

УДК 621.793; 620.198

М. М. Студент*, Т. Р. Ступницький*, В. М.*Гвоздецький, А. Р.**Дзюбик, І. Б. Хомич **

* Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України,

**Національний університет "Львівська політехніка",

кафедра зварювального виробництва, діагностики

і відновлення металоконструкцій

ТРИБОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ ІЗ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

© Студент М. М., Ступницький Т. Р., Гвоздецький В. М., Дзюбик А. Р., Хомич І. Б., 2017

Проведено дослідження трибологічних характеристик електродугових покриттів із порошкових дротів у технологічних середовищах: за умов граничного мащення у мастилі І-20; в середовищі 3 % емульсору марки Hydroway 1060 та мастилі М10В2. Покриття завтовшки 1,2–1,5 мм наносили серійним електродуговим металозатором ФМІ-1 на заздалегідь оброблену дробинноструминним методом поверхню як плоских, так і циліндричних зразків зі сталі Ст.3, розпилюючи порошкові дроти 140Х14Н2Т2Ю та 20Х18Р3Т2Ю діаметром 1,8 мм. Трибологічні характеристики та зносостійкість покриттів вивчали на модернізованій установці СМЦ-2 за схемою диск–колодка (контр-тіло). Коефіцієнт тертя визначали як за умов сухого тертя, так і за граничного мащення у середовищах. Обробку результатів досліджень здійснювали статистичною обробкою даних з використанням коефіцієнта Стюдента за кількості вимірювань $n=5$ та з надійністю $P=0,95$. Встановлено, що із ростом питомого навантаження у середовищі оливи І-20, а також 3 % емульсолу 1060 коефіцієнт тертя у парах тертя електродугове покриття – чавун, електродугове покриття – бронза та електродугове покриття – бабіт зменшується, причому для останньої пари найбільшою мірою. Пара тертя гальванічний хром-бабіт є непрацездатною як в оливі І-20, так і в 3 %-му емульсолі.

Ключові слова: електродугове покриття, шорсткість, порошковий дріт, зварювання.

The research of tribological logic characteristics of electric arc coatings from powdered wires in technological environments was conducted: under conditions of limit lubrication in lubrication I-20; in the environment of 3 % emulsor of the brand Hydroway 1060 and lubrication M10V2. Coatings in the thickness of 1.2–1.5 mm were applied by serial electro-arc metal with the inhibitor of PMI-1 on a pre-treated spatially-cut surface of both flat and cylindrical specimens from steels of St 3 by spraying powder tubes 140X14H2T2Ю and 20X18P3T2Ю in diameter of 1,8 mm. Tribological logic characteristics and wear resistance of the coatings were studied at the modernized installation of SMC-2 according to the disk-block scheme (counter-body). The coefficient of friction was determined both in conditions of dry friction and boundary lubrication in the media. The processing of the research results was carried out by statistical data processing using Student's coefficient with the number of measurements $n = 5$ and the reliability of $P = 0.95$. It was established that with the increase in specific load in the environment of I-20 oil and 3 % emulsol 1060, the coefficient of friction in the friction pairs is the electric arc covering – iron, electric arc coating – bronze and electric arc coating – the bubble decreases, and for the most part for the last pair. The friction pair of galvanic chrome-babbitt is not working both in I-20 oil and in 3 % emulsol.

Key words: electric arc coating, roughness, powder wire, welding.

Вступ. Велика частина елементів конструкцій відповідальних машин і механізмів зазнає корозійно-абразивного зношування під час тривалої експлуатації за жорстких умов навантаження у нейтральних водних середовищах. Зокрема у теплоенергетиці це стосується штоків запірних

вентилів та гідроциліндрів різного призначення. Для захисту від корозійно-абразивного зношування у багатьох випадках використовують метод електролітичного хромування, однак через його високу канцерогенність у промислово розвинених країнах світу шукають альтернативні технології. Провідні фірми світу (Metco, Castolin, TAFA, Deloro, Nanosteel) застосовують для цієї мети технології нанесення газотермічних покриттів. Серед цих технологій електродугове напилення покриттів характеризується найвищою продуктивністю за найменших затрат, що викликає особливе зацікавлення. Для формування корозійнотривких електродугових покриттів (ЕДП) як електродні матеріали часто використовують нержавіючі суцільні дроти типу 40X13, 08X18N10T, проте вони мають низьку зносостійкість та є доволі дорогими. Порошкові дроти (ПД) такого самого хімічного складу, як мінімум, удвічі дешевші [1–8].

Мета роботи – дослідити трибологічні характеристики електродугових покриттів із порошкових дротів у технологічних середовищах.

