

УДК 621.793:621.311.22

**В. Похмурський, докт. техн. наук, проф.; М. Студент, докт. техн. наук;
Т. Ступницький; В. Гвоздецький; Я. Сірак**

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

ТРИБОЛОГІЧНА ПОВЕДІНКА ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ ІЗ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ СИСТЕМИ Fe-Cr-B-Al ЗА РОБОЧИХ УМОВ ШТОКІВ ЗАПІРНИХ ВЕНТИЛІВ ТЕС

Резюме. Досліджено трибологічну поведінку електродугових покриттів із ПД системи Fe-Cr-B-Al за робочих умов штоків запірних вентилів ТЕС. Встановлено, що коефіцієнт тертя досліджуваних покриттів за умов сухого тертя та прикладеному навантаженні більше 4 МПа є таким же, як і для сталі ШХ 15. Виявлено, що дані покриття добре працюють у контакті з графітовим ущільненням. Також виявлено позитивний вплив просочування електродугових покриттів синтетичними оливами для умов роботи сухого тертя, що зумовлено їхньою структурою, і не залежить від системи легування.

Ключові слова: електродугові покриття, зносостійкість, коефіцієнт тертя, шток запірного вентиля, графіт, пористість.

V. Pokhmurskyu, M. Student, T. Stupnytskyu, V. Gvozdeckii, Y. Sirak

TRIBOLOGICAL BEHAVIOUR OF ARC SPRAYED COATINGS MADE OF Fe-Cr-B-Al CORED WIRES UNDER THE SERVICE CONDITIONS OF THE HTTP VALVE SPINDLES

Summary. The tribological behavior of arc sprayed coatings made of Fe-Cr-B-Al cored wires has been investigated under the service conditions of the heat power plant valve spindle. The arc sprayed coatings have a characteristic lamella structure, lamellas being the solidified droplets separated by oxide films of different nature and thickness, the grinded surface of which is the composite – in the matrix from steel lamellas the particles of oxide phases are available, therefore the structure of such coatings causes their special tribological behavior.

It was investigated, that in the dry friction condition under loading of 2 MPa, the friction coefficient of the ШХ 15 steel is lower than for the coating obtained from Fe-Cr-B-Al cored wire, and is equal to 0.32, and under loading more than 4 MPa it equals 0.42. It testifies that under loading less than 2 MPa the tribological properties of ШХ 15 steel are better, however with the increase of loading this phenomenon is not available.

It was suggested to investigate the influence of solid lubricant CaF₂ on the friction coefficient behavior of arc sprayed coatings made of Fe-Cr-B-Al cored wires. The adding of the CaF₂ powder to the mixture of cored wires provides the change of the coating friction coefficient and its behavior is similar to the behavior of the ШХ 15 steel friction coefficient, but, nevertheless, the nominal values are too high and under loading – 5 MPa it equals 0.4.

It was found that under the dry friction condition when the loading was 5-6 MPa the temperature on the surface of the coating equals 250-300°C and the oxide films are formed there. The oxide film is formed on the surface on steel – less-alloyed Cr, on coatings – much-alloyed Cr. In the friction tests these oxide films break and form abrasive particles which cause the significant abrasive wear of both, coating and counterbody – 3X13 steel.

It was found that such coatings have very low values of friction coefficients – 0.12-0.15 under conditions of the dry friction in contact with counterbody with built-in graphite. Moreover, with the increase of loading from 2 to 10 MPa the friction coefficient decreases. It was explained by the fact that arc sprayed

coatings have on its surface pores and the graphite is accumulated in them during friction and then it forms the boundary friction film on the friction surface.

It was found that during wear resistance tests the 3X15 steel wears the least but its counterbody made of 3X13 steel is subject to significant wear under the dry friction condition, therefore the total wear of this friction pair is higher than for the arc sprayed coating.

The positive influence of sealing arc sprayed coatings with synthetic oil was revealed too for the dry friction condition. It was determined that sealing of arc sprayed coatings made of Fe-Cr-B-Al cored wires with synthetic oil Synth 5W40 provides the increasing of their wear resistance in 12 times as compared with those made of 3X15 steel and in 9 times as compared with unsealed coatings. The sealed arc sprayed coatings made of Fe-Cr-C-Al cored wires provide the increase of their wear resistance in 9 times in comparison with 3X15 steel and in 5 times as compared with unsealed coatings. Such influence of sealing coatings with oil on their wear resistance is likely to be caused by their structure which depends on spraying parameters and doesn't depend on their alloying system.

Key words: arc sprayed coatings, wear resistance, friction coefficient valve spindle, graphite, porosity.

