

М. Студент, канд. техн. наук

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

СТРУКТУРА ТА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ НА АЛЮМІНІЄВОМУ СПЛАВІ

Досліджено структуру композиційних покриттів на алюмінієвому сплаві, одержаних електродуговим напиленням із порошкових дротів (ПД) в алюмінієвій оболонці. Шихту ПД формували із суміші одного з порошків (карбід бору, карбід кремнію або оксид титану) з легкоплавким порошком Ni-Cr-B-Si. Матричною фазою у структурі покриття є легований хромом, нікелем або титаном алюміній. Покриття містить дисперсні включення частинок карбіду бору, карбіду кремнію або оксиду титану та ділянки нікелевого сплаву Ni-Cr-B-Si. Композиційні покриття підвищують зносостійкість алюмінієвого сплаву в 60...100 разів.

M. Student

MICROSTRUCTURE AND WEAR RESISTANCE OF ARC SPRAYED COATINGS AT ALUMINUM ALLOY

The microstructure of the compounded coatings at the aluminum alloy getting by electric arc spraying of the cored wires with aluminum cladding are analyzed. The composition from one of the powders (the boron carbide, silicon carbide or titanium oxide) with the fusible Ni-Cr-B-Si powder was entered to the mixture of the cored wires. It was shown that aluminum alloyed by the chromium, nickel or titanium is the main matrix phase of coating microstructure. The coating contain of the dispersion particles of the boron carbide, silicon carbide or titanium oxide and zones from Ni-Cr-B-Si alloy at the nickel base. The wear resistance of the aluminum alloy with compounded coatings is increased by a factor of 60...100.

За об'ємом виробництва алюміній і сплави на його основі займають друге місце після сталі, що викликано вдалим співвідношенням технологічних, фізико-хімічних та механічних властивостей. На долю алюмінію припадає 5,5% загальної ваги атомів земної кулі, а запаси сировини з високим вмістом алюмінію практично необмежені.

Все це є потужним стимулом для подальшого розширення застосування алюмінію та його сплавів не лише на традиційні (авіабудування), але й на інші галузі народного господарства – автомобілебудування, наземний та водний транспорт, будівництво трубопровідних магістралей, нафтодобувна та медична техніка, побутові прилади, електротехніка та сільське господарство [1-6]. Таке розширення застосування алюмінієвих сплавів можливе не лише за рахунок створення нових марок сплавів, а завдяки модифікації поверхневих шарів деталей та нанесення покриттів, які б забезпечили підвищену корозійну та зносостійкість [7-9].

Електродугова металізація (ЕДМ) є найдешевшим та найпоширенішим методом нанесення зносостійких покриттів [10-16]. Так, при нанесенні покриттів ЕДМ з використанням електродних матеріалів вартість одиниці напиленої площі у 3...5 разів нижча, ніж за нанесення покриття плазмовим методом. Застосування для ЕДМ спеціальних електродних матеріалів (порошкових дротів - ПД) дало змогу різко розширити сферу застосування цього простого та дешевого методу одержання зносостійких покриттів з властивостями на рівні найкращих плазмових покриттів або одержаних методом надзвукового напилювання.

Мета роботи - дослідити зносостійкість та структуру композиційних покриттів на алюмінієвому сплаві, одержаних електродуговим напиленням ПД в алюмінієвій оболонці.

Методичні особливості отримання покриттів. Для поверхневого модифікування алюмінієвих сплавів розроблено ПД (рис.1) з різним складом шихти. Для їх оболонки використали алюмінієву стрічку перерізом 10 × 0,4 мм. ПД протягували через систему роликів на стані до діаметра 2 мм. За шихтові матеріали

використовували суміш з порошків самофлюсуючого сплаву Ni-Cr-B-Si, карбідів SiC, V_4C та оксиду титану TiO_2 .

Покрыття одержували шляхом розпилення ПД за допомогою електродугового металізатора з модифікованою розпилювальною системою (рис. 2), при використанні якої дуга горить в каналі розпилювальної головки, що дає змогу одержувати дрібнодисперсні покриття.