Методика експериментів. Покриття завтовшки 1,2–1,5 мм наносили серійним електродуговим металізатором ФМІ-1 на заздалегідь оброблену дробинноструминним методом поверхню як плоских, так і циліндричних зразків зі сталі Ст.3, розпилюючи ПД 140X14H2T2Ю та ПД 20X18P3T2Ю діаметром 1,8 мм.

Як шихтові матеріали використовували феросплави та чисті метали. Оболонку ПД виготовляли із стрічки зі сталі 08 кп завтовшки 0,4 мм і завширшки 10 мм. Коефіцієнт заповнення ПД шихтою становив 22–30 %. Режими нанесення покриттів: струм – 150 А, напруга горіння дуги – 32–34 В. Розпилювали ПД струменем стисненого повітря під тиском 0,65 МПа з дистанції 150 мм.

Трибологічні характеристики та зносостійкість покриттів вивчали на модернізованій установці СМЦ-2 за схемою диск–колодка (контртіло). Коефіцієнт тертя визначали як за умов сухого тертя, так і за граничного мащення у середовищах мастил І-20, М10В2 та 3 %-го водного розчину емульсолу марки Hydroway 1060. Контактне навантаження становило 2–10 МПа, а швидкість ковзання – 0,67 м/с. Покриття завтовшки 1,5 мм наносили на циліндричну поверхню дискових (діаметром 40 і завширшки 10 мм) зразків зі сталі 45. Після цього зразки шліфували корундовим кругом до діаметра 42 мм. За еталон зносостійкості приймали гальванічне хромове покриття. Досліджували трибологічні характеристики пар тертя покриття – вкладка із чавуну СЧ 30, бронзи БрС-30 та бабіту у технологічних середовищах, які використовуються для заповнення гідроциліндрів: 3 %-й розчин Емульсолу та мінеральне мастило І-20. Обробку результатів досліджень здійснювали статистичною обробкою даних з використанням коефіцієнта Стьюдента за кількості вимірювань $n=5$ та з надійністю $P=0,95$.

Експериментальні результати. Порівняльні трибологічні характеристики ЕДП та хрому за умов граничного мащення в мастилі І-20. Для усіх досліджуваних пар тертя з контртілом із чавуну спостерігається зменшення коефіцієнта тертя за зростання питомого навантаження (рис. 1).

Найменші значення коефіцієнта тертя за $P=10$ МПа відмічені для пари ЕДП з ПД 140X14H2T2Ю – чавун СЧ 30, $\mu = 0,15 \pm 0,008$ ($P=0,95$), за відносної похибки вимірювань $\varepsilon = 5,8$ %. Максимальні значення характерні для пари тертя гальванічний хром – СЧ 30, $\mu = 0,17 \pm 0,01$ ($P=0,95$), за відносної похибки вимірювань $\varepsilon = 6$ %. Усі значення коефіцієнта тертя є високими, оскільки мастило І-20 не має достатніх мастильних властивостей (рис. 1).

На поверхні тертя ЕДП з ПД 140X14T2H2Ю не зафіксовано виступів із оксидів або карбідів (рис. 2). Очевидно в процесі приробітку вони згладжуються та не утворюють ріжучих крайок. На поверхні тертя покриття із ПД 20X18P3T2Ю виявлено поодинокі виступи, сформовані із боридів ферохрому, які за вищих питомих навантажень можуть бути ріжучими крайками.

Поверхня тертя чавуну після випробувань у парі із електродуговим покриттям виглядає рівною, без поздовжніх смуг, що свідчить про перебіг нормального окиснювального зношування (рис. 2).

