкість такої трибопари відповідає зносостійкості сполучення сталь ШХ15-текстоліт.

### **Список літератури**

1. *Мажейка О.Й.* Розроблення електродугових покриттів з порошкових дротів для відновлення внутрішніх поверхонь деталей машин / О.Й. Мажейка, С.І. Маркович, Ю.В. Рябоволик, М.М. Студент // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2008. – Вип. 49. – Т.2. – С.112–117.

2. *Борисова А.Л.* Структура и свойства покрытий на основе феррохрома и феррохром алюминия, полученных электродуговой металлизацией из порошковых проволок / А.Л. Борисова, И.В. Миц, Т.В. Кайда, А.Ш.Клейман // Автоматическая сварка. – 1995. – № 6. – С. 3–6.

3. *Електродугові відновні та захисні покриття* / [В.І.Похмурський, М.М.Студент, В.М.Довгуник, та ін.]. – Львів: Фізико-механічний ін-т ім Г.В. Карпенка НАН України. – 2005. – 190 с.

4. *Трибологія: [підруч.]* / М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, М.І. Пашечко, Є.В. Корбут. – К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту НАУ-друк. – 2009. – 392 с.

5. *Троицкий А.Ф.* Основы металлизации распылением / А.Ф. Троицкий– Ташкент: Гос. изд-во УзССР, 1968. – 181 с.

6. *Мажейка О.Й.* Розробка та виготовлення порошкових дротів для нанесення внутрішніх электродугових покриттів, придатних до обробки лезовим інструментом / О.Й. Мажейка, С.І. Маркович, Ю.В. Рябоволик // Зб. наук. праць Кіровоград. нац. техн. ун-ту «Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація»– Кіровоград: КНТУ, 2008. – Вип. 20. – С.262–266.

7. *Пат. 45820 Україна*, МПК(2009) С23С 4/00. Порошковий дріт для одержання зносостійких электродугових покриттів, придатних до обробки лезовим інструментом / Похмурський В.І., Студент М.М., Маркович С.І., Мажейка О.Й., Рябоволик Ю.В.; заявник і патентовласник Кіровоград. нац. техн. ун-т, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. – № u 200906443; заявл. 19.06.2009; опубл. 25.11.2009, Бюл. №22

*Мажейка А.И., Маркович С.И., Рябоволик Ю.В., Студент М.М.* **Методология формирования и трибологические характеристики электродуговых покрытий при упрочнении внутренних поверхностей** // Проблеми тертя та зношування: наук. техн. зб. – К: Вид-во НАУ «НАУ-друк», 2010. – Вип.54 – С.154–162.

Исследовано влияние компонентов шихты порошковой проволоки на свойства покрытий, их пригодность к обработке лезвийным инструментом и приведены результаты трибологических исследований покрытий в паре трения с текстолитом.

Рис. 5, табл. 2, список лит. 4 найм.

#### **Forming methodology and tribology descriptions of elektroarc coverages at work-hardening of internal surfaces**

In the article research of influence of components of charge of powder-like wire is conducted on properties of coverages their fitness to treatment a blade instrument and the results of tribology researches of coverages are resulted in a pair of friction with tekstolit.

Стаття надійшла до редакції 26.10.2010