Постановка проблеми. Економічність роботи електростанції визначається не виробничими втратами, серед яких значний відсоток займають втрати конденсату. Загальні витрати живильної води на 1 котел ТЕС за рік складає в середньому 2000000 т. Тому зниження втрат конденсату тільки на 1 % при потужності агрегатів 150 МВт може дати річну економію в 280 тис. т. умовного палива. Відомо, що основною причиною втрат конденсату є нещільність запірної арматури. Одним із важливих елементів запірної арматури є штоки. Шток працює в умовах постійного або періодичного тертя із сідлом зі сталі 3X13, сальниковою набивкою та різьбовою втулкою рухомого вузла. Під час роботи вентилів, при спрацюванні графітного ущільнення, циліндрична поверхня штоків вентиля контактує із металевим кільцем. При цьому реалізуються умови сухого тертя і можливе пришвидшене зношування контртіла – сталюого кільця та бічної ущільнювальної поверхні штока, утворення задирів і, як наслідок, втрата герметичності сальникового вузла (рис. 1). Внаслідок незадовільної роботи запірної арматури знижується надійність, ефективність та економічність роботи теплосилового обладнання електростанції, що може спричинити необхідність припинення роботи ТЕС або її окремих систем. У зв'язку з цим надійність роботи арматури багато в чому визначає надійність роботи ТЕС [1–4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні ущільнювальні поверхні штоків захищають шляхом нанесення на цю поверхню твердого гальванічного хрому, який має високі твердість та корозійну стійкість у водних середовищах. Однак процес гальванічного хромування є екологічно небезпечний. Директивами Євросоюзу передбачено повну заборону використання цього процесу після 2020 р. У зв'язку з цим інтенсивно проводяться експериментальні дослідження із заміни процесу гальванічного хромування на альтернативні технології. Найбільш технологічними із них вважають газотермічні методи нанесення покриттів [5...10]. Найдешевшим, найпродуктивнішим та технологічно найпростішим з них є електродугове напилення із використанням порошкових дротів. Порошкові дроти дозволяють отримувати електродугові покриття із високими твердістю (1000...1300 НВ) та абразивною зносостійкістю, проте з високою хімічною гетерогенністю та пористістю [11].

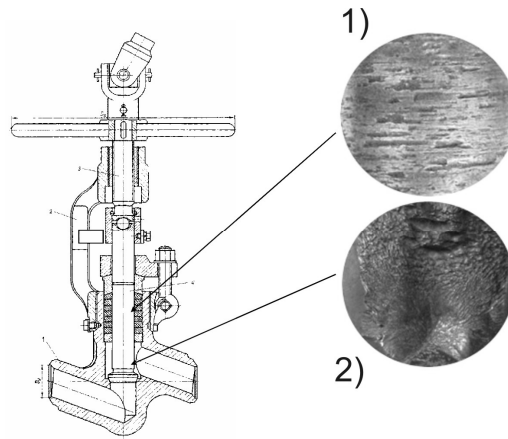


Рисунок 1. Характер руйнування ущільнювальних поверхонь:

1) задири; 2) корозійно-ерозійне руйнування
 Figure 1. Breaking character of sealing surfaces:
 1) strips; 2) corrosion-erosion breaking

Мета роботи. Дослідити трибологічну поведінку електродугових покриттів системи Fe-Cr-B-Al з умістом Cr 13% в парі із контртілом зі сталі 3X13 в умовах сухого тертя, а також виявити вплив просочування мастилом цих покриттів на їхню трибологічну поведінку. Встановити придатність електродугових покриттів системи Fe-Cr-B-Al з умістом Cr 13% для відновлення зношених поверхонь запірних вентилів.

Методика досліджень. Покриття із ПД наносили електродуговим металізатором ЭМ-17 за таких режимів: напруга – 30–32 В, струм – 150 А, тиск повітря – 0,6 МПа, дистанція наплення – 150 мм, товщина покриття після шліфування – 0,7 мм. Температуру поверхні тертя під час сухого тертя заміряли лазерним пірметром “Смотрич 8М”.

Досліджували ПД системи Fe-Cr-B-Al та Fe-Cr-C-Al з додаванням твердого мастила CaF₂ (табл. 1).

Таблиця 1. Хімічний склад досліджуваних ПД
 Table 1. Chemical composition of researched cored wires

	Cr	B	Al	C	CaF ₂
Fe-Cr-B-Al	13,0	3,0	6,0	-	-
Fe-Cr-B-CaF₂-Al	13,0	3,0	6,0	-	3,0
Fe-Cr-C-Al	13,0	-	1,5	1,1	-

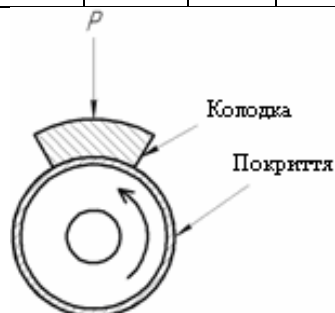


Рисунок 2. Схема дослідження зносостійкості покриттів при сухому терті
Figure 2. Scheme of wear resistance tests under dry friction condition

Випробування на зношування покриттів проводили в умовах сухого тертя в парі з колодкою зі сталі 3X13 (HRC-42) за схемою диск–колодка на установці СМЦ-2 (рис. 2) за питомих навантажень 2–10 МПа. Вимірювання втрати маси проводили на електронній аналітичній вазі марки KERN з точністю 0,0001 г.

Шліфовані покриття нагрівали до 100⁰С та просочували в середовищі оливи Synth 5W40, максимальна робоча температура якої становить 225⁰С, упродовж 2 год. Так як на поверхні покриття (у вентилі) верхній шар мастила може вимиватися паром, то в нашому експерименті моделювалися умови мастильного голодування. Просочений оливою та шліфований зразок із покриттям промивали у середовищі бензину “Галоша” в ультразвуковій ванні протягом 30 хв. Після такого промивання у верхніх шарах покриття олива – відсутня. Далі зразки нагрівали до 300⁰С з витримкою при цій температурі 1 год., для того, щоб пройшла деструкція оливи, що проникла в пори покриття.