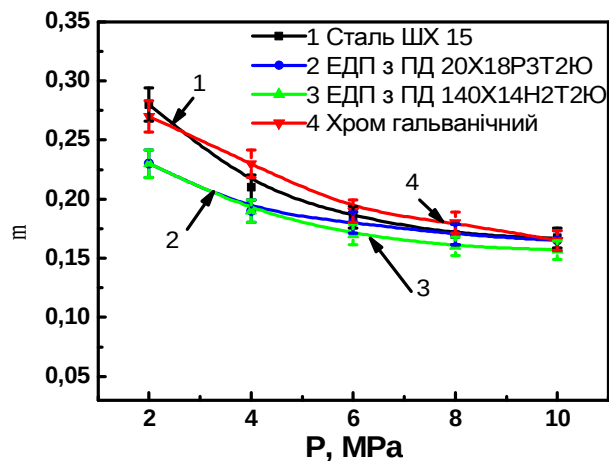
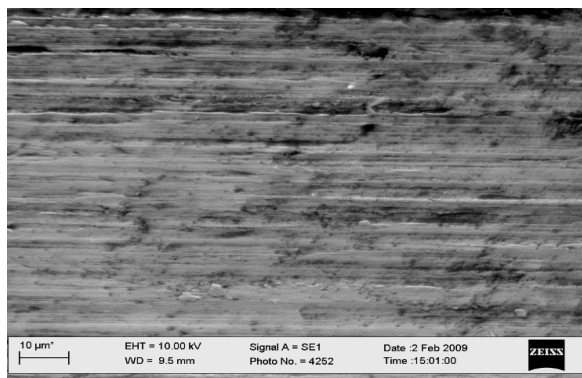
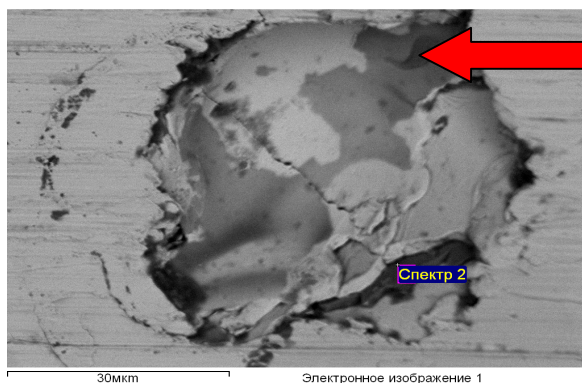


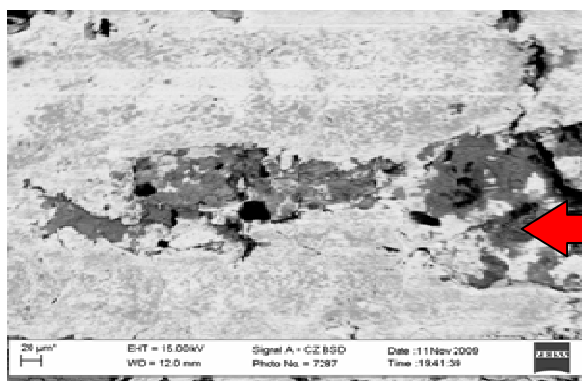
Рис. 1. Залежності μ ЕДП від навантаження за умов тертя з контртілом з СЧ 30



Вигляд поверхні тертя ЕДП з ПД 140X14T2H2Ю



Виступ на поверхні тертя ЕДП із ПД 20X18P3T2Ю сформований із бориду ферохрому



Чавун
Графіт

Рис. 2. Поверхня ЕДП з ПД 140X14T2H2Ю, ПД 20X18P3T2Ю та контртіла – СЧ 30 після випробувань

Для пар тертя гальванічний хром – бронза БрС 30 та сталь ШХ 15 – бронза БрС 30 спостерігається збільшення коефіцієнта тертя за збільшення питомого навантаження: $\mu=0,21 \pm 0,012$ ($P=0,95$), за відносної похибки вимірювань $\varepsilon = 5,9\%$ проти $\mu=0,238 \pm 0,01$ ($P=0,95$), $\varepsilon = 4,4\%$, та для сталі ШХ 15 $\mu=0,148 \pm 0,01$ ($P=0,95$), $\varepsilon = 7\%$ проти $\mu=0,186 \pm 0,011$ ($P=0,95$), $\varepsilon = 6\%$.

Для ЕДП виявлено зворотну тенденцію – зменшення коефіцієнта тертя для покриття із ПД 20X18P3T2Ю $\mu=0,24 \pm 0,012$ ($P=0,95$), $\varepsilon = 5,2\%$ проти $\mu=0,19 \pm 0,01$ ($P=0,95$), $\varepsilon = 5,5\%$ та стабільне значення $\mu=0,13 \pm 0,01$ ($P=0,95$), $\varepsilon = 5\%$ для покриття із ПД 140X14H2T2Ю під час зростання навантаження (рис. 3).

