

УДК 622.276.054

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ РЕАКЦІЙ УТВОРЕННЯ ХІМІЧНИХ СПОЛУК ПІД ЧАС ЕЛЕКТРОДУГОВОГО НАПИЛЮВАННЯ ПОКРИТТІВ ІЗ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ

О. Г. ЛУК'ЯНЕНКО, В. М. ГВОЗДЕЦЬКИЙ, М. М. СТУДЕНТ,
О. З. СТУДЕНТ, С. М. ЛАВРИСЬ, Н. З. МАЗОЛА

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

За зміною енергії Гіббса визначено термодинамічну ймовірність утворення простих сполук (оксидів, нітридів, карбідів) зі складників порошкових дротів під час напилювання відновних покриттів електродуговим методом. Оцінено можливі втрати легувальних елементів внаслідок випаровування у чистому вигляді та у складі простих сполук.

Ключові слова: *електродугове напилювання, порошкові дроти, покриття, енергія Гіббса, оксиди, нітриди, карбіди, тиск насиченої пари.*

The thermodynamic probability of the formation of simple compounds (oxides, nitrides, carbides) from the components of cored wires during deposition of restorative coatings by the arc sprayed method was considered based on the change in Gibbs energy. The possible loss of doping elements due to evaporation in their pure form and in the composition of simple compounds was estimated.

Keywords: *arc spraying, cored wires, coating, Gibbs energy, oxides, nitrides, carbides, saturated vapor pressure.*

Вступ. Для поверхневого зміцнення виробів часто використовують гальванічне хромування [1], електродугове напилювання [2–4], плазмове-електролітне оксидування [5–8], тверде анодування [9–11], наноструктурування інтенсивним пластичним деформуванням [12–17], які ефективні за втоми чи контактної втоми, в умовах тертя чи в корозивних середовищах. Проте за тривалої експлуатації зміцнені шари зношуються і деталь слід відновити. Серед багатьох газотермічних способів найефективнішим для цього вважають електродугове напилювання (ЕДН) покриттів – найекономічніший і найпростіший метод, що не потребує дорогого обладнання [18–20]. З його допомогою можна відновлювати близько 60% зношених деталей, зберігаючи їхню зносотривкість на рівні нових [21–23]. Попри низьку собівартість (в 1,4–1,8 рази нижча, ніж за наплавлення), він технологічно гнучкий, використовує відносно просте обладнання, не потребує висококваліфікованого персоналу, дає можливість наносити покриття значної товщини (0,1... 10 mm), не спричиняючи значного нагрівання деталей. Устаткування для ЕДН порівняно легке і його можна досить швидко переміщати і застосовувати в складних для доступу місцях [24–26]. Використовуючи для ЕДН спеціальні порошкові дроти (ПД), вдалося напилювати покриття, які характеризуються високою мікротвердістю, зносо- та корозійною тривкістю, причому і за кімнатних, і за підвищених температур [27–29]. Під час ЕДН торці ПД розплавляються в дузі, формуючи ванну з його розплавленої оболонки та шихтових матеріалів. Повітряний струмінь диспергує цей розплав на краплини та транспортує їх до напилюваної поверхні.

Розплавлені компоненти шихти та оболонки ПД взаємодіють між собою та киснем, утворюючи різні сполуки, які і формують покриття та визначають його фізико-механічні властивості.

Мета дослідження – на основі термодинамічного аналізу реакцій, які можливі між компонентами шихти ПД та повітряного струменя під час польоту краплин розплаву ПД до підкладки, оцінити можливість виникнення у покритті оксидів, карбідів та нітридів та втрати легувальних елементів через випаровування під час напилювання.

Методика ЕДН. Електродугові покриття (ЕДП) завтовшки 1 mm наносили металізатором ФМІ, використовуючи ПД діаметром 1,8 mm. За шихтові матеріали для ПД використали порошки феросплавів (ферохром, ферокремній, феромарганець, феротитан та карбід бору) та чистих металів (хром та алюміній). Оболонку ПД виготовляли зі стрічки шириною 10 і товщиною 0,4 mm зі сталі 08кп. Коефіцієнт заповнення ПД шихтою становив 25%. Режим нанесення ЕДП такий: струм 150 А, напруга горіння дуги 32...34 V. Розпилювали ПД струменем стиснутого повітря під тиском 0,8 МПа з дистанції 120 mm.