Результати дослідження. Електродугові покриття мають типову ламелярну будову. Ламелі – закристалізовані краплини, розділені між собою оксидними плівками різної природи й товщини. Крім того, у структурі покриттів є крупні ламелі із оксидів

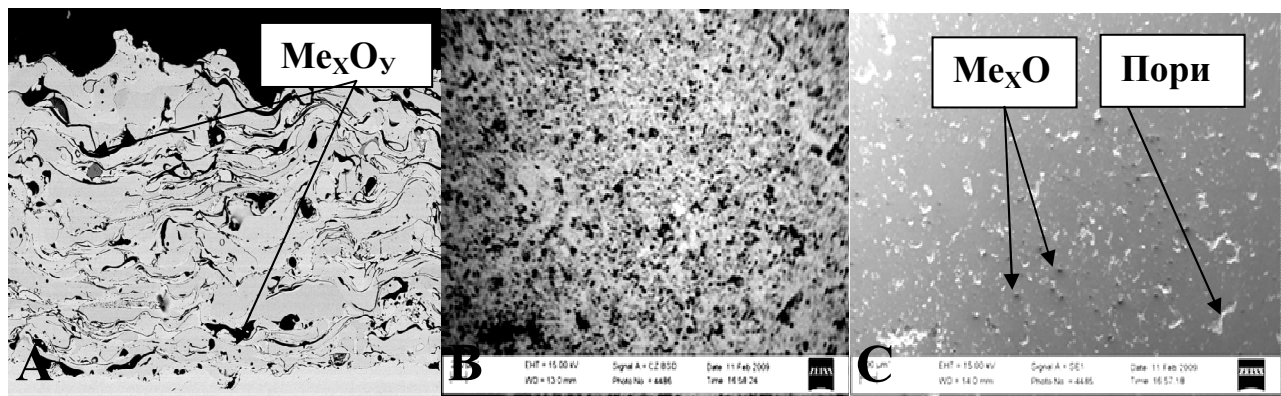


Рисунок 3. Типова мікроструктура покриттів (А); Поверхня шліфованих покриттів в прямих електронах (В) у відбитих електронах (С)

Figure 3. Characteristic microstructure of the arc sprayed coatings (A); Grinded surface of coatings at SE (B) and BSD (C)

(рис. 3А). Шліфована поверхня являє собою композит – в матриці із металевих ламелей є острівки оксидних фаз (рис. 3 В, С).

Така структура зумовлює особливу трибологічну поведінку як за умов сухого тертя, так і під час тертя за умов граничного мащення.

Встановлено, що за випробувань при сухому терті для пари диск (сталь ШХ 15) – колодка (сталь 3X13) навіть при малому питомому навантаженні (2 МПа) коефіцієнт тертя є високим і проходить мікросхоплення між контактуючими поверхнями (рис. 4А), про що свідчать скачки коефіцієнта тертя в часі. Зі збільшенням питомого навантаження від 2 до 6 МПа коефіцієнт тертя зростає та зростає кількість ділянок схоплення на поверхнях тертя (рис. 4В)

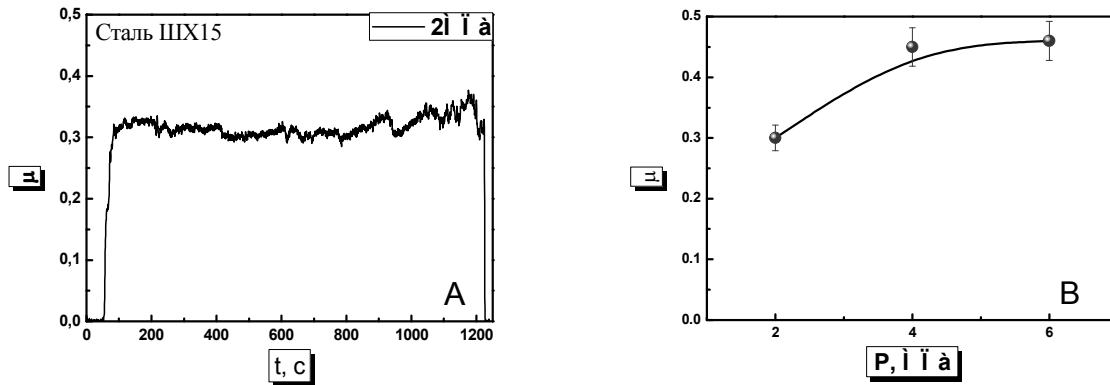


Рисунок 4. Залежність коефіцієнта тертя сталі ШХ15 від часу (А) та питомого навантаження (В)
 Figure 4. Dependence of the ШХ 15 steel friction coefficient on time (A) and loading (B)

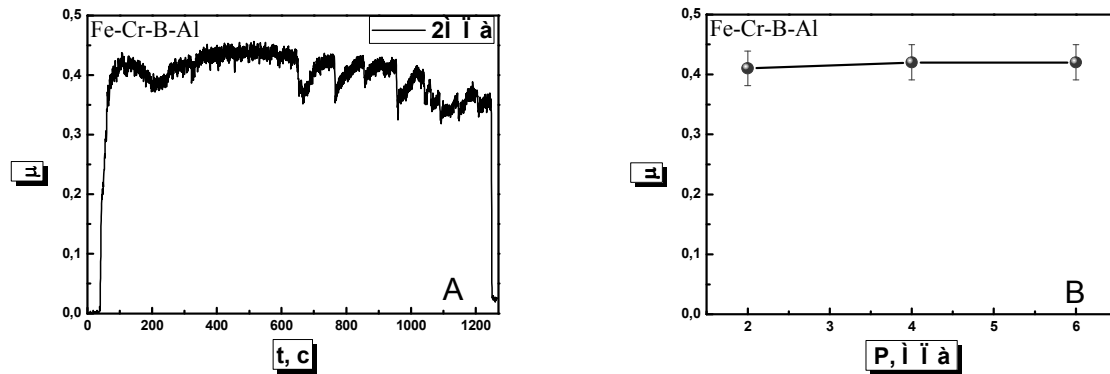


Рисунок 5. Залежність коефіцієнта тертя пари тертя покриття з ПД Fe-Cr-B-Al – сталь 3X13 від часу (А) та питомого навантаження (В) за умов сухого тертя
 Figure 5. Dependence of the friction coefficient of friction pair cored wire from Fe-Cr-B-Al- 3Cr13 steel on time (A) and loading (B) under dry friction condition

Для пари тертя покриття з ПД Fe-Cr-B-Al – сталь 3X13 при 2 МПа коефіцієнт тертя дещо вищий – 0,4, а з часом характеризується також стрибками, що свідчать про суттєве схоплення поверхонь тертя, незважаючи на наявність оксидної фази у структурі покриття (рис. 5А). Зі збільшенням питомого навантаження від 2 до 6 МПа коефіцієнт тертя цієї пари практично не змінюється (рис. 5В).