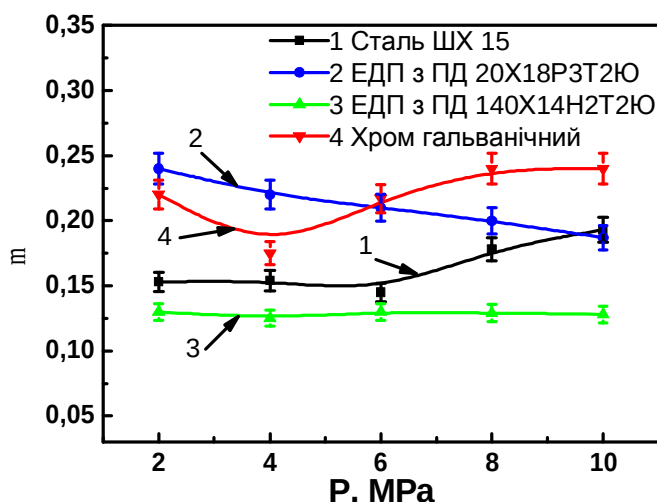


Рис. 3. Залежності μ ЕДП від навантаження за умов тертя з контртілом з БРС 30

Такий характер зміни коефіцієнта тертя зумовлений тим, що пори у покритті виконують роль резервуарів для мастильної речовини, що у міру зношування матеріалу видавлюється з їх об'єму і надходить у зону тертя, сприяючи відновленню мастильної плівки, що забезпечує умови для граничного змащення. Видавлювання мастильної речовини відбувається також внаслідок фрикційного нагрівання і теплового розширення деталі. Під час охолодження деталі надлишок мастильного матеріалу, що перебуває на поверхні тертя, всмоктується назад у її поруватий шар.

Встановлено, що для пари тертя хром – бабіт вже за малих навантажень відбувається схоплення між парами тертя (рис. 4). Така пара тертя в оливі І-20 не є працездатною. Найнижчий коефіцієнт тертя відмічений для пари тертя сталь ШХ 15 – бабіт при навантаженні в 10 МПа $\mu=0,065 \pm 0,003$ ($P=0,95$), $\varepsilon = 5,7\%$. Це зумовлено найменшою шорсткістю сталі після шліфування.

Для досліджуваних покриттів відмічено значно більший коефіцієнт тертя, ніж для сталі, для ЕДП з ПД 20X18P3T2Ю $\mu=0,175 \pm 0,01$ ($P=0,95$), $\varepsilon = 5,6\%$, та для ЕДП з ПД 140X14H2T2Ю $\mu=0,15 \pm 0,01$ ($P=0,95$), $\varepsilon = 7,3\%$. Це викликано істотним шаржуванням поверхні м'якого бабіту частинками матеріалу електродугового покриття (рис. 5, з). Поверхня контртіла із чавуну та бронзи, що має вищу твердість, ніж бабіт, не шаржується частинками зношування електродугових покриттів (рис. 5, в).

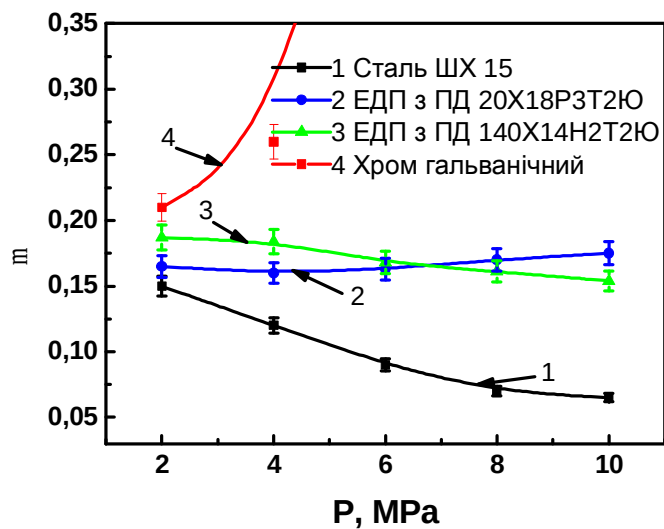
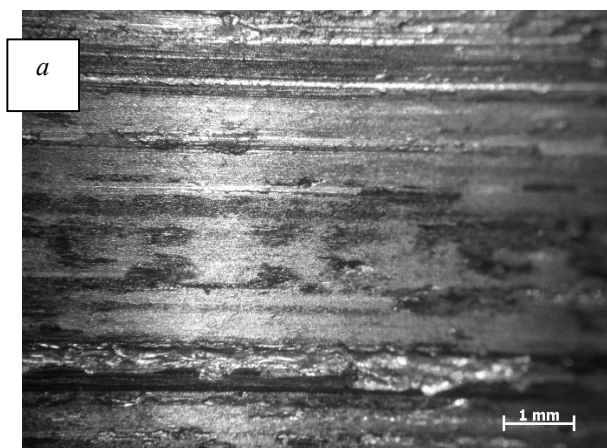
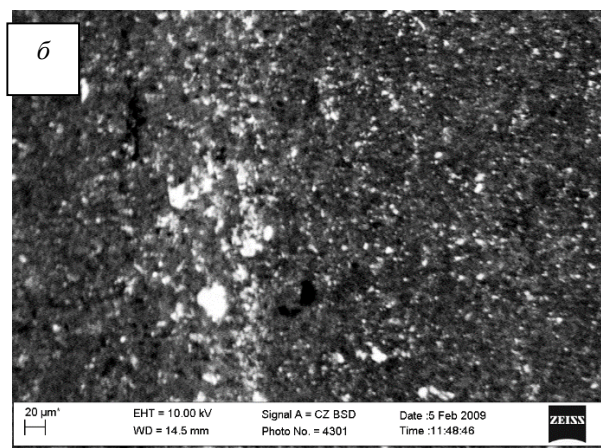