Експериментальні результати. Встановили, що під час ЕДН температура краплин розплавленого ПД, що транспортувалися повітряним струменем до напилюваної деталі, досягає 2000...2200°C. На дистанції напилювання ЕДП компоненти шихти ПД, його сталева оболонка та кисень з повітряного струменя взаємодіяли у кілька етапів (рис. 1): у зоні I температура шихти ПД ще перед потраплянням до зони горіння дуги досягала 1100...1500°C, легкоплавкі компоненти шихти ПД плавилися ще всередині оболонки, тоді як тугоплавкі та сталева оболонка лише окиснювалися; в зоні II температура на торцях ПД досягала 2200°C, оболонка та шихтові матеріали плавився в дузі з протіканням алюмотермічних реакцій відновлення оксидів заліза та хрому розплавленим алюмінієм з утворенням їх карбідів та боридів. Ці реакції екзотермічні та додатково підвищували температуру розплаву; в зоні III формувалися краплини розплавленого металу, які диспергувалися та транспортувалися повітряним струменем до напилюваної поверхні, що супроводжувалося інтенсивним вигоранням наявного в їх складі вуглецю. Водно-

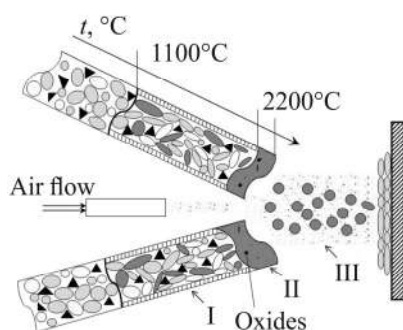


Рис. 1. Зони з різною температурою розплаву порошкового дроту під час напилювання електродугових покриттів.

Fig. 1. Zones with different temperatures of molten cored wire during application of arc sprayed coatings.

час відбувалося часткове окиснення всіх легувальних елементів ПД та їх відновлення алюмінієм з утворенням карбідів та боридів (зокрема, за взаємодії хрому та заліза із карбідом бору B_4C).

Термодинамічний аналіз можливих реакцій між компонентами ПД під час напилювання ЕДП. До шихти ПД, використаних для ЕДН, у вигляді порошків додавали ферохром (FeCr), хром, феромарганець (FeMn), феротитан (FeTi), ферокремній (FeSi), карбід бору (B_4C) у різних пропорціях. Щоб проаналізувати можливі реакції та встановити хімічні сполуки, що могли формуватися внаслідок взаємодії компонентів шихти з оболонкою ПД у розплавленому стані та компонентами повітря, визначили енергію Гіббса, яка описує імовірність утворення різних хімічних сполук внаслідок реакції простих елементів із компонентами повітря (киснем та азотом) у діапазоні температур 25...3000°C. Можливі втрати

компонентів ПД у результаті хімічних реакцій прогнозували за тиском насиченої пари хімічних елементів та їх сполук зі складниками повітря.

Визначення термодинамічних показників формування хімічних сполук із компонентів ПД. Утворення оксидів, нітридів та карбідів Fe, Al, Cr, Mn, Ti, Si, B, C за тиску повітря 10^5 Pa (1 bar) в інтервалі 25...3000°C оцінювали за довідниковими даними про термодинамічні показники (див. таблицю) [30–39].

Ентальпія ΔH_{298}^0 та ентропія ΔS_{298}^0 реакцій утворення оксидів, нітридів, карбідів основних елементів, присутніх у ПД

