

УДК 621.921:621.81.004:620.178.16

М.Студент, канд. техн. наук

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

ГАЗОАБРАЗИВНЕ ЗНОШУВАННЯ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИВІВ З ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ ЗА ПІДВИЩЕНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ

Резюме. Розкрито загальні закономірності впливу хімічної гетерогенності електродугових покривів з порошкових дротів на їх жаростійкість. Показано, що рівень напружень 1-го роду в таких покриттях залежить від інтенсивності протікання двох процесів. Перший з них - внутрішнє окиснення, яке збільшує їх об'єм та спричиняє напруження розтягу, а другий - виділення дисперсних фаз, яке зменшує об'єм та викликає у покритті напруження стиску.

Експериментально показано, що газаобразивна зносостійкість покривів з ПД зростає зі збільшенням тривалості їх витримування та з підвищенням температури випроб. Це зумовлено збільшенням твердості покривів за рахунок дисперсійного твердіння та перетворенням залишкових напружень розтягу в покриттях у напруження стиску.

Ключові слова: електрометалізаційні покриття, порошковий дріт, хімічна гетерогенність покривів, жаростійкість, газаобразивна зносостійкість.

M. Student

HIGH TEMPERATURE GASABRASIVE WEAR OF ELECTRIC ARC SPRAYED COATING FROM FLUX CORED WIRES

The summary. It was revealed the common relationships of the chemical heterogeneity effect of the electric arc sprayed coating from the flux cored wires on its heat resistance. It was shown that coating stress level varies depending on the intensities of two processes. First of them is internal oxidation, which increases the coating volume, and causes the compressive coating stress. The second one is the separation of dispersed phases, which decreases the coating volume and causes the tension coating stress.

It was experimentally shown that gasabrasive wear resistance of coatings from the flux cored wires is increased with increasing of time and temperature of specimen holding at high temperature. It is caused by hardening of coatings due to precipitation hardening and transformation of coating stress level from tension to compressive one.

Key words: electric arc sprayed coating, flux cored wire, chemical heterogeneity of coatings, heat resistance, gasabrasive wear resistance.

Вступ. Теплообмінні поверхні котлів електростанцій працюють за умов високотемпературного газаобразивного зношування. Інтенсивне зношування, зокрема великогабаритних екранних труб та труб економайзерів, зумовлено використанням за паливо вугільного пилу з великою часткою твердих негорючих домішок. За підвищеної температури (500...600 °С) на поверхні екранних труб утворюються плівки оксидів заліза, які у вигляді вусів ростуть на сталій поверхні й тому легко усуваються абразивними частинками. Знос зовнішньої поверхні труб є нерівномірним, локалізується в певних місцях і за досягнення критичної товщини стінки труби відбувається її розрив, що призводить до зупинки ТЕС. Для захисту від газаобразивного зношування нагрівних елементів котлів теплових електростанцій і в Україні [1-3], і за її межами [4-5] почали використовувати дешеві електродугові покриття з порошкових дротів (ПД). Разом з тим у літературі недостатньо висвітлені механічні властивості таких покривів за високої температури, не розкриті закономірності впливу температури й тривалості витримування на зміну їх структури, що стримує широкомасштабне впровадження цього методу у виробництво. Стаття присвячена виявленню впливу твердості, рівня напружень та хімічної гетерогенності покривів з ПД на їх жаро- та газаобразивну стійкість.

Методичні аспекти досліджень. Для одержання покривів використовували ПД діаметром 1,8 мм у сталевій оболонці товщиною 0,4 мм зі сталі 08кп. Компонентний склад шихти ПД наведено у таблиці 1.

Режими напилювання покривів з ПД: напруга – 30...32 В, струм – 150 А, тиск повітря – 0,6 МПа, дистанція напилювання – 150 мм, товщина покриву – 0,7 мм.