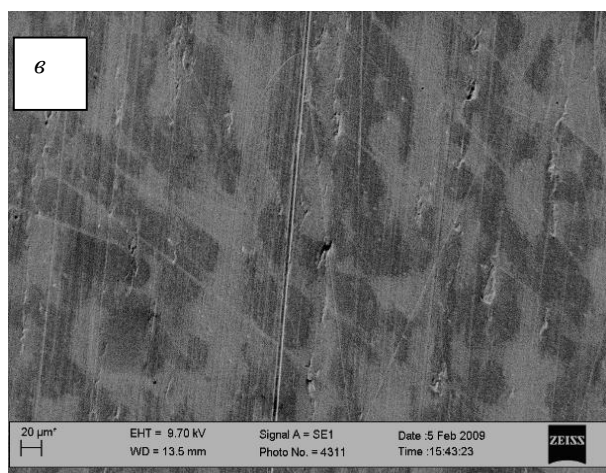
Рис. 4. Залежності μ ЕДП від навантаження за умов тертя з контртілом з бабіту



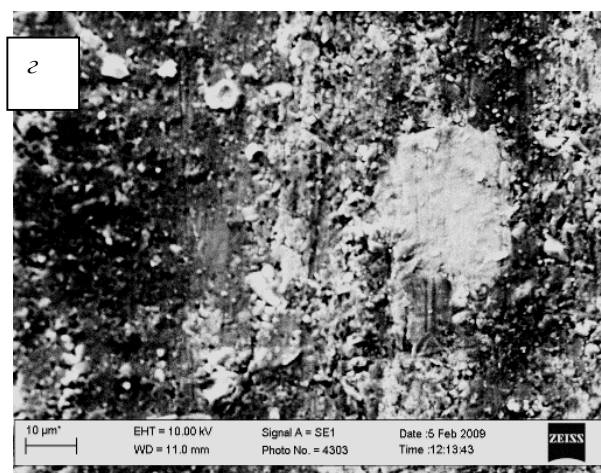
Вириг фрагментів із хромового покриття



Шаржування частинками хрому поверхні контртіла із бабіту



Поверхня БРС 30



Шаржування поверхні бабіту частинками електродугового покриття

Рис. 5. Топографія поверхонь тертя

Порівняльні трибологічні характеристики ЕДП та хрому за умов граничного змащення у середовищі 3 % емульсору.