Для зниження коефіцієнта тертя у шихту ПД Fe-Cr-B-Al додавали 3 % мас. твердого мастила – порошку CaF_2 , що призводить до деякого зменшення коефіцієнта тертя при малих питомих навантаженнях (рис. 6А), однак при збільшенні питомого навантаження він суттєво зростає і вже при 5 МПа становить 0,4, приймаючи такий рівень, як без твердого мастила.

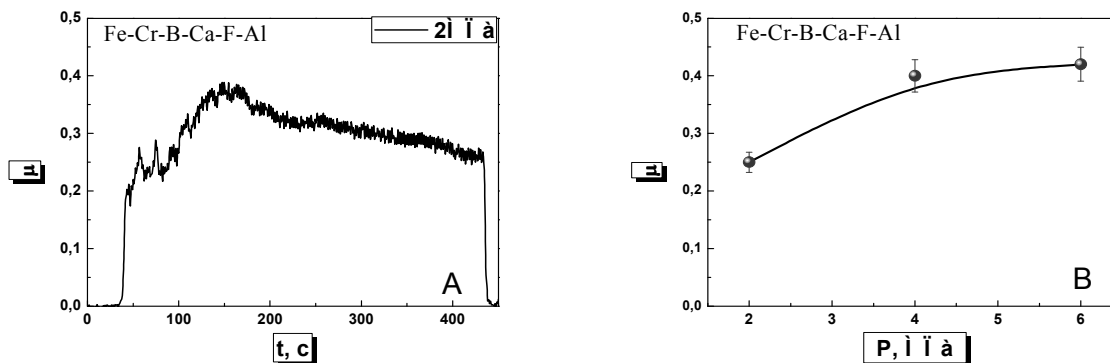


Рисунок 6. Залежність коефіцієнта тертя пари тертя покриття з ПД Fe-Cr-B-Ca-F-Al – сталь 3X13 від часу (А) та питомого навантаження (В) за умов сухого тертя
 Figure 6. Dependence of the friction coefficient of friction pair cored wire Fe-Cr-B-Ca-F-Al- 3Cr13 steel on time (A) and loading (B) under dry friction condition

Загалом поведінка коефіцієнта тертя покриття з CaF_2 за різних навантажень подібна до сталі (рис. 4В, 6В). Додавання CaF_2 у шихту ПД виявилось неефективним.

З'ясовано, що при сухому терті вже при 5–6 МПа температура поверхні диска становить 250–300°C. При цьому на поверхні утворюється плівка оксидів на сталі – малолегована Cr, на покриттях – значно легована Cr (рис. 7А, В). При терті оксидні плівки руйнуються та слугують абразивними частинками, що викликають суттєве абразивне зношування як покриття, так контртіла – сталі 3X13.

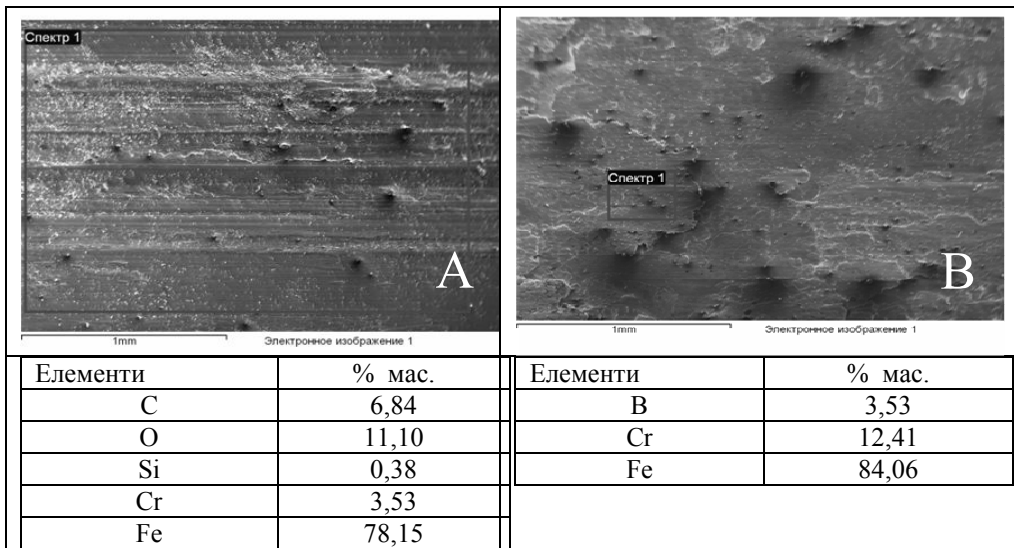


Рисунок 7. Структура поверхні сталі ШХ 15 (А) та покриття електродугового покриття (В) після випробувань на сухе тертя
 Figure 7. Structure of ШХ15 steel surface (A) and arc sprayed coating (B) after tests under dry friction condition



Рисунок 8. Схема випробувань зносостійкості покриттів на сухе тертя з графітною вставкою
 Figure 8. Scheme of wear resistance tests with counterbody with built in graphite under dry friction condition

Для імітації реальних умов роботи ущільнювальних поверхонь штоків вентиля, дослідження проводили за схемою диск – колодка, при цьому в колодку зі сталі 3X13 вмонтували графітну вставку (рис. 8). За таких умов випробувань для пари тертя сталь ШХ15–сталь 3X13 вставка графіту у колодку суттєво зменшує коефіцієнт тертя, проте він також зростає зі збільшенням питомого навантаження від 2 до 8 МПа, як і у випадку, коли колодка без графітної вставки (рис. 9).

