

ВПЛИВ СТРУКТУРИ НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИТТІВ ІЗ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ З ВМІСТОМ ХРОМУ ПОНАД 12%

*д.т.н. М. Студент, к.т.н. В. Гвоздецький, к.т.н. Т. Ступницький
д.т.н. О. Калахан¹*

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Львів;
¹ Львівський національний аграрний університет*

Постановка проблеми. Електродугова металізація – найдешевший та найпростіший метод газотермічного напилення, який легко впровадити у виробництво та не потребує коштовного обладнання [1]. Порошкові дроти (ПД) для електродугового напилення уможливили використання таких покриттів для реставрації різноманітних спрацьованих деталей типу “вал” транспортної та сільськогосподарської техніки, компресорів харчопереробної промисловості та інших деталей, що функціонують за умов граничного тертя та корозійно-абразивного зношування [2–5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для формування корозійнотривких електродугових покриттів (ЕДП) як електродні матеріали часто використовують нержавні суцільні дроти типу 40X13, 08X18H10T, проте вони мають низькі твердість, зносотривкість і досить коштовні [6]. ПД такого ж хімічного складу щонайменше удвічі дешевші [7].

Постановка завдання. Безаварійна робота деталей, відновлених або захищених ЕДП, суттєво залежить від їх механічних характеристик, які зумовлені вмістом легувальних елементів [8]. Тому мета цього дослідження – дослідити вплив легувальних елементів на механічні характеристики ЕДП із ПД з підвищеним вмістом хрому.

Виклад основного матеріалу. Методика. ЕДП товщиною 1,2...1,5 мм наносили металізатором ГТ-1 із ПД (20...140)X14, 140X14Ю(0...3), 70X20P(0...4)ГС2Ю діаметром 1,8 мм. За шихтові матеріали використали феросплави та чисті метали. Оболонку ПД виготовляли із стрічки зі сталі 08кп товщиною 0,4 мм та шириною 10 мм. Коефіцієнт заповнення ПД шихтою становив 22...30%. Режими нанесення покриттів: струм 150 А, напруга горіння дуги 32...34 В. Розпилювали ПД струменем стиснутого повітря під тиском 0,4...0,8 МПа з дистанції 150 мм.

Фазовий склад покриттів визначали дифрактометром ДРОН-3 за напруги 32 кВ і струму 15 мА з кроком сканування 0,05° та з використанням CuK_α -випромінювання.

Внутрішні напруження у покриттях заміряли згідно зі стандартною методикою [9] на розрізаному кільці. Для цього використали зразки у вигляді кільця (діаметром 60 мм, висотою 20 мм, товщиною 4 мм) із повздовжнім розрізом (рис. 1). На зовнішню поверхню зразків наносили ЕДП товщиною 1 мм. Напруження розраховували за методикою, розробленою для біметалевих кільць, у яких відношення радіусів центральної лінії до радіальної товщини кільця не менше 10. Обчислення проводили за формулою, що враховує модулі пружності сталевого кільця-підкладки та напиленого шару:

$$\sigma = \frac{2E_1}{Dt^2} \left[0,5t \frac{t_2^2 c + t_1^2 + 2t_1 t_2 c}{t_2 c + t_1} - (a + da) \right] \frac{\Delta K}{\pi}, \quad (1)$$

де Dt – діаметр кільця; a – відстань від поверхні нанесеного покриття до досліджуваного елементарного шару da ; t_1 – товщина кільця; t_2 – товщина нанесеного покриття; t – товщина кільця разом із нанесеним покриттям; c – коефіцієнт, визначений зі співвідношення: $c = E_1/E_2$, E_1 , E_2 – модулі пружності сталі та напиленого покриття відповідно; ΔK – зміна ширини розрізу, заміряли штангенциркулем ШЦ-I-125-0,05 ГОСТ 166-89.

Когезивну міцність покриттів визначали на трубчастих зразках довжиною по 50 мм, що складаються з двох половинок загальною довжиною 100 мм. (рис. 2). Половинки зразків з'єднували між собою болтом з гайкою. На бічну поверхню зразка наносили покриття товщиною 1...1,2 мм. Після цього зразок звільняли від оправки та розтягували на розривній машині FPZ-10, фіксуючи зусилля в момент руйнування. Когезивну міцність визначали за відомою формулою:

$$\sigma = P/S. \quad (2)$$

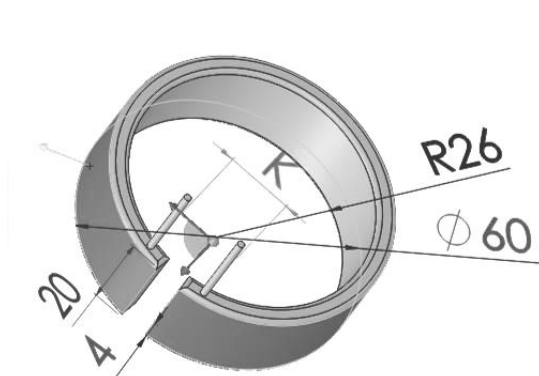


Рис. 1. Зразок для визначення напружень у ЕДП.