Реакція утворення	ΔH_{298}^0 , kJ/mol	ΔS_{298}^0 , J/(mol · K)	Реакція утворення	ΔH_{298}^0 , kJ/mol	ΔS_{298}^0 , J/(mol · K)
Оксидів			Нітридів		
$2Al + 1/2O_2 = Al_2O$	140,0	259,58	$Al + 1/2N_2 = AlN$	320,29	20,93
$2Al + 3/2O_2 = Al_2O_3$	1676,8	50,95	$B + 1/2N_2 = BN$	254,14	15,37
$2B + 3/2O_2 = B_2O_3$	1264,4	54,05	$Cr + 1/2N_2 = CrN$	118,07	33,49
$C + 1/2O_2 = CO$	110,598	198,04	$4Fe + 1/2N_2 = Fe_4N$	10,89	156,17
$C + O_2 = CO_2$	393,777	213,78	$2Fe + 1/2N_2 = Fe_2N$	3,77	101,32
$2Cr + 3/2O_2 = Cr_2O_3$	1130,4	81,2	$5Mn + 1/2N_2 = Mn_5N$	130,63	–
$Fe + 1/2O_2 = FeO$	266,7	54,0	$3Mn + N_2 = Mn_3N_2$	201,80	192,17
$3Fe + 2O_2 = Fe_3O_4$	1122,0	146,6	$Ti + 1/2 N_2 = TiN$	336,62	30,31
$2Fe + 3/2O_2 = Fe_2O_3$	822,7	90,0	Карбідів		
$Mn + 1/2O_2 = MnO$	385,2	59,75	$4Al + 3C = Al_4C_3$	150,3	131,1
$3Mn + 2O_2 = Mn_3O_4$	1387,5	148,6	$4B + C = B_4C$	51,1	27,08
$2Mn + 3/2O_2 = Mn_2O_3$	971,8	110,5	$4Cr + C = Cr_4C$	68,65	105,91
$Mn + O_2 = MnO_2$	548,0	60,7	$3Cr + 2C = Cr_3C_2$	87,9	20,4
$Si + O_2 = SiO_2$	880,1	42,12	$7Cr + 3C = Cr_7C_3$	177,9	200,93
$Ti + 1/2 O_2 = TiO$	518,7	34,79	$3Fe + C = Fe_3C$	–22,6	101,3
$2Ti + 3/2 O_2 = Ti_2O_3$	1519,4	78,84	$3Mn + C = Mn_3C$	15,07	98,8
$3Ti + 5/2 O_2 = Ti_3O_5$	2456,4	129,46	$Si + C = SiC$	51,91	16,54
$Ti + O_2 = TiO_2$	944,1	50,28	$Ti + C = TiC$	190,46	24,28

З аналізу залежності енергії Гіббса від температури (2000...3000°C) очевидно, що під час напильовання, найімовірніше, протікатиме реакція з утворенням оксиду вуглецю за часткової його втрати внаслідок вигорання (рис. 2a). Далі (згідно з розрахованою енергією Гіббса для їх утворення) формуватимуться оксиди Al, Ti, Si, B, Mn, Cr та Fe. Оксиди вуглецю можуть відновлюватися до чистого вуглецю. За температури нижче від 2000°C їх відновником може бути алюміній і титан, нижче від 1500°C – бор та кремній, нижче від 1000°C – марганець, а нижче від 500°C – залізо.

Згідно з розрахунком (див. таблицю і рис. 2b), за жодної з температур не було термодинамічних передумов для виникнення нітриду заліза, а ймовірність утворення нітриду титану була найбільша і зменшувалася в порядку від бору до марганцю та хрому. Крім того, розрахунки виявили, що енерговитрати на формування нітридів більші, ніж оксидів відповідних елементів, а отже, ймовірність процесів окиснення вища, ніж нітрування.

Аналізуючи термодинамічно визначені ймовірності реакцій (див таблицю і рис. 2c), встановили таку послідовність виникнення карбідів: від найочікуванішо-

го карбіду титану до карбідів хрому і бору та до найменш ймовірного карбіду марганцю. Оскільки на формування карбідів витрачається більше енергії, ніж на утворення оксидів та нітридів, то незалежно від температури процеси окиснення та нітрування переважатимуть над карбідоутворенням.