Для пари тертя покриття системи Fe-Cr-B-Al – сталь 3X13 вставка графіту суттєво знижує коефіцієнт тертя (рис. 10). Причому чим вищий рівень питомого навантаження, тим сильніше зменшується коефіцієнт тертя. При питомому навантаженні 6-8 МПа

коефіцієнт тертя становить 0,12.

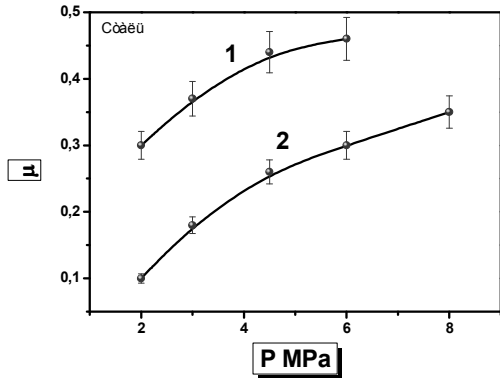


Рисунок 9. Залежність коефіцієнта тертя пари сталь ШХ15-3Х13 від питомого навантаження (1 – сухе тертя; 2 – тертя з графітовою вставкою)

Figure 9. Dependence of the friction coefficient of friction pair ШХ15-3Cr13 steels on specific loading (1 – dry friction; 2 – friction with graphite)

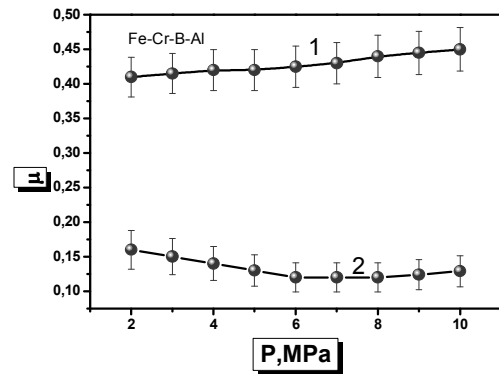


Рисунок 10. Залежність коефіцієнта тертя пари тертя покриття системи Fe-Cr-B-Al- сталь 3Х13 від навантаження (1 – сухе тертя; 2 – тертя з графітовою вставкою)

Figure 10. Dependence of the friction coefficient of friction pair coating made of Fe-Cr-B-Al –3Cr13 steel on loading (1– dry friction; 2 – friction with graphite)

Такий низький рівень коефіцієнта тертя зумовлений наступним. Напилені покриття мають на своїй поверхні пори глибиною до мікрона на відміну від сталі, профілограми яких наведено на рис. 11 та 12. При терті по вкладки з графітом він проникає у пори, як у кишень, і там акумулюється (рис. 13). При високих питомих навантаженнях він слугує джерелом мастила та додатково формує графітну плівку на поверхнях тертя.

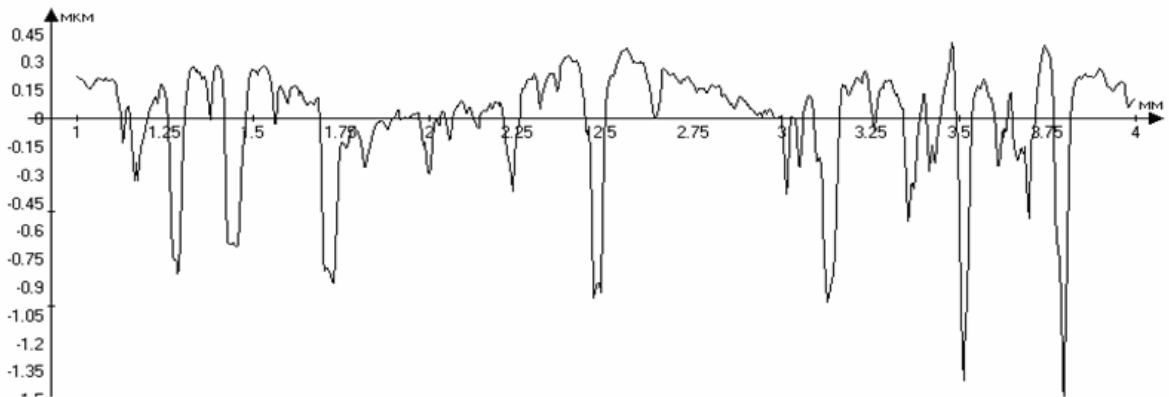


Рисунок 11. Профілограма покриття
Figure 11. Profilogram of an arc sprayed coating