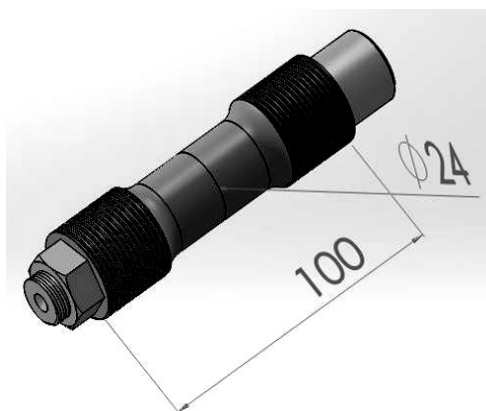


Рис. 2. Схема зразків для визначення когезивної міцності ЕДП.

Мікротвердість покриттів вимірювали мікротвердоміром ПМТ-3 за навантаження 0,98Н.

Результати експериментів та їх обговорення. З поміж механічних характеристик газотермічних покриттів, які визначають їх роботоздатність, найважливішими є когезивна міцність, залишкові напруження та твердість. З'ясовано, що на механічні характеристики ЕДП найбільше впливає вміст у них **С**, **Al** та **В**. Виявлено [5], що зі збільшенням вмісту **С** у покриттях із ПД (20...140)Х14 від 0 до 1,3 мас.% в їх структурі зменшується кількість мартенситу від 80 до 20% та одночасно зростає кількість аустеніту до 80% (рис. 3а). При цьому їх когезивна міцність зростає на ~60% – від 150 до 240 МПа (рис. 3б).

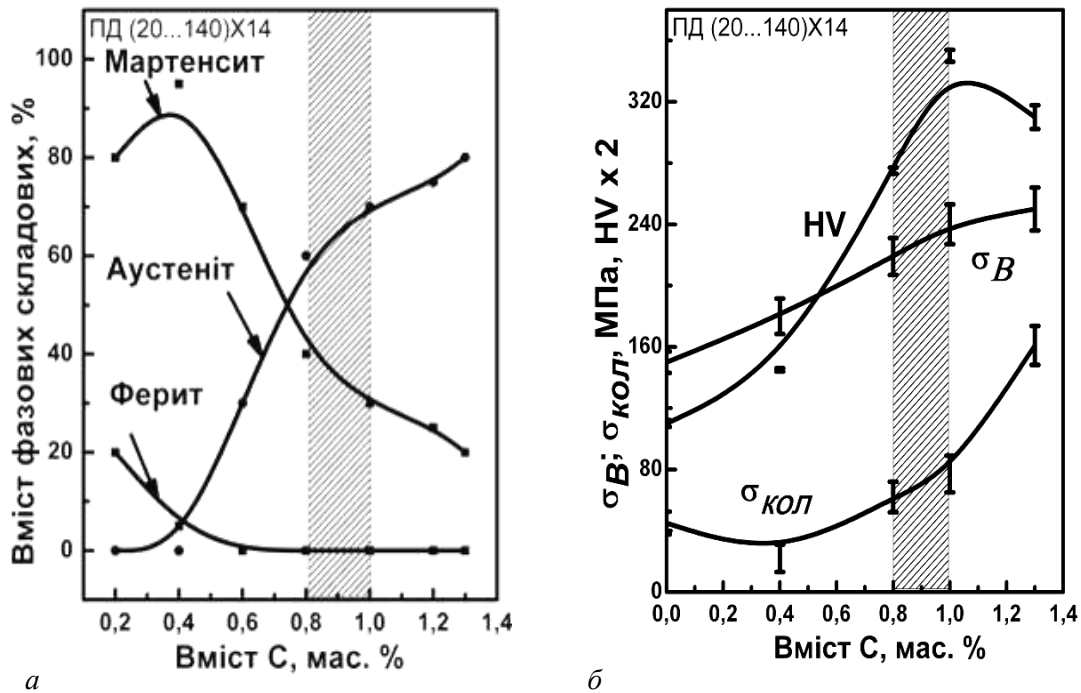


Рис. 3. Вплив вмісту С в ЕДП на їх фазовий склад (а), когезивну міцність (σ_B), залишкові напруження ($\sigma_{кол}$) та мікротвердість (HV) (б).