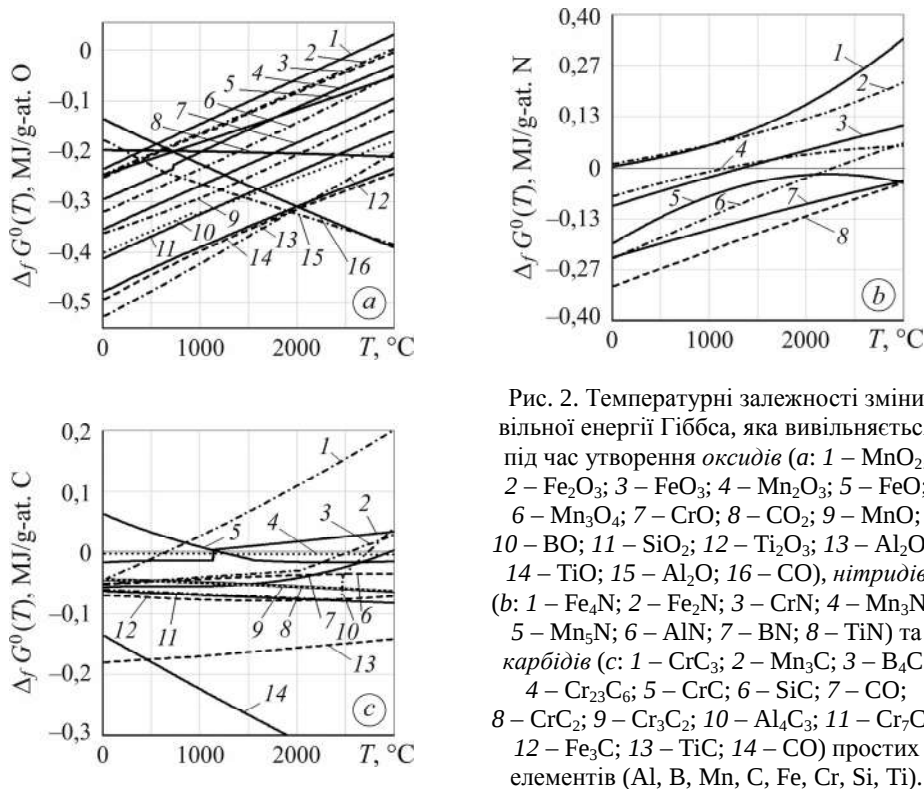


Fig. 2. Temperature dependences of the changes in Gibbs free energy released during the formation of oxides (a: 1 – MnO₂; 2 – Fe₂O₃; 3 – FeO₃; 4 – Mn₂O₃; 5 – FeO; 6 – Mn₃O₄; 7 – CrO; 8 – CO₂; 9 – MnO; 10 – BO; 11 – SiO₂; 12 – Ti₂O₃; 13 – Al₂O₃; 14 – TiO; 15 – Al₂O; 16 – CO), nitrides (b: 1 – Fe₄N; 2 – Fe₂N; 3 – CrN; 4 – Mn₃N₂; 5 – Mn₅N; 6 – AlN; 7 – BN; 8 – TiN) and carbides (c: 1 – CrC₃; 2 – Mn₃C; 3 – B₄C; 4 – Cr₂₃C₆; 5 – CrC; 6 – SiC; 7 – CO; 8 – CrC₂; 9 – Cr₃C₂; 10 – Al₄C₃; 11 – Cr₇C₃; 12 – Fe₃C; 13 – TiC; 14 – CO) of simple elements (Al, B, Mn, C, Fe, Cr, Si, Ti).

За енергією Гіббса визначили таку черговість найімовірніших реакцій з утворенням оксидів, нітридів та карбідів основних елементів, наявних у складі ПД (рис. 3): оксиди, нітриди та карбіди B, Si, C (рис. 3a); оксиди Fe, тоді як термодинамічних передумов для утворення його карбідів чи нітридів немає, оскільки їх енергія Гіббса додатна (рис. 3b); оксид та карбіди Cr, тоді як його нітрид може формуватися лише до температури 1300°C (рис. 3c); оксиди та нітриди Mn, тоді як його карбід може утворитись лише за температури нижче від 1100°C (рис. 3d); оксиди, нітрид та карбід Ti (рис. 3e) та Al (рис. 3f).

Тиск насиченої пари чистих елементів, оксидів, нітридів та карбідів. Необхідною передумовою випаровування чистих елементів та їх сполук вважали перевищення тиску їх насиченої пари проти атмосферного (10⁵ Pa). Проаналізувавши умови досягнення насиченої пари чистих елементів (рис. 4a) та їх сполук – оксидів (рис. 4b), нітридів (рис. 4c) та карбідів (рис. 4d), встановили, що їх випаровування можливе за певних температур.