Таблиця 1. Склад шихти розроблених порошкових дротів, ваг. %

№	ПД системи легування	C	B	Al	Ni	Cr	W	Mo	V	N	Si	Mg	Ti	Fe
1	Fe-Cr-B-Al	-	3,0	8,0	-	6,0	-	-	-	-	-	-	-	Решта
2	Fe-Cr-B-Al-Ni	-	3,0	8,0	6,0	6,0	-	-	-	-	-	-	-	Решта
3	Fe-Cr-B-Al-Mg	-	3,0	6,0	-	6,5	-	-	-	-	-	2	-	Решта
4	Fe-Cr-B-Al-Mo-W-V	0,4	3,0	8,0	-	6,0	4,0	1,0	1,0	-	-	-	-	Решта
5	Fe-Cr-Al-N-Si	-	-	6,0	-	6,5	-	-	-	2,0	2,0	-	-	Решта
6	Fe-Cr-C-Ti-Al	1,0	-	1,5	-	6,0	-	-	-	-	-	-	2,0	Решта
7	Fe-Cr-C-Ti-Al	0,5	-	1,5	-	6,0	-	-	-	-	-	-	2,0	Решта

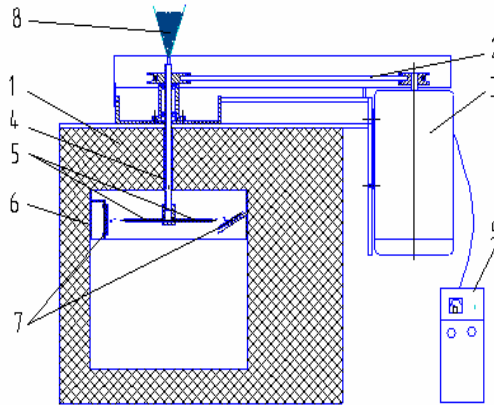


Рисунок 1. Схема установки для випроб на газоабразивне зношування покривів за підвищеної температури: 1 – електричний піч; 2 – пасова передача; 3 – двигун постійного струму; 4 – трубка; 5 – патрубки; 6 – обруч; 7 – зразки з покривами; 8 – ємність з абразивом; 9 – блок керування

Газоабразивне зношування покривів за підвищеної температури дослідили на установці (рис. 1), яку змонтували на основі електричного піча. Установку оснастили системою подавання абразиву та контролювання й підтримування температури [2]. Швидкість подавання абразиву регулювали числом обертів електродвигуна.

Абразивну зносостійкість покривів оцінювали за втратою маси зразків після випроб упродовж 50 годин за швидкості руху абразиву 36 м/сек. Як абразив використали кварцовий пісок зернистістю до 200 мкм.

Випроби на жаростійкість проводили на повітрі за температури до 700 °С, фіксуючи втрати маси зразків під час випроб ваговим методом. Металографічні дослідження провели на оптичному РВ-21 та електронному EVO-40 XVP (Carl Zeiss) із системою мікроаналізу EVO-4XVP мікроскопах.

Результати досліджень та їх узагальнення. Після витримування зразків за температури понад 500 °С у структурі покривів з ПД різних систем (Fe-Cr-B-Al, Fe-Cr-B-Al-Mg, Fe-Cr-B-Al-Ni, Fe-Cr-B-C-Al-W) виділяються дисперсні фази завбільшки 10...20 нм. Із підвищенням температури до 700 °С і тривалості витримування 100 год їх

розміри збільшуються до 100...200 нм. Фазовим і спектральним аналізами встановлено, що дисперсійне зміцнення забезпечується виділеннями в структурі покриттів: Fe-Cr-B-Al – боридів $FeCr_2B$ та інтерметалідів Fe_3Al ; Fe-Cr-C-Al-Si-N, Fe-Cr-B-Al-Mg – боридів $FeCr_2B$ та нітридів AlN ; Fe-Cr-B-Al-Ni – боридів $FeCr_2B$ та інтерметалідів N_3Al ; Fe-Cr-B-Al-Mo-W-V – боридів $FeCr_2B$ та карбідів $FeW_{23}C_6$ [6]. За температури витримування до $550\text{ }^{\circ}C$ найбільший ефект зміцнення спричиняють виділення $FeW_{23}C_6$ (при цьому твердість зростає до 1210 HV_{300}), а за температури понад $550\text{ }^{\circ}C$ – N_3Al (табл. 2).