Позитивний вплив вуглецю зумовлений тим, що під час лету диспергованих краплин унаслідок реакції ($C+O_2=CO_2$) утворюється захисна атмосфера з CO_2 , яка ускладнює окиснення їх поверхні. При цьому зменшується кількість окисної фази на поверхні розплавлених краплин і, як наслідок, сила зчеплення між ними зростає, через що підвищується когезивна міцність покриття. Твердість ЕДП зростає зі збільшенням вмісту в ньому С до 1 мас.%, однак, в подальшому знижується внаслідок підвищення вмісту залишкового аустеніту в покритті (рис. 3а). Одночасно залишкові напруження розтягу покриття зростають у 4 рази – від 40 до 160 МПа (рис. 3б). Такий високий їх рівень може викликати появу магістральних тріщин вже під час напилення, що призведе до його відшарування від основи. Тому за оптимальний вміст С у покритті, який забезпечує високу твердість, когезивну міцність та помірний рівень залишкових напружень розтягу, приймаємо 0,8...1 мас.%

Зі збільшенням вмісту Al в покритті з ПД 140X14Ю(0...3) від 0 до 3 мас.% у ньому зростає кількість фериту (рис. 4а), що сприяє зниженню на 30 % твердості покриття (рис. 4б) та вдвічі напружень розтягу внаслідок їх релаксації у пластичних ламелях фериту. Когезивна міцність покриття зростає за вмісту до 2 мас. % Al через реалізацію алюмотермічних реакцій в краплинах під час їх лету та кристалізації на поверхні напилення [10]. Ці реакції забезпечують підвищення температури краплин, тому

виникає більше точок мікрозварювання між ними. Зі зростанням вмісту **Al** в покритті понад 2 мас.% когезивний зв'язок між краплинами слабшає внаслідок утворення товстої оксидної плівки між ними. Така плівка погіршує мікро-зварювання краплин між собою під час формування покриттів. Оптимальний вміст **Al** в покритті знаходиться в межах 1... 1,5 мас.%.

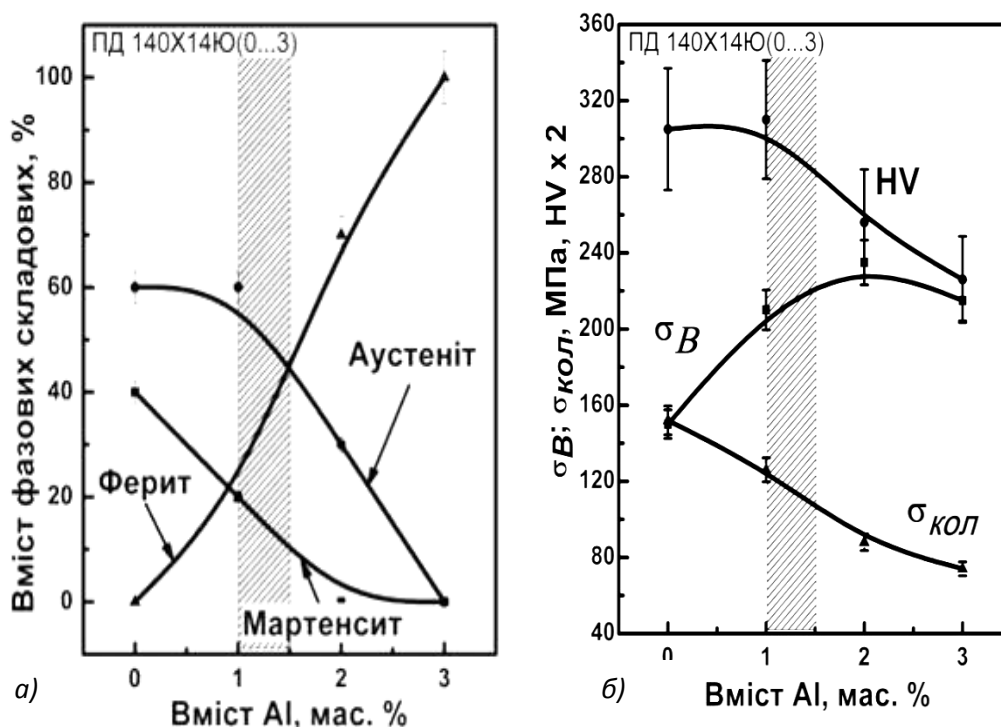


Рис. 4. Вплив вмісту **Al** в ЕДП на їх фазовий склад (а); когезивну міцність (σ_B), залишкові напруження ($\sigma_{кол}$) та мікротвердість (HV) (б).