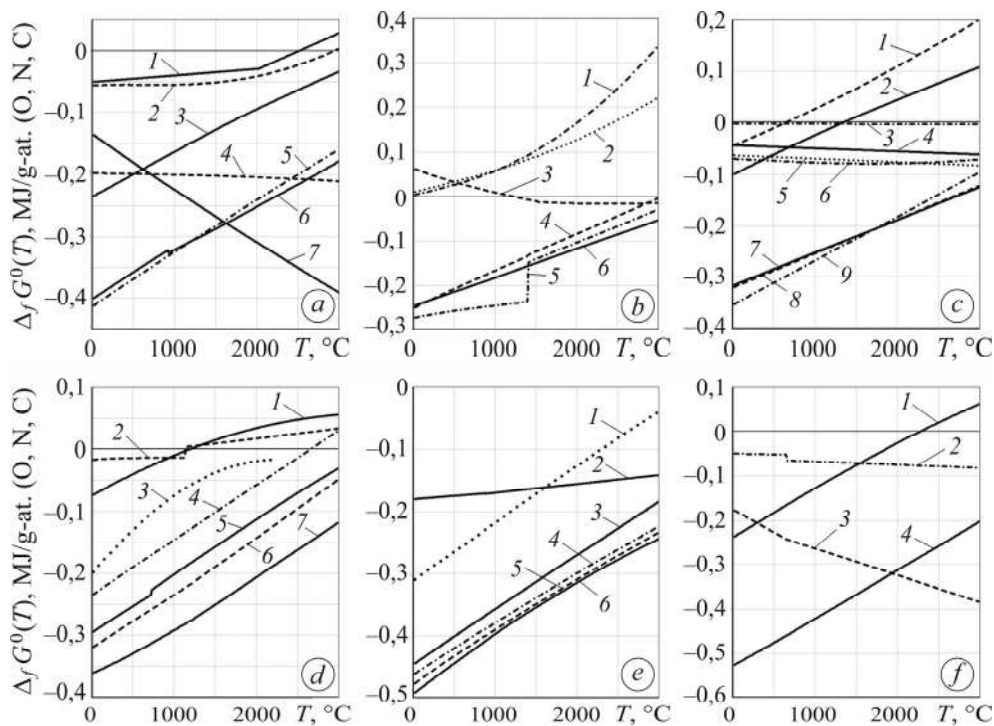


Рис. 3. Зміна вільної енергії Гіббса під час утворення оксидів, нітридів та карбідів, відповідно, для B, Si, C (a: 1 – B_4C ; 2 – BC ; 3 – BN ; 4 – CO_2 ; 5 – SiO_2 ; 6 – BO ; 7 – CO), Fe (b: 1 – Fe_4N ; 2 – Fe_2N ; 3 – Fe_3C ; 4 – Fe_2O_3 ; 5 – Fe_3O_4 ; 6 – FeO), Cr (c: 1 – CrC_3 ; 2 – CrN ; 3 – $Cr_{23}C_6$; 4 – Cr_3C_2 ; 5 – Cr_7C_3 ; 6 – CrC ; 7 – CrO ; 8 – Cr_3O_4 ; 9 – Cr_2O_3), Mn (d: 1 – Mn_3N_2 ; 2 – Mn_3C ; 3 – Mn_5N ; 4 – MnO_2 ; 5 – Mn_2O_3 ; 6 – Mn_3O_4 ; 7 – MnO), Ti (e: 1 – TiN ; 2 – TiC ; 3 – TiO_2 ; 4 – Ti_3O_5 ; 5 – Ti_2O_3 ; 6 – TiO), Al (f: 1 – AlN ; 2 – Al_4C_3 ; 3 – Al_2O ; 4 – Al_2O_3).

Fig. 3. Gibbs free energy change during the formation of oxides, nitrides, and carbides, respectively, for elements B, Si, C (a: 1 – B_4C ; 2 – BC ; 3 – BN ; 4 – CO_2 ; 5 – SiO_2 ; 6 – BO ; 7 – CO), Fe (b: 1 – Fe_4N ; 2 – Fe_2N ; 3 – Fe_3C ; 4 – Fe_2O_3 ; 5 – Fe_3O_4 ; 6 – FeO), Cr (c: 1 – CrC_3 ; 2 – CrN ; 3 – $Cr_{23}C_6$; 4 – Cr_3C_2 ; 5 – Cr_7C_3 ; 6 – CrC ; 7 – CrO ; 8 – Cr_3O_4 ; 9 – Cr_2O_3), Mn (d: 1 – Mn_3N_2 ; 2 – Mn_3C ; 3 – Mn_5N ; 4 – MnO_2 ; 5 – Mn_2O_3 ; 6 – Mn_3O_4 ; 7 – MnO), Ti (e: 1 – TiN ; 2 – TiC ; 3 – TiO_2 ; 4 – Ti_3O_5 ; 5 – Ti_2O_3 ; 6 – TiO), Al (f: 1 – AlN ; 2 – Al_4C_3 ; 3 – Al_2O ; 4 – Al_2O_3).