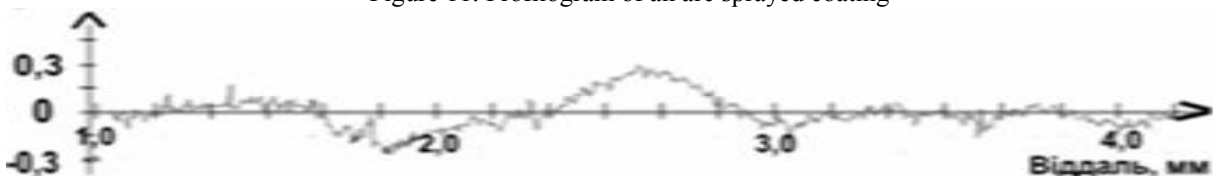


Рисунок 12. Профілограма сталі
Figure 12. Profilogram of steel

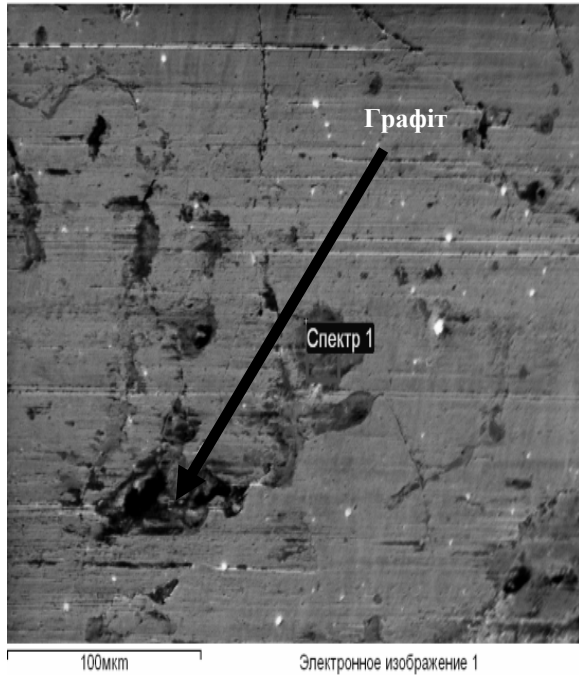


Рисунок 13. Мікроструктура покриття Fe-Cr-B-Al після випробовувань на сухе тертя з графітною вставкою

Figure 13. Microstructure of Fe-Cr-B-Al coating after wear resistance tests with graphite under dry friction condition

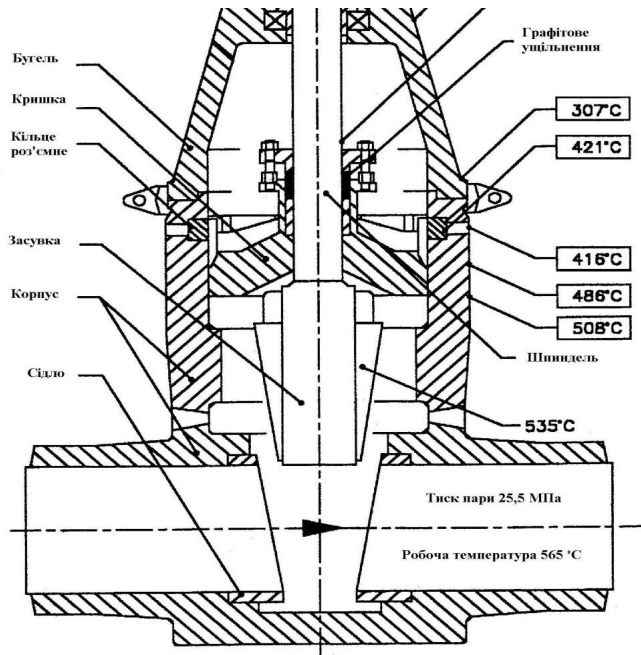


Рисунок 14. Термограма вентиля
Figure 14. Thermogram of the valve

На термограмі вентиля (рис. 14) наведено температурні діапазони, в яких працюють деталі вентиля. Як бачимо, максимальна температура циліндричної поверхні штока, що працює в контакті з графітним ущільненням, становить 325°C . Виходячи із цього, виникла ідея перевести сухе тертя або тертя із наявністю графітної плівки в граничне тертя. Як відомо, максимальна робоча температура оливи, які комерційно виготовляють та продають у відкритому продажі, становить 350°C . Це оливи на силіконовій основі. Для наших досліджень вибрали доступнішу оливу Synth 5W40, максимальна робоча температура якої становить 225°C .

При сухому терті просочених такою оливою зразків у перший момент часу до 20–30 сек. коефіцієнт тертя досягає 0,2, однак швидко знижується до 0,07. Очевидно, що продукти деструкції оливи, які знаходяться в нижніх шарах покриття, у мікропустотах покриття як по капілярах піднімаються у верхні шари і там на поверхні тертя формують граничну плівку.