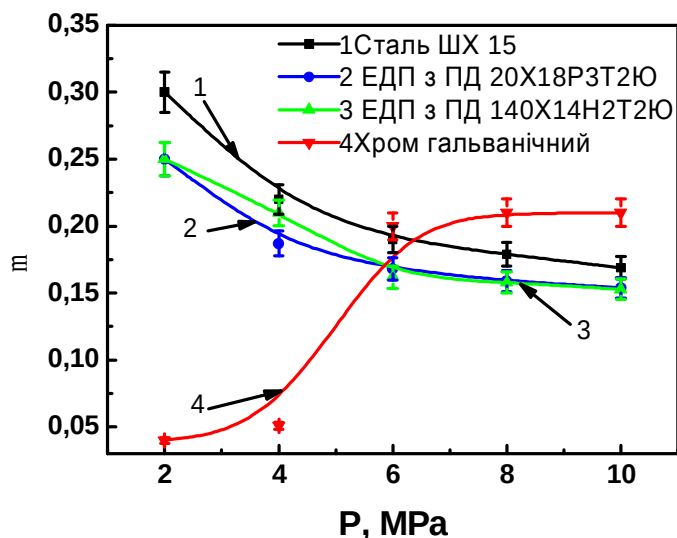


Рис. 6. Залежності μ ЕДП від навантаження за умов тертя з контртілом з СЧ 30

Випробовування на тертя у середовищі 3 %-го емульсолу марки Hydroway 1060 показало зменшення коефіцієнта тертя для пар тертя ЕДП, сталь ШХ 15 – чавун ($\mu=0,3 \pm 0,01$ ($P=0,95$), $\epsilon = 3,5$ % проти $\mu=0,17 \pm 0,01$ ($P=0,95$), $\epsilon = 6$ % для сталі та $\mu=0,25 \pm 0,01$ ($P=0,95$), $\epsilon = 3,5$ % проти $\mu=0,15 \pm 0,01$ ($P=0,95$), $\epsilon = 7$ % для ЕДП з ПД 140X14H2T2Ю для ЕДП з ПД 20X18P3T2Ю абсолютні значення за мінімального – 2 МПа та максимального – 10 МПа є такими самими, як і для ЕДП з ПД 140X14H2T2Ю. Однак для пари тертя гальванічний хром – чавун СЧ 30 спостерігаємо зворотну тенденцію (рис. 6), коефіцієнт тертя зростає від $\mu=0,045 \pm 0,003$ ($P=0,95$), $\epsilon = 7$ % за навантаження 2 МПа і до $\mu=0,2 \pm 0,012$ ($P=0,95$), $\epsilon = 6,2$ % – за 10 МПа.

Для усіх пар тертя із контртілом із бронзи БрС 30 спостерігається зменшення коефіцієнта тертя (рис. 7), причому пара гальванічний хром–бронза БрС 30 має найменші значення коефіцієнта тертя як за малого навантаження $\mu=0,2 \pm 0,016$ ($P=0,95$), $\epsilon = 8$ %, так і за збільшення навантаження до 10 МПа $\mu=0,13 \pm 0,011$ ($P=0,95$), $\epsilon = 7$ %.

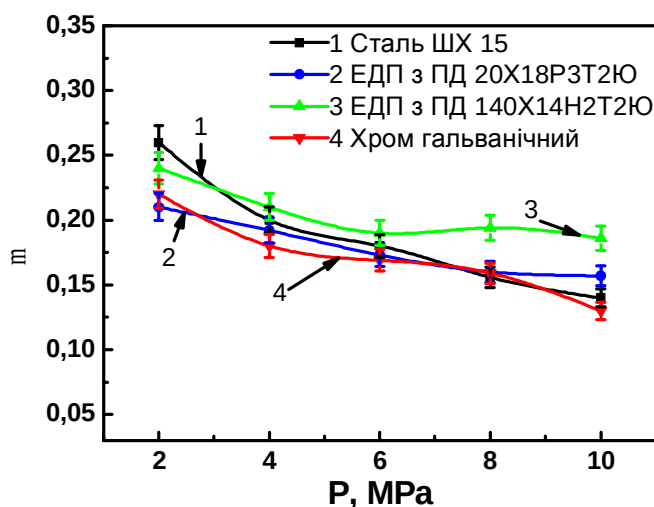


Рис. 7. Залежності μ ЕДП від навантаження за умов тертя з контртілом з БрС 30

Це підтверджує відому істину – пара тертя: гальванічний хром – бронза має найкращі трибологічні властивості.

Для пар тертя ЕДП сталь ШХ 15 – бабіт коефіцієнти тертя зменшуються із зростанням навантаження (рис. 8). Так, для ЕДП з ПД 20Х18РЗТ2Ю коефіцієнт тертя змінюється від $\mu=0,116 \pm 0,011$ ($P=0,95$), $\varepsilon = 9,5 \%$, і до $\mu=0,052 \pm 0,003$ ($P=0,95$), $\varepsilon = 5,4 \%$; а для ЕДП з ПД 140Х14Н2Т2Ю від $\mu=0,1 \pm 0,005$ ($P=0,95$), $\varepsilon = 4,6 \%$, і до $\mu=0,065 \pm 0,001$ ($P=0,95$), $\varepsilon = 1,5 \%$; для сталі ШХ 15 $\mu=0,137 \pm 0,004$ ($P=0,95$), $\varepsilon = 3,1 \%$; проти $\mu=0,064 \pm 0,002$ ($P=0,95$), $\varepsilon = 3,7 \%$.