Зокрема, температура випаровування марганцю перевищує $1750^{\circ}C$, алюмінію – $2250^{\circ}C$, хрому – $2400^{\circ}C$; *оксидів*: B_2O_3 – досягатиме понад $1750^{\circ}C$, Al_2O_3 – $2200^{\circ}C$, CrO – $2700^{\circ}C$, Fe_3O_4 – $2700^{\circ}C$, SiO_2 – $2800^{\circ}C$; *нітридів*: MnN – перевищуватиме $2050^{\circ}C$, CrN – $2700^{\circ}C$, FeN – $2800^{\circ}C$ (хоча за термодинамічними розрахунками сполуки FeN (рис. 4b), CrN (рис. 4c) та MnN (рис. 4d) взагалі не мали би утворитися за цих температур); *карбідів*: Mn_7C_3 – досягатиме понад $2050^{\circ}C$, AlC – $2500^{\circ}C$, $Cr_{23}C_6$ – $2750^{\circ}C$ (хоча за розрахунками сполука Mn_7C_3 за цих температур взагалі не повинна б виникати).

Експериментальна верифікація виконаних термодинамічних розрахунків підтвердила, що під час ЕДН покриттів із ПД системи легування $Fe-Cr-Mn-Ti-Si-B-C$ у напилених покриттях утворювалися леговані хромом бориди заліза $FeCr_2B$, оксиди на основі заліза, марганцю та алюмінію. При цьому в оксидну фазу переходило до 10% алюмінію та до 40% титану, що містився у складі ПД. Внаслідок випаровування втрати вуглецю досягали 50%. Отже, і термодинамічні розрахунки імовірностей утворення різних сполук, і експериментальні оцінки елементного складу ЕДП узгоджуються між собою і довели правомірність використання наведених термодинамічних розрахунків для обґрунтування вмісту еле-

ментів у шихті ПД для досягнення необхідного складу покриттів, отриманих методом ЕДН.