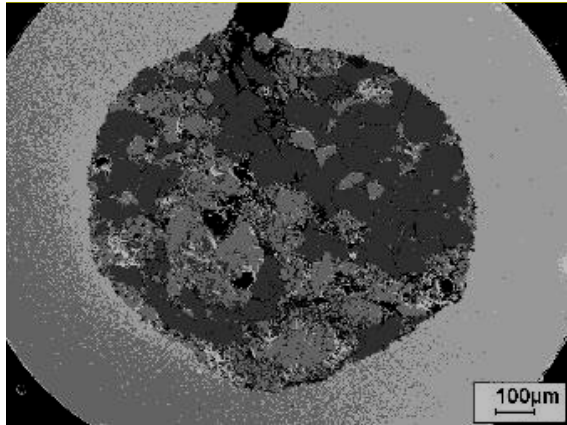


Рисунок 1 - Поперечний переріз порошкового дроту в алюмінієвій оболонці

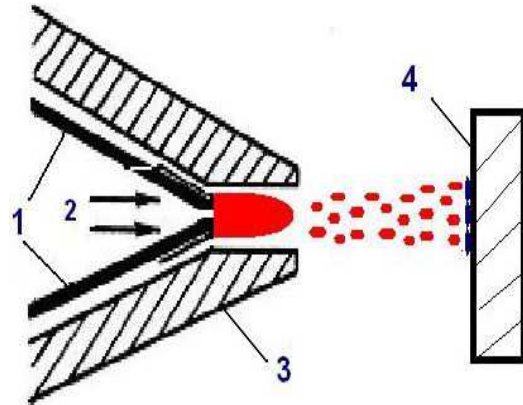


Рисунок 2 - Схема електродугового розпилення порошковим дротом (1 – порошкові дроти; 2 – струмінь повітря; 3 – корпус розпилювальної головки; 4 – зразок)

Перед нанесенням покриття зразок ретельно знежирювали та проводили дробоструменеву обробку. Після цього на поверхню зразка наносили покриття за дотримання наступних параметрів: сила струму 150А, напруга 32В, віддаль від сопла до напилюваної поверхні 100...110 мм, тиск стисненого повітря 0,5...0,6 МПа, товщина покриття за один прохід 100 мкм. Для живлення металізатора постійним струмом використовували випрямляч типу ВДУ–505. Після напилення контролювали якість отриманого покриття і шліфували зразок.

Методика досліджень покриття на зносостійкість жорстко закріпленим абразивом. Під час порівняльних досліджень використовували абразивний диск із електрокорунду твердості СМ-2 на керамічній основі 7К15 діаметром 150 мм та шириною 8 мм (рис.3).

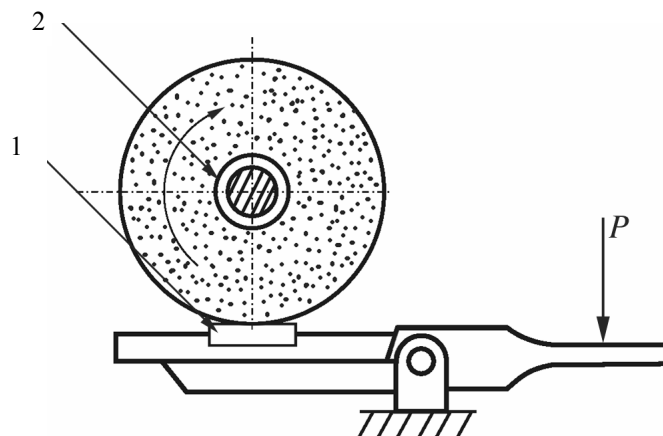


Рисунок 3 - Схема установки для дослідження зношування зразків жорстко закріпленим абразивом: 1 – зразок; 2 – абразивний круг

Зернистість використаного електрокорунду - 250...315 мкм (25А, 25Н). Лінійна швидкість тертя становила 1 м/с, навантаження - 600 г, час випробування – 15 хв. Знос оцінювали за втратою маси зразка з точністю до 0,0002 г.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

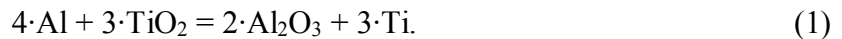
Мікроструктура покриттів на алюмінієвому сплаві, одержаних ЕДМ з ПД в алюмінієвій оболонці. При нанесенні покриттів з ПД табл.1 оболонка ПД плавиться за температури 5000...6000 °С, яка досягається під час горіння дуги. При цьому температура розплаву досягає 2000 °С. В той же час тугоплавка шихта не плавиться (температура плавлення SiC – 2900 °С, В₄С – 2400 °С), а залишається у твердому стані. Розплав алюмінію слабо змочує тугоплавкі частинки. Краплини, які утворюються при розпиленні такого розплаву, транспортуються потоком повітря до напилюваної поверхні і містять в собі ці нерозплавлені частинки. Під час ударяння об поверхню зразка деякі тверді тугоплавкі частинки відбиваються від неї і не беруть участі у формуванні покриття.