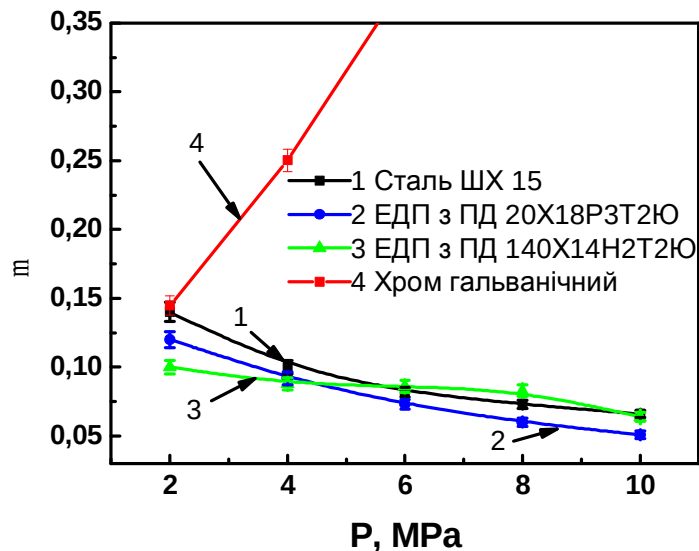


Рис. 8. Залежності μ ЕДП від навантаження за умов тертя з контртілом з бабіту

Проте у цьому середовищі коефіцієнт тертя є значно нижчий, ніж у середовищі оливи І-20. Такі низькі значення коефіцієнта тертя зумовлені тим, що на відміну від оливи І-20 в емульсолі додають добавки поверхнево активних речовин (жирні кислоти RCOOH , аліфатичні спирти ROH , їх ефіри R_1COOR_2 та аміни RNH_2 , де R – вуглеводневий радикал $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}$). Молекули жирних кислот за повного насичення адсорбційного шару зосереджені на металевих поверхнях перпендикулярно до поверхні так, що карбоксильна група виявляється прикріпленою до металу, а вуглеводневий ланцюжок виходить у шар оливи. Утворений в такий спосіб ворс з молекул формує на поверхні пар тертя антифрикційну плівку, яка сприймає дію зовнішніх зусиль, деформуючись під їх впливом. Для пари тертя хром – бабіт у середовищі емульсолу так само, як і в середовищі оливи І-20, виявлено стрімке зростання коефіцієнта тертя вже за питомого навантаження вище 2 МПа. Як і у випадку тертя в середовищі оливи І-20 реалізується явище схоплювання поверхонь тертя, при цьому відриваються фрагменти хромового покриття та переносяться на поверхню бабіту і всотуються у його поверхню. Це викликає катастрофічне зношування такої пари тертя (рис. 9).

Порівняльні трибологічні характеристики ЕДП та хрому за умов граничного мащення в мастилі М10В2. Випробування, проведені під час граничного тертя, показали, що значення коефіцієнта тертя для напиленого покриття з ПД 140Х14РЗНТЮ2 є меншими, ніж для гальванічного хрому за умов граничного мащення у мастилі М10В2 з контртілом зі сталі 40ХН, особливо за високих питомих навантажень (рис. 9): $15 \mu=0,016 \pm 0,001$ ($P=0,95$), $\varepsilon = 6,5 \%$; проти $\mu=0,019 \pm 0,001$ ($P=0,95$), $\varepsilon = 6,7 \%$.

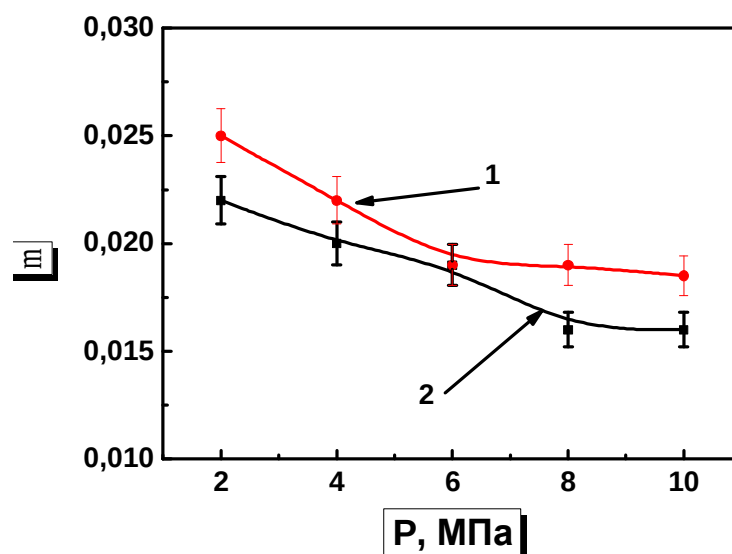


Рис. 9. Залежності μ від навантаження за умов тертя контртіла із сталі 40ХН (HRC42) з: 1 – хром гальванічний; 2 – ЕДП з ПД 140Х14РЗНТЮ2

Крім того, втрата маси гальванічного хрому, його контртіла, а також їх сумарне зношення є істотно більшим, ніж для пари тертя покриття з ПД 140Х14РЗНТЮ2 – контртіло сталь 40ХН (рис. 10). Це зумовлено наявністю пор у напиленому покритті, які забезпечують більшу товщину граничної плівки із мастила на поверхні тертя, та існування її тривалішого терміну.