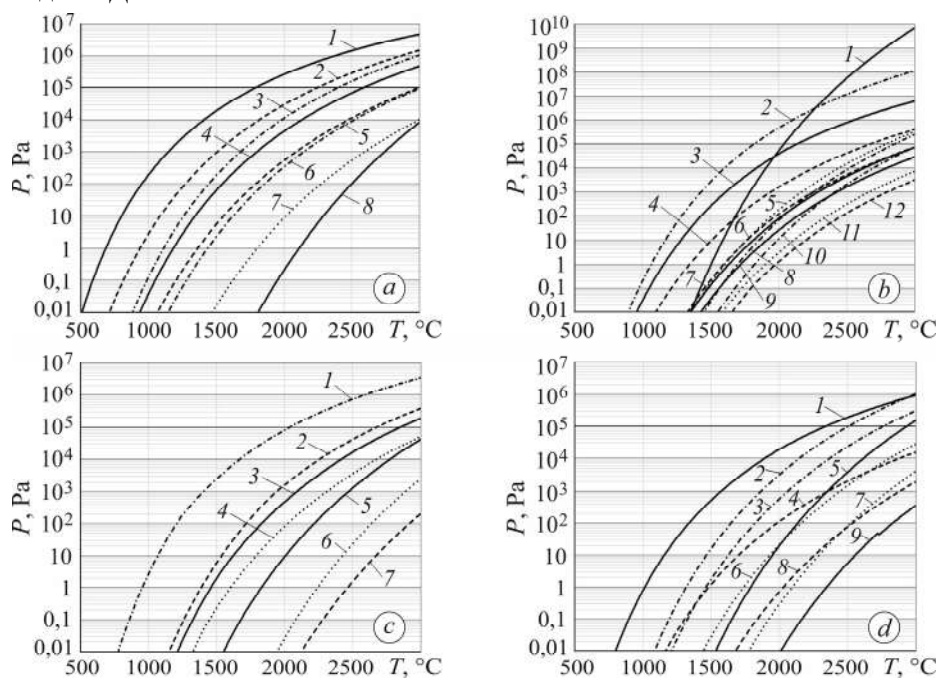


Рис. 4. Температурні залежності зміни тиску насиченої пари чистих елементів (а: 1 – Mn; 2 – Al; 3 – Cr; 4 – Fe; 5 – Si; 6 – Ti; 7 – B; 8 – C), оксидів (b: 1 – Al_2O_3 ; 2 – B_2O_3 ; 3 – Al_2O_3 ; 4 – CrO; 5 – Fe_3O_4 ; 6 – MnO; 7 – FeO; 8 – SiO_2 ; 9 – TiO; 10 – Cr_2O_3 ; 11 – Ti_2O_3 ; 12 – TiO_2), нітридів (c: 1 – MnN; 2 – CrN; 3 – FeN; 4 – SiN; 5 – TiN; 6 – BN; 7 – AlN) та карбідів (d: 1 – Mn_7C_3 ; 2 – AlC; 3 – Cr_{23}C_6 ; 4 – Cr_7C_3 ; 5 – SiC; 6 – Cr_3C_2 ; 7 – BC; 8 – B_2C ; 9 – TiC).

Fig. 4. Temperature dependences of the change in saturated vapor pressure of pure elements (a: 1 – Mn; 2 – Al; 3 – Cr; 4 – Fe; 5 – Si; 6 – Ti; 7 – B; 8 – C), oxides (b: 1 – Al_2O_3 ; 2 – B_2O_3 ; 3 – Al_2O_3 ; 4 – CrO; 5 – Fe_3O_4 ; 6 – MnO; 7 – FeO; 8 – SiO_2 ; 9 – TiO; 10 – Cr_2O_3 ; 11 – Ti_2O_3 ; 12 – TiO_2), nitrides (c: 1 – MnN; 2 – CrN; 3 – FeN; 4 – SiN; 5 – TiN; 6 – BN; 7 – AlN) and carbides (d: 1 – Mn_7C_3 ; 2 – AlC; 3 – Cr_{23}C_6 ; 4 – Cr_7C_3 ; 5 – SiC; 6 – Cr_3C_2 ; 7 – BC; 8 – B_2C ; 9 – TiC).

ВИСНОВКИ

Під час електродугового напилювання покриттів оболонка та шихтові матеріали плавляться, в розплаві відбуваються алюмотермічні реакції відновлення оксидів заліза та хрому розплавленим алюмінієм з утворенням їх карбідів та боридів. Ці реакції екзотермічні та підвищують температуру розплаву до 2000... 2200°C. Термодинамічними розрахунками визначено імовірність протікання реакцій з виникненням хімічних сполук (оксидів, нітридів та карбідів) з компонентів шихти порошкового дроту (Fe, Al, Cr, Mn, Ti, Si, B та C) під час електродугового напилювання покриттів. Виявлено, що за температури нижче 2200°C внаслідок взаємодії складників порошкового дроту з компонентами повітряного розпилювального струменя (кисню та азоту), найімовірніше, формуватимуться оксиди металів та вуглецю, а нітридів та карбідів металів – малоймовірно. Через безпосереднє випаровування елементів чи їх оксидів (CO , B_2O_3 , Fe_2O_3 , CrO, Fe_3O_4 , SiO_2), чи карбідів (AlC, Cr_{23}C_6) можна очікувати зменшення вмісту Mn, Al, Cr, B та C у напиленому покритті проти їх кількості в порошковому дроті.

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проєкту № 2022.01/0005 “Концепція відновлення та подовження експлуатаційного ресурсу обладнання найважливіших галузей народного господарства України”.