Таблиця 1 - Склад порошкових дротів в алюмінієвій оболонці

Шихта	№ 1	№ 2	№ 3
	SiC	B ₄ C	TiO ₂
*K _з , %	25	25	25
H _ц матриці, МПа	900...1100	1100...1600	2500...4200
H _ц тугоплавких включень, МПа	24000...29000	20000...25000	16000

*K_з - коефіцієнт заповнення порошкового дроту, %.

Мікротвердість H_ц алюмінієвої оболонки ПД становить 900...1600 МПа. Матриця ж покриття, яке одержане з ПД №3, має істотно вищу мікротвердість 2500...4000 МПа. Підвищення його мікротвердості зумовлене тим, що оксид титану взаємодіє з розплавом алюмінію згідно з реакцією:



Титан, котрий утворюється у рідкому стані, легує алюмінієву матрицю і підвищує її твердість. Мікротвердість тугоплавких включень у такій матриці наступна: SiC = 24000...29000, B₄C = 20000...25000 та TiO₂ = 16000 МПа.

Для кращого засвоєння тугоплавких частинок у покритті під час розпилення ПД до його шихти додавали 45 % порошку самофлюсуючого сплаву ПГ-12Н-01 (сплав Ni-Cr-B-Si) (табл.2).

Таблиця 2 - Склад порошкових дротів в алюмінієвій оболонці з додаванням до шихти порошку сплаву Ni-Cr-B-Si

	№ 4	№ 5	№ 6
Шихта	SiC + Ni-Cr-B-Si	B ₄ C + Ni-Cr-B-Si	TiO ₂ + Ni-Cr-B-Si
K _з , %	14	14	14
H _ц матриці, МПа	700...800	700...1200	800...1600
H _ц включень, МПа	SiC – 25000, Ni-Cr-B-Si – 4000...7000	B ₄ C – 25000, Ni-Cr-B-Si – 4000...7000	TiO ₂ – 7500, Ni-Cr-B-Si – 4000...7000

Мікроструктура покриття, одержаного шляхом електродугового напилення з ПД №4, має типову ламелярну будову матриці з алюмінієвого сплаву, в якій є вкраплення тугоплавких частинок SiC, свідчить, що тугоплавкі частинки міцно зв'язані з матрицею. На рис. 4 показано частинки SiC в алюмінієвій матриці. Наявність їх у структурі покриття підтверджується фазовим та спектральним аналізами (рис. 5-7). Спектральний аналіз за площею підтверджує, що ті частинки, які мають високу твердість 20000...25000 МПа, містять значну кількість кремнію та вуглецю і їх можна ідентифікувати як зерна карбиду кремнію (рис. 8). Розмір цих частинок в перерізі становить 50...200 мкм. Крім того, у покритті зустрічаються ділянки з підвищеною

мікротвердістю 4000...7000 МПа, які можна ідентифікувати як сплав Ni-Cr-B-Si легований алюмінієм.

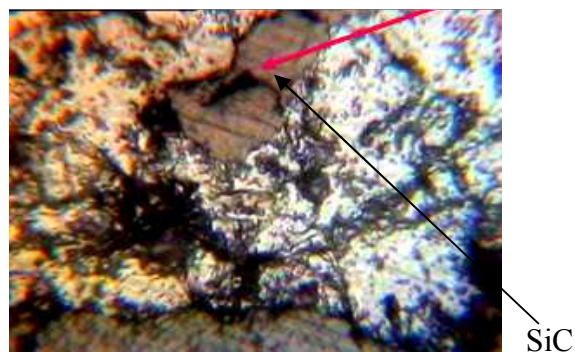


Рисунок 4 - Включення твердих частинок SiC в ЕДМ композиційному покритті з ПД №4. x 800