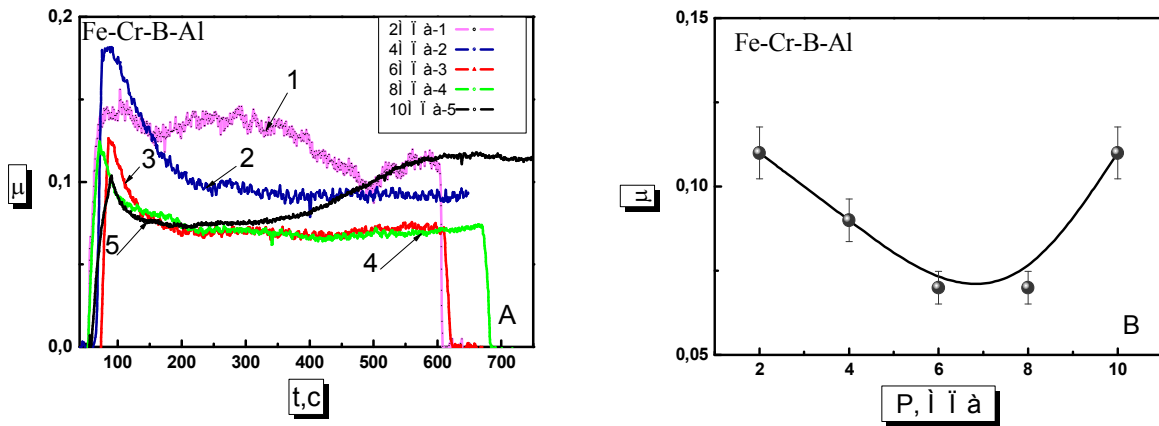


Рисунок 15. Залежність коефіцієнта тертя пари тертя покриття системи Fe-Cr-B-Al (покриття після просочення мастилом) – сталь 3X13 (A) від часу; (B) від питомого навантаження
 Figure 15. Dependence of friction coefficient of friction pair coating made of Fe-Cr-B-Al (sealed with oil) – 3Cr13 steel on time (A) and loading (B)

При цьому коефіцієнт тертя суттєво зменшується (рис. 15A), навіть за високих питомих навантажень (рис. 15B).

Випробування на зносостійкість при сухому терті без графітної вставки показали, що при питомому навантаженні 2 МПа найменше зношується диск зі сталі ШХ15, проте він найбільше зношує контртіло 3X13, і сумарний знос цієї пари є найбільшим (рис. 16).

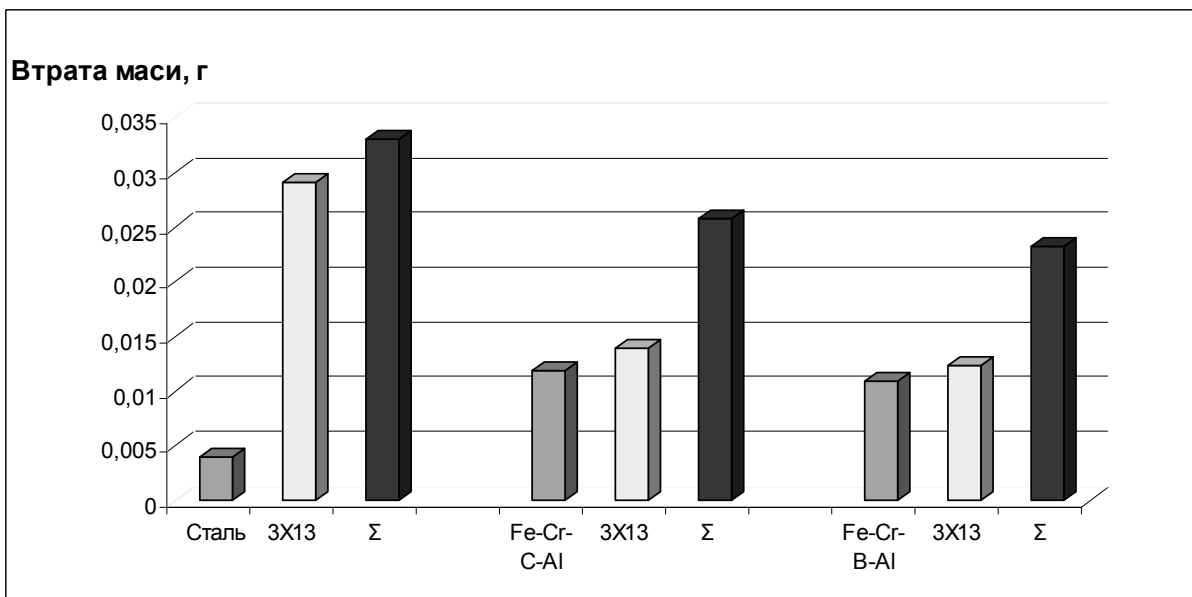


Рисунок 16. Випробування на зносостійкість при сухому терті
 Figure 16. Wear-resistance tests results under dry friction condition

Просочування мастилом покриттів системи Fe-Cr-B-Al з наступним промиванням у бензині та витримці за температури 300⁰С суттєво зменшує їх знос (рис. 17) і, очевидно, що це незалежно від системи легування, а зумовлено їх пористою структурою.