Зі збільшенням вмісту **B** у покритті з ПД 70X20P(0...4)ГС2Ю від 0 до 4 мас.%: підвищується його твердість з 320 до 1100 HV (рис. 5); зростають залишкові напруження розтягу в покритті, які перевищують його когезивну міцність, в результаті чого з'являється сітка мікротріщин і зменшується когезивна міцність від 160 до 80 МПа. Підвищення твердості покриттів зумовлене виділенням у їх структурі дрібнодисперсних боридів $(FeCr)_2B$ розміром, меншим, ніж 200 нм. Оптимальний вміст **B** знаходиться в межах 2,5... 3,0 мас.%.

Відпуском ЕДП з ПД систем (**Fe-Cr-C** і **Fe-Cr-B**) за температур 450... 600°C знизили залишкові напруження розтягу в них (рис. 6). Для покриття з ПД (140X14H2ТЮ) системи **Fe-Cr-C** це пояснюється тим, що під час відпуску залишковий аустеніт у його

структурі перетворюється на мартенсит відпуску, що зумовлює зменшення залишкових напружень розтягу внаслідок зростання до 2,5% об'єму новоутвореної фази.

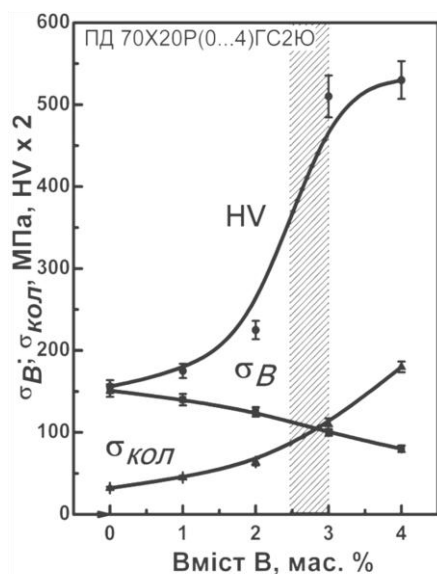


Рис. 5. Вплив вмісту **В** у ЕДП на їх когезивну міцність (σ_B), залишкові напруження ($\sigma_{кол}$) та мікротвердість (HV).

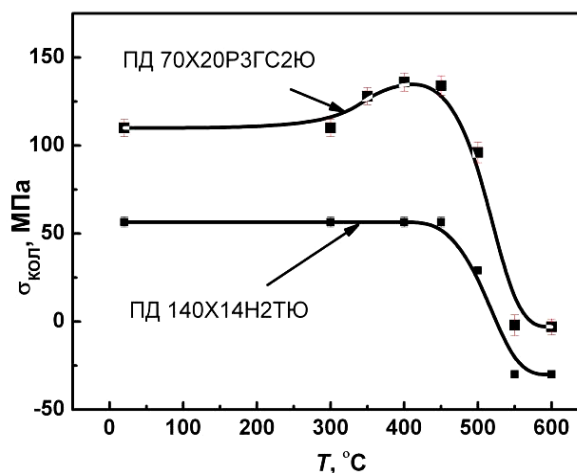


Рис. 6. Вплив відпуску ЕДП на релаксацію їх залишкових колових напружень.

Відпуск за температур 400...450 °С покриття з ПД 70Х20Р3ГС2Ю сприяє виділенню додаткової кількості боридних фаз, які зменшують об'єм покриття і, як наслідок, підвищують залишкові напруження розтягу. За подальшого росту температури відпуску (понад 450°С) напруження розтягу знижуються.

Висновки. Механічні характеристики покриттів із ПД залежать від їх фазового складу. Зі збільшенням вмісту аустеніту зростає не тільки когезивна міцність покриття, але і залишкові напруження. З підвищенням вмісту фериту та мартенситу залишкові напруження розтягу зменшуються.

Термічна обробка покриттів із аустенітною структурою знижує залишкові напруження розтягу або трансформує їх у напруження стиску, а покриттів із феритною структурою підвищує залишкові напруження внаслідок виділення дрібнодисперсних карбідів або боридів.

Бібліографічний список

1. Газообразивная износостойкость при повышенных температурах покрытий, полученных дуговой металлизацией / В. Похмурский, М. Студент, А. Похмурская и др. // Автомат. сварка. – 2013. – № 6. – С. 16–23.

2. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures / B. Wielage, H. Pokhmurska, M. Student et al. // *Surface and coating technology*. – 2013. – № 220. – P. 27–35.
3. Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures / V. Pokhmurskyi, M. Student, V. Gvozdeckii et al. // *J. of Thermal Spray Technology*. – 2013. – № 22. – Issue 5. – P. 808–819.
4. HVOF coatings as an alternative to hard chrome for pistons and valves / J.A. Picas, A.For, G. Mattha Eus // *Wear*. – 2006. – № 261. – P. 477–488.
5. Вплив Карбону в порошкових дротах системи Fe-Cr-C-Al на відносну зносостійкість покриттів за умов граничного мащення / М. Студент, О. Калахан, Т. Ступницький та ін. // *Вісник ЛНАУ : агроінженерні дослідження*. – Львів: Львів. нац. аграр. ун-т, 2013. – № 17. – С. 261–268.
6. Corrosion Behavior of Wire-Arc-Sprayed Stainless Steel Coating on Mild Steel / Z. Zeng, N. Sakoda, T. Tajiri // *J. of Thermal Spray Technology*. – 2006. – №15 (3). – P. 431–437.
7. Influence of process parameters on the quality of thermally sprayed X46Cr13 stainless steel coatings / M. F. O. Schiefler Filho, A. J. A. Buschinelli, F.Gärtner et al. // *J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.* – 2004. – № 1(26). – P. 98–106.
8. Структура, механічні та електрохімічні характеристики корозійностійких електродугових покриттів із порошкових дротів / В. Похмурський, М. Студент, Т. Ступницький, Н. Червінська // *Наук. нотатки*. – 2013. – № 41(2). – С. 127–132.
9. Бабичев М. А. Методы определения внутренних напряжений в деталях машин. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 132 с.
10. Ступницький Т. Р. Розроблення корозійнотривких зносостійких електродугових покриттів з порошкових дротів базових систем Fe–Cr–C та Fe–Cr–B: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т. Р. Ступницький. – Львів, 2014. – 20 с.

М. Студент, В. Гвоздецький, Т. Ступницький, О. Калахан. Вплив структури на механічні характеристики електродугових покриттів із порошкових дротів з вмістом хрому понад 12%.

Досліджено вплив структури електродугових покриттів із порошкових дротів систем Fe–Cr–C та Fe–Cr–B з підвищеним вмістом хрому на їхні механічні характеристики. Виявлено, що зі збільшенням вмісту аустеніту зростає когезивна міцність, проте суттєво – й рівень залишкових напружень. Із підвищенням вмісту фериту та мартенситу залишкові напруження розтягу зменшуються. Термічна обробка покриттів із аустенітною структурою знижує залишкові напруження розтягу або трансформує їх у напруження стиску, а покриттів із феритною структурою – підвищує їх внаслідок виділення дрібнодисперсних карбідів або боридів.

Ключові слова: електродугові покриття, порошкові дроти, фазовий склад, залишкові напруження, мікротвердість, бориди.

M. Student, V. Hvozdetzkyi, T. Stupnytskyi, O. Kalakhan. The influence of structure on mechanical properties of arc sprayed coatings from cored wires with chromium content above 12%.

The influence of structure of arc sprayed coating from Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems with enhanced chromium content on mechanical properties has been investigated. It has been found that with increase of austenite in the coatings structure the coatings cohesion increases too,

but significant increase the coatings level of tensile stresses. With growing content of ferrite and martensite in the structure of coatings its level of tensile stresses decreases. The thermal treatment of coatings with austenitic structure reduces tensile stresses level in coating or transform them into compressive stress. But thermal treatment of coatings with ferritic structure increases level of tensile stresses due to formation of fine carbides and borides.

Keywords: arc-sprayed coatings, cored wires, phase composition, ultimate tensile stresses, micro hardness, borides.

Н. Студент, В. Гвоздецкий, Т. Ступницкий, О. Калахан. Влияние структуры на механические характеристики электродуговых покрытий из порошковых проволок с содержанием хрома более 12%.

Исследовали влияние структуры электродуговых покрытий из порошковых проволок систем Fe–Cr–C и Fe–Cr–B, с повышенным содержанием хрома, на их механические характеристики. Выявлено, что с увеличением содержания аустенита возрастает когезивная прочность, однако существенно – и уровень остаточных напряжений. С повышением содержания феррита и мартенсита уровень остаточных напряжений растяжения уменьшается. Термическая обработка покрытий из аустенитной структурой уменьшает остаточные растягивающие напряжения или трансформирует их в напряжения сжатия, а покрытий из ферритной структурой – повышает остаточные напряжения за счет выделения мелкодисперсных карбидов или боридов.

Ключевые слова: электродуговые покрытия, порошковые проволоки, фазовый состав, остаточные напряжения, микротвердость, бориды.