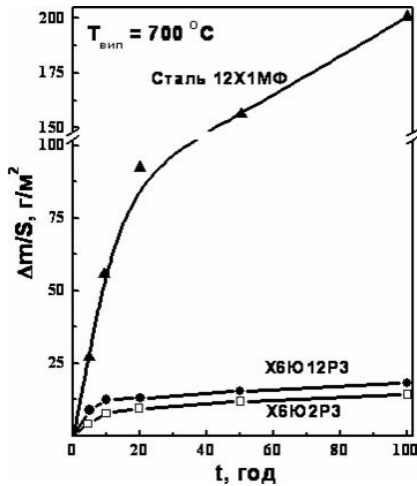


Рисунок 2. Жаростійкість сталі та покриттів з ПД системи Fe-Cr-B-C-Al за температури $700\text{ }^{\circ}C$

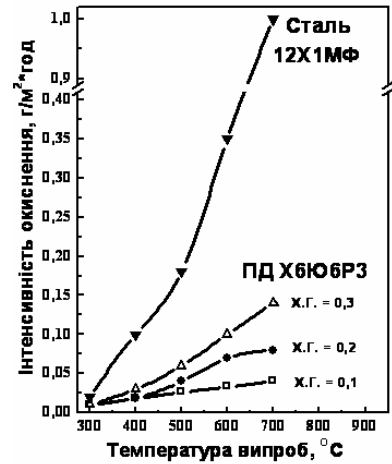


Рисунок 3. Температурні залежності інтенсивності окиснення сталі та покриттів з ПД системи Fe-Cr-B-Al залежно від хімічної гетерогенності покриттів

Покритви з ПД підвищують жаростійкість сталі 12X1MΦ в 20...30 разів (рис. 2). Інтенсивність окиснення покриттів суттєво залежить від їх хімічної гетерогенності і в міру її зростання зростає окиснення (рис. 3).

На відміну від суцільних матеріалів для покриттів з ПД характерно як зовнішнє (з поверхні), так і внутрішнє окиснення (рис. 4).

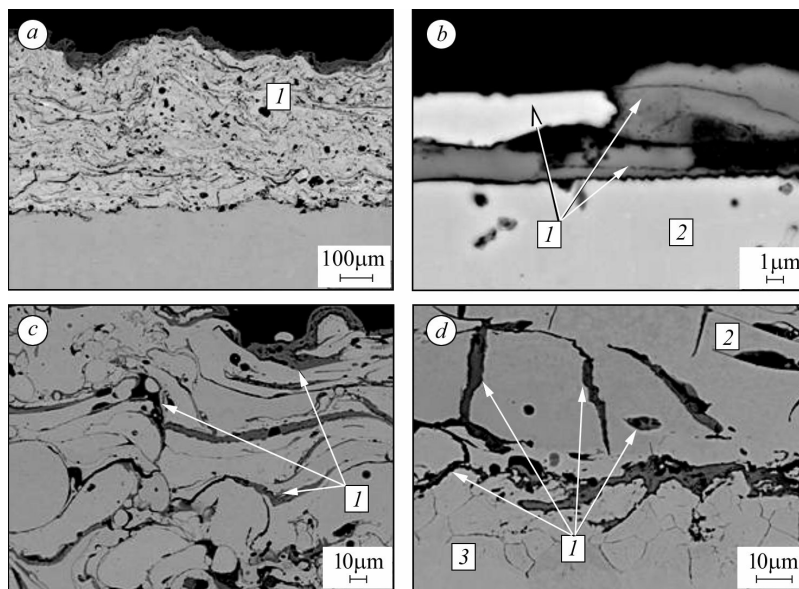


Рисунок 4. Оксидні фази у покритві з ПД Х6Ю6РЗН4 після експозиції 100 год за температури $700\text{ }^{\circ}C$

°C. На рисунку позначено оксидні фази (1), покрив (2), основа (3)