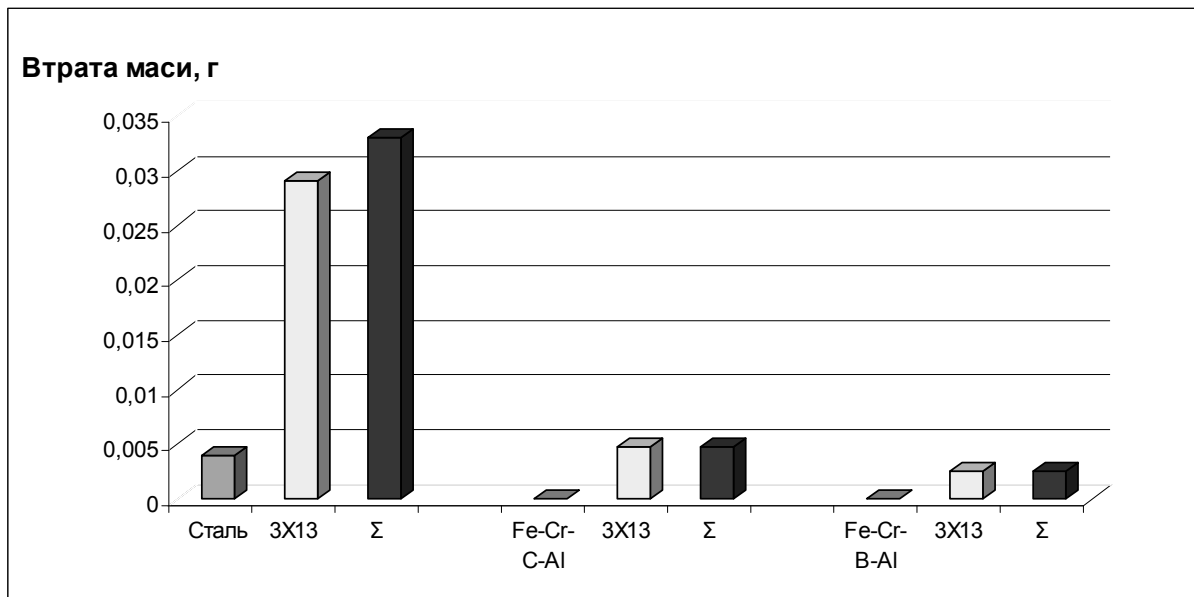


Рисунок 17. Випробування на зносостійкість при терті (тертя після просочення покриттів мастилом)
 Figure 17. Wear-resistance tests results(friction of sealed with oil coatings)

Висновки

- Коефіцієнт тертя покриття (ПД Fe-Cr-B-Al) в парі з контр тілом (сталь 3X13), за умов сухого тертя, при малих навантаженнях є більшим, ніж для пари тертя сталь ШХ15 – сталь 3X13, а при збільшенні навантаження понад 4 МПа стає рівним.
- За умов тертя із графітною вставкою коефіцієнт тертя покриття із ПД Fe-Cr-B-Al в парі з контртілом (сталь 3X13) є в 2...4 рази меншим, ніж для пари тертя сталь ШХ15 – сталь 3X13.
- Сумарне зношування пари тертя (покриття системи Fe-Cr-B-Al без твердого мастила – сталь 3X13) є на 30% меншим, ніж для пари тертя (сталь ШХ15 – сталь 3X13).
- Просочування покриттів синтетичними оливами з наступними витримками за підвищених температур зумовлює утворення в порах та на поверхні покриттів, продуктів деструкції оливи, які можуть забезпечити збільшення зносостійкості до 7 разів і, очевидно, що це незалежно від системи легування, а зумовлено їх структурою. Після такої обробки електродугові покриття з підвищеним умістом Cr можна рекомендувати для роботи в умовах підвищених температур та сухого тертя.

Conclusion

- The friction coefficient of the friction pair coating made of cored wires Fe-Cr-B-Al – 3X13 steel under small loading during the dry friction is higher than for the friction pair ШХ15 steel – 3X13 steel, but with the loading increase more than 4 MPa it becomes equal.
- Under the friction conditions with a counter body with built in graphite the friction coefficient of the friction pair coating Fe-Cr-B-Al – 3X13 steel is in 2..4 times lower than for the friction pair ШХ15 steel – 3X13 steel.
- Total friction pairs wear (Fe-Cr-B-Al coatings without solid lubricant-3X13steel) is by 30% lower than ШХ15 steel – 3X13 steel friction pair wear.
- Sealing of coatings with the synthetic oils and further aging at the raised temperatures causes the formation of oil destruction products in the pores and on the surface of the

coating, which can provide the increase of wear resistance in 7 times and it is unlikely to depend on their alloying system, but is caused by their structure. After such treatment arc sprayed coatings with the increased Cr content can be recommended for application under conditions of raised temperatures and dry friction.

Список використаної літератури

1. Имбрицкий, М.И. Справочник по арматуре тепловых электростанций [Текст] / М.И. Имбрицкий. – М.: Энергоиздат, 1981. – 304 с.
2. Имбрицкий, М.И. Краткий справочник по трубопроводам и арматуре [Текст] / М.И. Имбрицкий. – М.: Энергия, 1969. – 352 с.
3. Имбрицкий, М.И. Справочник по трубопроводам и арматуре химических цехов электростанций [Текст] / М.И. Имбрицкий. – М.: Энергия, 1974. – 170 с.
4. Кинжер, А.Х. Ремонт трубопроводной арматуры электростанций: учеб. пособие для проф. обучения рабочих на производстве [Текст] / А.Х. Кинжер – М.: Высшая школа, 1986. – 144 с.
5. Flitney, B. Alternatives to chrome for hydraulic actuators / Bob Flitney // Sealing Technology. – 2007. – №10. – P. 8–12.
6. Picasa J.A. HVOF coatings as an alternative to hard chrome for pistons and valves / J.A. Picasa // Wear. – 2006. – №261. – P. 477–484.
7. Papatheodorou T. Influence of hard chrome plated rod surface treatments on sealing behaviour of hydraulic rod seals / Thomas Papatheodorou, Parker Hannifin // Sealing Technology. – 2005. – №4. – P. 21–27.
8. Monaghana, K.J. Comparison of seal friction on chrome and HVOF coated rods under conditions of short stroke reciprocating motion / K.J. Monaghana, A. Straub // Sealing Technology. – 2008. – № 11. – P. 9–14.
9. Ko, P.L Wear characteristics of electrolytic hard chrome and thermal sprayed WC–10 Co–4 Cr coatings sliding against Al–Ni–bronze in air at 21°C and at –40°C / P.L. Ko, M.F. Robertson. – Wear. – 2002. – № 252. – P. 880–893.
10. Балдаэв, С.Л. Сравнение коррозионной стойкости покрытия гальванического хрома и покрытия на основе карбида вольфрама, нанесенных высокоскоростным газопламенным напылением [Текст] / С.Л. Балдаэв // Конверсия в машиностроении. – 2006. – №2. – С. 143–147.
11. Електродугові відновні та захисні покриття / В.І. Похмурський, М.М. Студент, В.М. Довгунік та ін. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. – 2005. – 190 с.

Отримано 11.09.2012