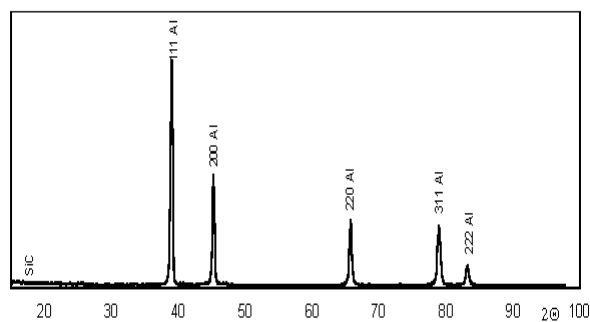
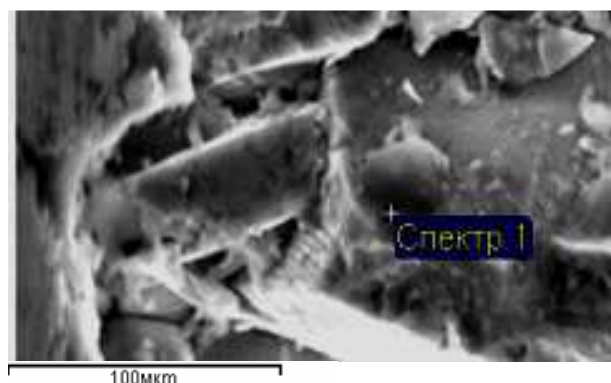


Рисунок 5 – За фазовим складом в ЕДМ композиційному покритті з ПД №4 переважає Al та спостерігаються сліди фази SiC

Локальний спектральний аналіз, проведений на електронному мікроскопі Zeiss EVO 40XVP, показує, що частинки карбіду кремнію леговані алюмінієм. Зокрема, у мікротріщинах в центрі зерна карбіду кремнію виявлено алюміній (рис. 6). Загальний вміст алюмінію у частинці карбіду кремнію становить 26 мас. %. Очевидно, що карбід кремнію взаємодіє з розплавленим алюмінієм з утворенням карбіду алюмінію Al_4C_3 . Матриця поблизу межі з частинками SiC (рис. 7) має в своєму складі 6% нікелю та 1% хрому. Це означає, що самофлюсуючий сплав Ni-Cr-B-Si, який має низьку температуру плавлення ($1100\text{ }^{\circ}\text{C}$), утворює сплав з алюмінієм оболонки та добре змочує частинки карбіду кремнію.

Елемент	Мас. %
C	42,2
Al	26,4
Si	31,4
Всього	100,0

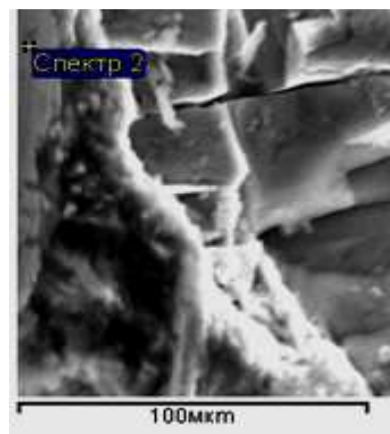
Рисунок 6 - Локальний спектральний аналіз частинки карбіду кремнію у покритті з ПД №4



Алюмінієва матриця покриття в середньому містить 3 % нікелю, 2 % кремнію та 0,3 % хрому. Очевидно, що в процесі напилення розплав самофлюсуючого сплаву спочатку розчиняє дрібні частинки карбіду кремнію у собі, а потім вже сам розчиняється в алюмінієвій матриці.

Елемент	Мас. %
C	26,6
O	1,4
Al	59,8
Si	4,3
Cr	1,1
Fe	0,5
Ni	6,3
Всього	100,0

Рисунок 7 - Локальний спектральний аналіз на границі частинки карбіду кремнію з матричною фазою у покритті з ПД №4