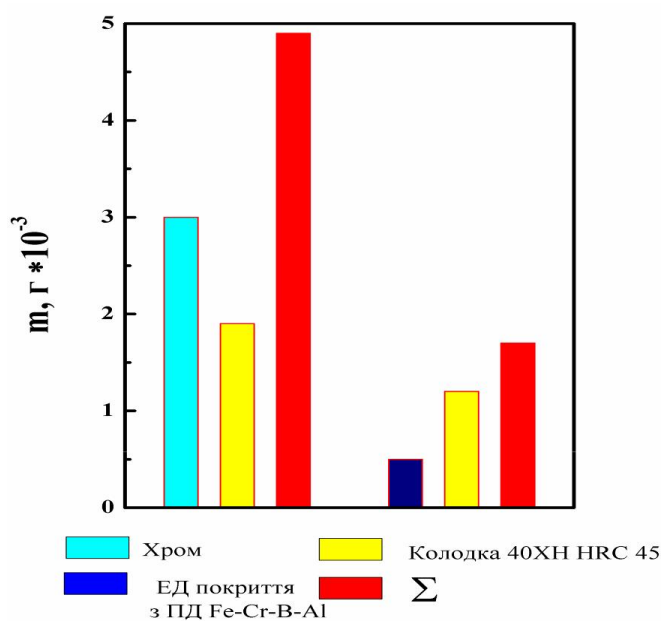


Рис. 10. Зносостійкість твердого гальванічного хрому та покриття з ПД 140Х14РЗНТЮ2 в парі тертя із контртілом сталь 40ХН (HRC 45) за граничного тертя (мастило М10В2):
питоме навантаження – 5 МПа; час випробовувань – 11 год

Висновки. Встановлено, що із ростом питомого навантаження в середовищі оливи І-20, а також 3 % емульсолу 1060 коефіцієнт тертя в парах тертя ЕДП – чавун, ЕДП – бронза та ЕДП – бабіт зменшується, причому для пари ПД – бабіт – найбільшою мірою. Пара тертя гальванічний хром – бабіт є непрацездатною як в оливі І-20, так і в 3 %-му емульсолі.

1. Pokhmurskyi V. Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures / V. Pokhmurskyi, M. Student, V. Gvozdeckii, T. Stupnytskyi, O. Student, B. Wielage, H. Pokhmurska // *Journal of Thermal Spray Technology*. – 2013. – № 22, Iss. 5. – P. 808–819.
2. Wielage B. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures / B. Wielage, H. Pokhmurska, M. Student, V. Gvozdeckii, T. Stupnytskyi, V. Pokhmurski // *Surface and coating technology*. – 2013. – № 220. – P. 27–35.
3. Pokhmurskyi V. Electrochemical properties of arc sprayed coatings from cored wires on the basis of cheap ferroalloys / V. Pokhmurskyi, M. Student, N. Chervinska, T. Stupnytskyi // *Ochrona przed korozja*. – 2013. – № 11. – P. 516–518.
3. Похмурський В. Газоабразивная износостойкость при повышенных температурах покрытий, полученных дуговой металлизацией / В. Похмурський, М. Студент, А. Похмурская, И. Рябцев, В. Гвоздецкий, Т. Ступницький // *Автоматическая сварка*. – 2013. – № 6. – С. 16–23.
4. Похмурський В. Структура, механічні та електрохімічні характеристики корозійностійких електродугових покриттів із порошкових дротів / В. Похмурський, М. Студент, Т. Ступницький, Н. Червінська // *Наукові нотатки*. – 2013. – 2, № 41. – С. 127–132.
5. Похмурський В. Засади створення корозійностійких електродугових покриттів із порошкових дротів / В. Похмурський, М. Студент, Т. Ступницький, Н. Червінська, А. Кондир // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2012. – Спецвип. № 9, Т. 2. – С. 600–606.
6. Похмурський В. Вплив складу шихти порошкових дротів на механічні властивості електродугових покриттів / В. Похмурський, М. Студент, В. Гвоздецький, Т. Ступницький, О. Мажейка, С. Маркович // *Зб. наук. пр. Кіровоградського національного технічного університету “Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація”*. – 2012. – 2, № 25. – С. 323–333.
7. Похмурський В. Трибологічна поведінка електродугових покриттів із порошкових дротів системи Fe–Cr–B–Al за робочих умов штоків запірних вентилів ТЕС / В. Похмурський, М. Студент, Т. Ступницький, В. Гвоздецький, Я. Сірак // *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. – 2012. – № 3(67). – С. 81–91.