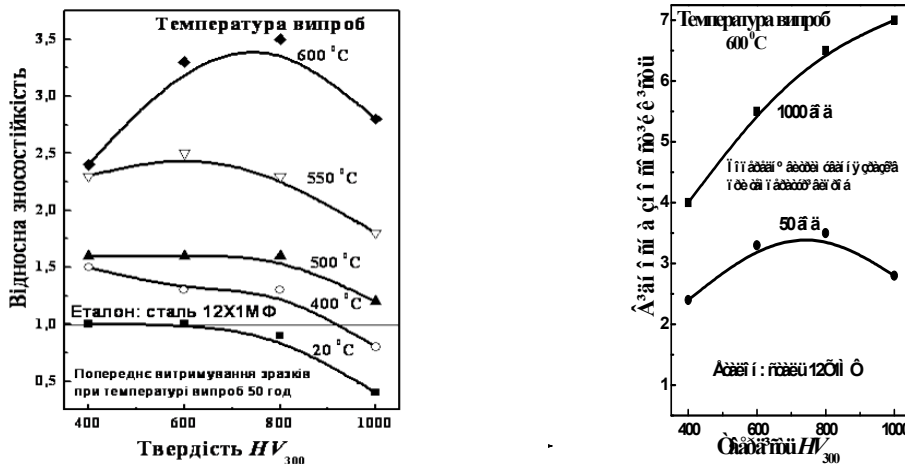


Рисунок 5. Вплив твердості покривів, температури випроб та тривалості попереднього високотемпературного витримування зразків з покривами на газоабразивну зносостійкість покривів

Кисень уздовж меж ламелей та по мікротріщинах може проникати аж до сталюї основи і формувати там оксидні плівки. Так як покриви з ПД як правило гетерогенні за хімічним складом, то оксидні плівки на поверхні та між ламелями покривів також різні за хімічним складом.

Інтенсивність газоабразивного зношування залежить від твердості, внутрішніх напружень та хімічної гетерогенності покривів. Із підвищенням твердості покривів їх зносостійкість за кімнатної температури зменшується (рис. 5) та стає меншою за зносостійкість еталона (сталь 12X1MΦ).

Зносостійкість покривів підвищується з підвищенням температури випроб, причому чим більша тривалість витримування, тим вища їх зносостійкість. Це зумовлено рівнем внутрішніх напружень (1 -го роду) у покривах. Після напилювання у покривах формуються напруження розтягу (до 100 МПа). Після тривалого витримування за температури 500...600 °C у них відбуваються процеси, які визначають їх напружений стан. Перший з них – виділення дисперсних фаз, яке зумовлює зменшення об'єму покриву, а рівень напружень розтягу при цьому зростає. Другий – внутрішнє окиснення, яке спричиняє збільшення об'єму покриву, що зменшує рівень напружень розтягу. За тривалості витримування ~1000 год. напруження розтягу переходять у напруження стиску (рис. 6).

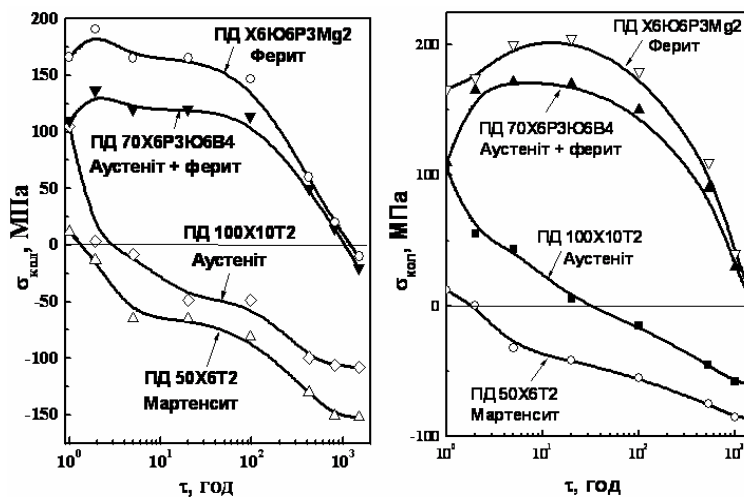


Рисунок 6. Вплив тривалості витримування зразків з покриттями за температури 600 °С на залишкові колові напруження у покриттях, заміряні за температури 20 °С (а) та 600 °С (б)

Для покриттів Fe-Cr-C-Ti з мартенситною або аустеніт-мартенситною структурою без елементів, що викликають дисперсійне зміцнення, напруження розтягу переходять у напруження стиску вже після 2...5 год. витримування зразків з покриттями за високої температури.