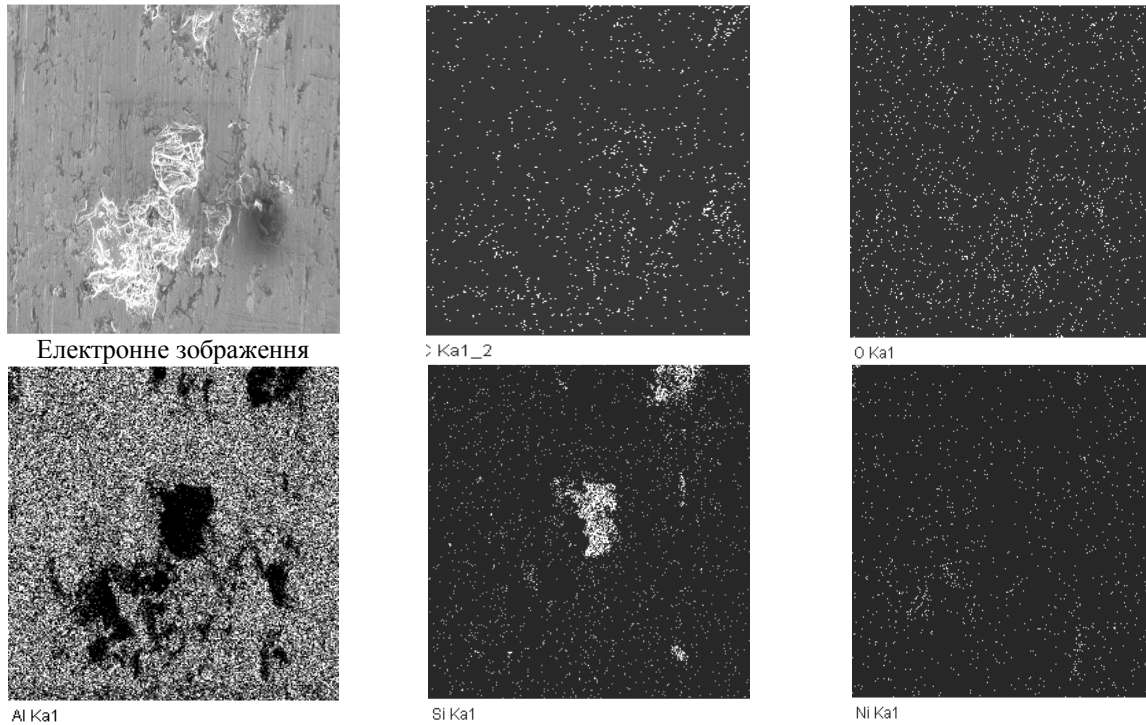


Рисунок 8 - Мікроспектри розподілу вуглецю, кисню, алюмінію, кремнію та нікелю з однієї і тієї ж площі покриття з ПД №4. Світлішим ділянкам властивий вищий вміст відповідного елементу

Покриття з ПД №5 має типову ламелярну будову матриці з алюмінію, в якій є вкраплення тугоплавких частинок карбиду бору (рис. 9-11), які мають мікротвердість 24000 МПа. Як виявив спектральний аналіз за площею, ці частинки мають підвищений вміст бору та значний вміст алюмінію, який розташовується в тріщинах, що є в частинках карбиду бору. Крім цього, у покритті спостерігаються ділянки з підвищеною мікротвердістю 4000...7000 МПа, які ідентифікуються фазовим та спектральним аналізами як легований алюмінієм сплав Ni-Cr-B-Si (рис. 12).

Спектральний аналіз свідчить, що алюмінієва матриця покриття з ПД №5 легована нікелем, хромом та кремнієм. Це легування відбувається при сплавленні самофлюсуючого сплаву Ni-Cr-B-Si з розплавом алюмінієвої оболонки під час плавлення ПД у дузі.

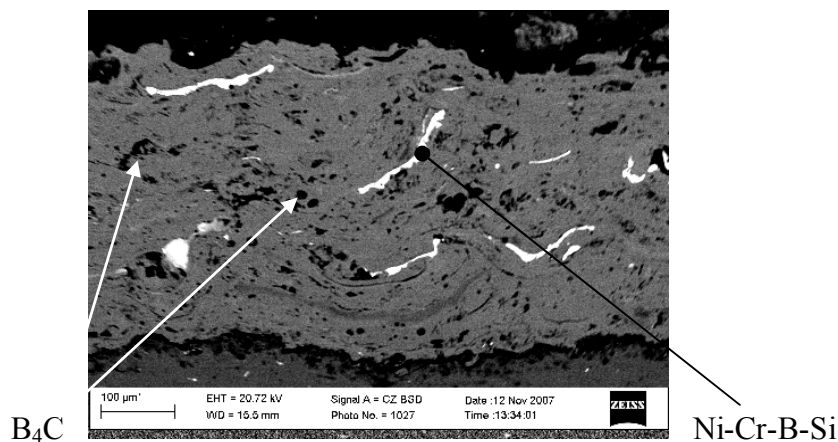


Рисунок 9 - Загальний вигляд ЕДМ композиційного покриття з ПД №5

Елемент	Мас. %
B	49,7
O	2,6
Al	37,7
Si	0,1
C	9,1
Cr	0,1
Fe	0,2
Ni	0,5
Всього	100.00

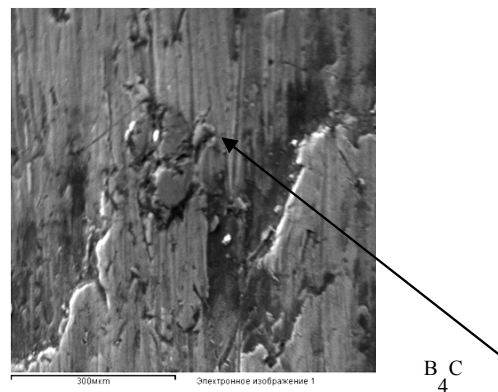


Рисунок 10 - Спектральний аналіз частинки карбиду бору у покритті з ПД №5

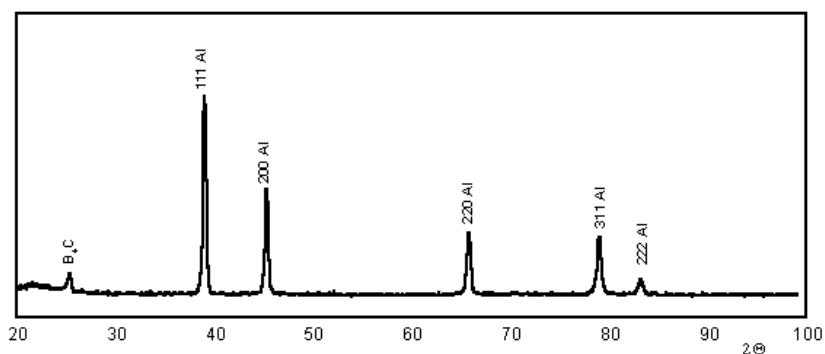


Рисунок 11 - За фазовим складом в ЕДМ композиційному покритті з ПД №5 переважає Al та ідентифікується фаза B_4C

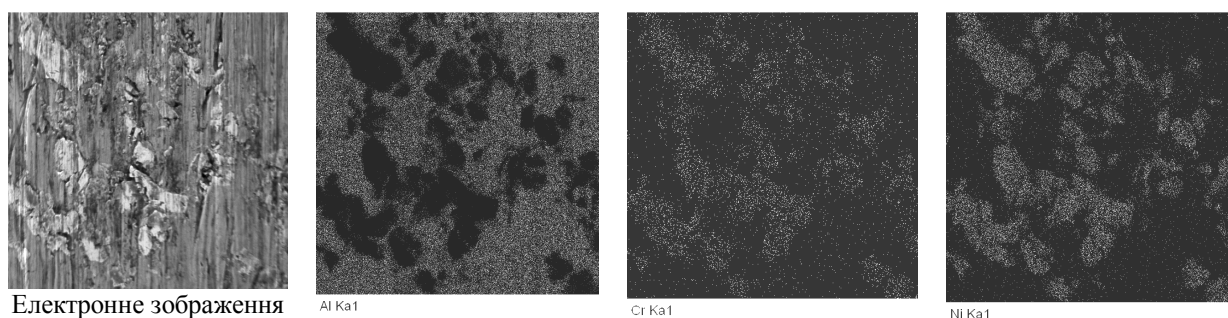


Рисунок 12 - Мікроспектри розподілу алюмінію, хрому, нікелю з однієї і тієї ж площі покриття з ПД №5, на якій є включення зі сплаву Ni-B-Cr-Si. Світлішим ділянкам властивий вищий вміст відповідного елементу

Композиційному покриттю з ПД №6 (табл. 3) властива сильно виражена ламелярна будова (рис. 13, 14). У структурі покриття зустрічаються ділянки, які мають підвищену мікротвердість 4000...7500 МПа. Як свідчить фазовий аналіз (рис.15), у покритті є часточки оксиду титану. Очевидно, що реакція (1) взаємодії оксиду титану з оболонкою протікає лише частково. Ділянки з підвищеною мікротвердістю 4000...7000 МПа спектральний аналіз ідентифікує як сплав Ni-Cr-B-Si з алюмінієм, а ділянки з мікротвердістю 7500 МПа – як оксид титану.