Зі зростанням хімічної гетерогенності покриттів їх зносостійкість зменшується. Це пов'язано з наявністю на їх поверхні природної оксидної плівки. За низької гетерогенності покриттів ($K_{ХГ} = 0,05...0,1$) на поверхні покриттів формуються оксиди на основі Al_2O_3 . Зі зростанням гетерогенності покриттів на їх поверхні утворюється все більше ділянок із оксидами на основі Fe_2O_3 . Зносостійкість при цьому зменшується. Як показує спектральний аналіз, оксидні плівки на основі Al_2O_3 мають монолітну будову, а плівки на основі Fe_2O_3 – голкоподібну, що, очевидно, зменшує їх зносостійкість. Для оцінювання хімічної гетерогенності покриттів введено коефіцієнт хімічної гетерогенності $K_{ХГ}$, який визначали порівнянням інтегрального вмісту елементів легування $c_{сер}$ на ділянці площею 10 мм^2 та їх локального вмісту c_i на прямокутних ділянках площею 10^{-2} мм^2 , які сумірні за величиною з середньою площею ламелей у покриттях (рис. 3). Коефіцієнт $K_{ХГ}$ визначали за формулою

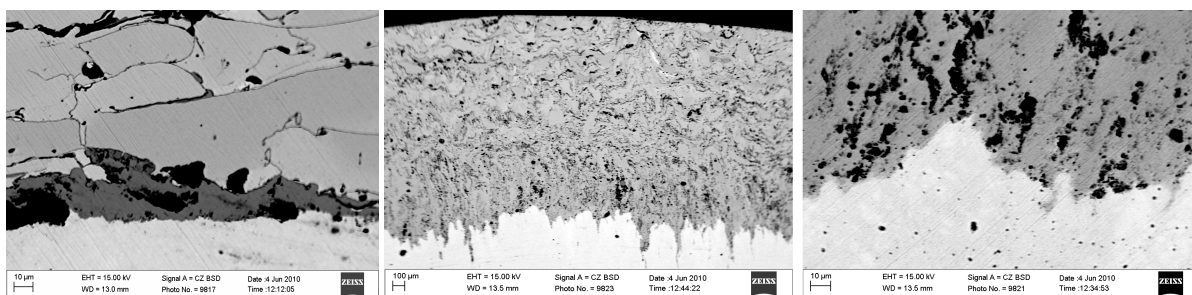
$$K_{ХГ} = \sum_1^n \left[\frac{|c_{сер} - c_i|}{n} \right]$$

За кількості ділянок n для замірів локального вмісту елементів легування $K_{ХГ}$ характеризує середнє арифметичне відхилення вмісту компонентів в окремих ламелях c_i від їх середнього вмісту $c_{сер}$ у покриттях. За коефіцієнтом $K_{ХГ}$ можна судити про повноту сплавлення шихти та оболонки ПД.

Характер руйнування покриттів підтверджує, що за кімнатної температури руйнування відбувається шляхом росту тріщин між ламелями з наступним відриванням цілих ламелей від покриттів. За підвищеної температури межі між ламелями та мікротріщини заповнюються продуктами корозії (оксидами) і зносостійкість покриттів зростає.

Слід відзначити, що напруження розтягу у покриттях, які дисперсійно зміцнюються, залишаються відчутними впродовж сотень годин. При цьому кисень через дефекти у покриттях проникає до основи і формує там оксидну плівку, що може спричинити відшарування покриттів. (рис. 7а). У покриттях без дисперсійного зміцнення з мартенситною або аустеніт-мартенситною структурою напруження розтягу переходять у напруження стиску вже після 2...5 год. експлуатації покриттів. При цьому у них виникають значні за величиною контактні тиски між ламелями та між покритвом і основою. Через значну гетерогенність покриттів, спричинену наявністю в них понад 2 % алюмінію, контактні тиски спричиняють інтенсивну дифузію Al та пластичну деформацію повзучості. Це зумовлює дифузійне приварювання покриттів до сталевій основи та докорінно змінює їх будову: руйнується ламелярна будова (рис. 7б) та утворюються суцільні покриття з включеннями оксидів круглої форми (рис. 7в).