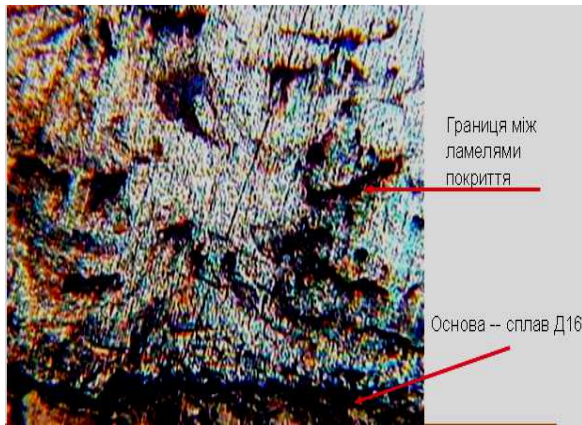


Рисунок 13 - Загальний вигляд ЕДМ композиційного покриття з ПД №6. x50

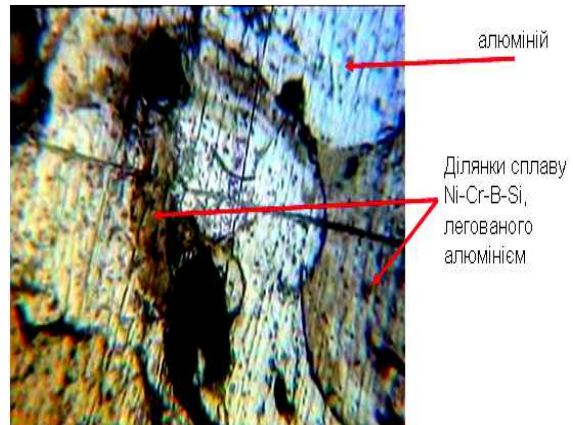


Рисунок 14 - Структура ЕДМ композиційного покриття з ПД №6. x800

Зносотривкість електродугових покриттів на алюмінієвому сплаві за умов зношування жорстко закріпленим абразивом. Результати випробовування на зношування свідчать, що композиційні покриття з тугоплавкими частинками карбїду бору, карбїду кремнію та оксиду титану відповідно у 85, 60 та 100 разів підвищують зносотривкість сплаву Д16 (табл. 3).

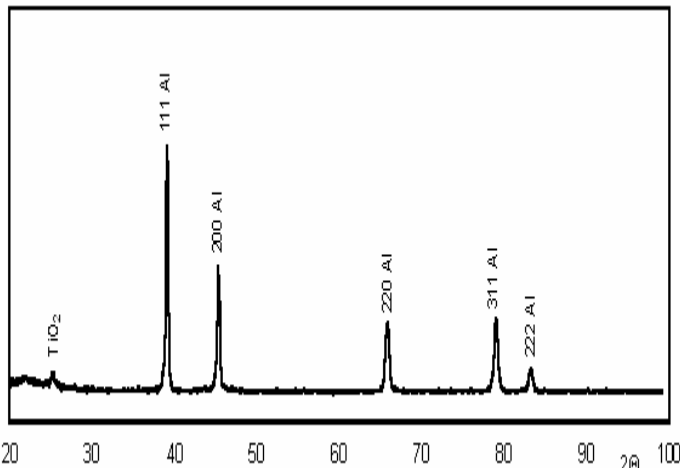


Рисунок 15 - За фазовим складом в ЕДМ композиційному покритті з ПД №6 переважає Al та ідентифікується фаза TiO₂

Таблиця 3 - Зносостійкість алюмінієвого сплаву Д16 з композиційними покриттями за умов зношування закріпленим абразивом (корундовим диском). Навантаження - 600 г. Час випробування – 15 хв

№ з/п	Шихта	Відносна зносостійкість
1.	SiC	60
2.	B ₄ C	60
3.	TiO ₂	75
4.	SiC+NiBSi	80
5.	B ₄ C+NiBSi	60
6.	TiO ₂ +NiBSi	100
	Основа Д16	1

Додавання до шихти ПД самофлюсуючого порошку ПГ-12Н-01 у кількості 45 % сприяє підвищенню зносостійкості ЕДМ покриття в порівнянні з покриттями з ПД і шихтою без самофлюсуючого сплаву. Це зумовлено тим, що тугоплавкі частинки карбїду бору, карбїду кремнію та оксиду титану краще змочуються матричним розплавом на основі алюмінію (сплав алюмінієвої оболонки та самофлюсуючого сплаву Ni-Cr-B-Si), що сприяє кращому засвоєнню та міцному зв'язку тугоплавкої частинки з матрицею композиційного покриття. Найвища зносостійкість композиційного покриття, одержаного з ПД в алюмінієвій оболонці, до шихти якого входив TiO₂ + Ni-Cr-B-Si, зумовлена тим, що оксид титану активно взаємодіє з алюмінієм розплаву оболонки і є міцно зчеплений з матрицею покриття.