Порівняння покриттів з ПД (рис. 8), розроблених у ФМІ НАН України, з найкращими зарубіжними покриттями та зносостійкістю виявило, що вітчизняні покриття не поступаються, а подекуди і істотно перевищують властивості покриттів іноземних розробників.



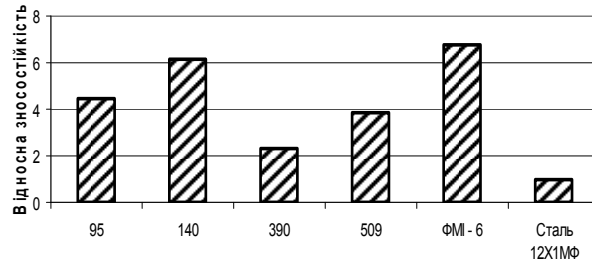


Рисунок 8. Порівняння покровів з ПД за їх схильністю до газообразного зношування при 600 °С:
 Praxair and TAFA 95MXC (X29P4Г2С2);
 TAFA 140 MXC (400X25P5M6B15B12Г3С2);
 EnDoTec DO 390N (500X20P5M10B10B10Г5С2);
 Castolin-EuTronic® Arc 509 (X30M15Ю4);
 ФМІ-6 (Х6Р3Ю6Н4)

Висновки:

1. Жаростійкість покровів з ПД визначається не лише кількістю елементів легування, а й хімічною гетерогенністю покровів. У міру зростання хімічної гетерогенності покровів їх жаростійкість знижується.
2. Рівень напружень 1-го роду в покриттях залежить від інтенсивності протікання двох процесів: внутрішнє окиснення збільшує об'єм покровів, що супроводжується зменшенням напружень розтягу, а виділення дисперсних фаз зменшує їх об'єм, що спричиняє зростання напружень розтягу в них.

а

б

в

Рисунок 7. Вплив витримування впродовж 100 годин за температури 600 °С на формування меж між покриттями з ПД Fe-Cr-B-Al-Ni (а) та Fe-Cr-C-Al (б, в) і сталлю основою (знизу)

3. Газообразна зносостійкість покровів з ПД зростає зі збільшенням тривалості та підвищенням температури витримування покровів за високої температури, що зумовлено збільшенням їх твердості за рахунок дисперсійного твердіння та переходу напружень розтягу у напруження стиску.

Література

1. Студент М.М. Жаростійкість та газообразна зносостійкість електродугових покровів з порошкових дротів / М.М. Студент // машинознавство. – 2009. – № 12. – С. 23 – 29.
2. Вплив високотемпературної корозії на газообразну тривкість електродугових покровів / М.М. Студент, Г.В. Похмурська, В.В. Гвоздецький [та ін.] // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – № 4. – С. 19 – 26.
3. Зносотривкість електродугових покровів за умов високотемпературного окиснення та абразивного зношування / М. Студент, Ю. Дзьоба, І. Сидорак [та ін.] // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – Спец вип. № 5. – С. 712 – 717.
4. High temperature erosion properties of arc-sprayed coatings using various cored wires containing Ti–Al intermetallics / Shao-Guang Liu, Jin-Ming Wu, Sheng-Cai Zhang [et al.] // Wear. – 2007. – 262, Issues 5–6. – P. 555 – 561.
5. Venugopal K. Evaluation of arc sprayed coatings for erosion protection of tubes in atmospheric fluidised bed combustion (AFBC) boilers / K. Venugopal, M. Agrawal // Wear. – 2008. – 264, Issues 1–2. – P. 139 – 145.
6. High-temperature corrosion of electric-arc coatings sprayed from powder core wires based on the Fe–Cr–B–Al system / M. Student, Yu. Dzioba, V. Hvozdet's'kyi [et al.] // Mat. Sci. – 2008. – 44, № 5. – P. 693 – 699.

Отримано 12.11.2010