Висновки

1. Показано, що покриття, отримані методом електродугової металізації шляхом розпилення порошкових дротів в алюмінієвій оболонці мають типову ламелярну будову, матрицею яких є легований сплав на основі алюмінію з включеннями твердих частинок карбїду бору, карбїду кремнію або оксиду титану.
2. Отримані композиційні покриття з порошкових дротів в алюмінієвій оболонці підвищують зносостійкість алюмінієвого сплаву в 60...100 разів.

Література

1. Каблов И.А. Корпусные конструкции из алюминиевых сплавов. – М.: Судпромгиз, 1960. – 152 с.
2. Крейс Ф.И. Новые материалы для сельскохозяйственных машин. Научн. тр. ВИСХОМ. – М.: ВИСХОМ. – 1982. – 23 с.
3. Кривов Г.А., Белецкий В.М. Алюминиевые сплавы в автомобилестроении // Технолог. Системы – 2001. – №5. – С.86-92.
4. Материалы в машиностроении. Выбор и применение. Справочник в 5 томах.: Т.1. Цветные металлы / Под ред. Л.П. Лузиникова. – М.: Машиностроение, 1967. – С. 7-128.
5. Фриляндер И.Н., Братухин А.Г., Шалин Р.Е. Техника без стали. Композиционные материалы. – М.: Сов. Россия, 1989. – 79 с.
6. Шрейбер Г.К., Перлин С.М., Шибряев В.Ф. Конструкционные материалы в нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности. – М.: Машиностроение, 1969. – 369 с.
7. Клапків М.Д., Никифорчин Г.М., Посувайло В.М. Спектральний аналіз синтезу плазми в умовах синтезу оксиду алюмінію // Фіз.- хім. механіка матеріалів, 1994. – №3. – С.70-81.
8. Фазовий склад плазмoeлектрохімічних оксидокерамічних покриттів // М. Клапків, В. Посувайло, Б. Стельшазович та ін. / Фіз.- хім. механіка матеріалів. Спец. випуск №5. Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2006. – Т. 2. – С.750-755.
9. Kreuz E. W., Pirch N., Rozsnoki M. Solidification in Laser Surface Alloying Al and AlSi10Mg with Ni and Cr // Mat. the European Conf. on Laser Treatment of Materials (ECLAT'92), 1992. – P. 269-270.
10. Cizner I., Pitter I. Protection metal coating for hear exchanging surfaces of waste incineration boilers // European Corrosion Congress'07. Germany, 2007. – CD, Paper N 1160. – 6 p.
11. Зносотривкість електродугових покриттів за умов високотемпературного окислення та абразивного зношування / М. Студент, Ю. Дзьоба, І. Сидорак, Х. Задорожна, Я. Сірак // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. випуск № 5. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2006. – Т. 2. – С. 712-717.
12. Влияние режимов электродуговой металлизации и состава применяемых порошковых проволок на структуру и абразивную износостойкость покрытий / Похмурский В.И., Студент М.М., Рябцев И.А. и др. // Автоматическая сварка. – 2006. – №7. – С. 31-36.
13. Електродугові відновні та захисні покриття / В.І. Похмурський, М.М. Студент, В.М. Довгунік, Г.В. Похмурська, І.Й. Сидорак. – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України. – 2005. – 192 с.
14. Захист труб котлів ТЕС від газової корозії та абразивного зношування / Похмурський В.І., Студент М.М., Сидорак І.Й., Дзьоба Ю.В., Сірак Я.Я. // Зб. мат. 7 Міжнародної промислової конф., Славське, 2007 р. – 453 с.
15. Борисов Ю.С., Козьяков И.А., Коржик В.Н. Структура и свойства газотермических покрытий, полученных с использованием порошковых проволок системы Fe-Cr-B, Fe-Cr-B-C // Автоматическая сварка. – 1996, № 5 (518). – С.21-24.
16. Структура и свойства электродуговых покрытий на основе ферробора, полученных из порошковых проволок / А.Л. Борисова, И.В. Миц, Т.В. Кайда и др. // Автоматическая сварка. – 1991. – № 9. – С. 66-68.

Одержано 11.02.2008 р.