1. *Peltier F. and Thierry D.* Review of Cr-free coatings for the corrosion protection of aluminum aerospace alloys // *Coatings*. – 2022. – 12(4). – Article number 518. <https://doi.org/10.3390/coatings12040518>
2. *Cored-wire arc spray fabrication of novel aluminium-copper coatings for anti-corrosion/ fouling hybrid performances / L. Fang, J. Huang, Y. Liu, B. Zhang, and H. Li* // *Surf. and Coat. Technol.* – 2019. – **357**, № 15. – P. 794–801. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.10.094>
3. *Improvement of wear resistance of aluminum alloy by HVOF method / V. Hutsaylyuk, M. Student, K. Zadorozhna, O. Student, H. Veselivska, V. Gvosdetskii, P. Maruschak, and H. Pokhmurska* // *J. Mater. Res. Technol.* – 2020. – **9**. – Article number 16367. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.11.102>
4. *Mechanical properties of arc coatings sprayed with cored wires with different charge compositions / M. Student, V. Hvozdet'skyi, T. Stupnytskyi, O. Student, P. Maruschak, O. Prentkovskis, and P. Skackauskas* // *Coatings*. – 2022. – 12(7). – Article number 925. <https://doi.org/10.3390/coatings12070925>
5. *Wear and corrosion resistance of plasma electrolytic oxidation coatings on 6061 Al alloy in electrolytes with aluminate and phosphate / Z. Peng, H. Xu, S. Liu, Y. Qi, and J. Liang* // *Mater.* – 2021. – **14**. – Article number 4037. <https://doi.org/10.3390/ma14144037>
6. *The role of hydrogen in the formation of oxide-ceramic layers on aluminum alloys during their plasma-electrolytic oxidation / V. Hutsaylyuk, M. Student, V. Posuvailo, O. Student, V. Hvozdet'skyi, P. Maruschak, and V. Zakiev* // *J. Mater. Res. Technol.* – 2021. – **14**. – P. 1682–1696. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.07.082>
7. *Famiyeh L. and Huang X.* Plasma electrolytic oxidation coatings on aluminum alloys: Microstructures, properties, and applications // *Moden Concept Mater. Sci.* – 2019. – 2(1). – P. 1–13. <https://doi.org/10.33552/MCMS.2019.02.000526>
8. *Design of a two-layer Al–Al₂O₃ coating with an oxide layer formed by the plasma electrolytic oxidation of al for the corrosion and wear protections of steel / L. Ropyak, T. Shihab, A. Velychkovych, O. Dubei, T. Tutko, and V. Bilinskyi* // *Progress in Physics of Metals*. – 2023. – **24**. – P. 319–365. <https://doi.org/10.15407/ufm.24.02.319>
9. *Scampone G. and Timelli G.* Anodizing Al–Si foundry alloys: A critical review // *Adv. Eng. Mater.* – 2022. – **24**, № 4. – Article number 2101480. <https://doi.org/10.1002/adem.202101480>
10. *Tribological properties of the oxide coatings produced onto 6061-T6 aluminum alloy in the hard anodizing process / P. Kwolek, K. Krupa, A. Obłój, P. Kocurek, M. Wierzbńska, and J. Sieniawski* // *J. Mater. Eng. and Perform.* – 2018. – **27**. – P. 3268–3275. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3421-8>
11. *Abrasive wear resistance and tribological characteristics of impulse hard anodized layers on aluminum alloy 1011 in tribocontact with steel and ceramics in various lubricants / M. Student, I. Pohrelyuk, J. Padgurskas, V. Hvozdet'skyi, K. Zadorozhna, H. Veselivska, O. Student, and O. Tkachuk* // *Coatings*. – 2023. – 13 (11). – Article number 1883. <https://doi.org/10.3390/coatings13111883>
12. *Wear resistance of the surface nanocrystalline structure under an action of diethylene glycol medium / H. Nykyforchyn, V. Kyryliv, O. Maksymiv, V. Kochubie, R. Boyko, and V. Dovhunyk* // *Appl. Nanosci.* – 2019. – **9**, № 5. – P. 1085–1090. DOI:10.1007/s13204-018-0690-3
13. *Serviceability of 60KH2M roll steel with surface nanostructure / V. I. Kyryliv, B. P. Chaikov'skyi, O. V. Maksymiv, A. V. Shal'ko, and P. Ya. Sydor* // *Materials Science*. – 2017. – **52**, № 6. – P. 848–853. DOI:10.1007/s11003-017-0030-x
14. *The mode deformation effect on surface nanocrystalline structure formation and wear resistance of steel 41Cr4 / V. Kyryliv, O. Maksymiv, V. Gurey, I. Hurey, Y. Kyryliv, and O. Zvirko* // *Coatings*. – 2023. – 13(2). – Article number 249. DOI:10.3390/coatings13020249
15. *Contact fatigue of 20KhN3A and 55SMFA steels with surface nanostructured layers in corrosive-abrasive media / V. I. Kyryliv, B. P. Chaikov'skyi, O. V. Maksymiv, and A. V. Shal'ko* // *Materials Science*. – 2018. – **53**, № 4. – P. 508–513. DOI:10.1007/s11003-018-0103-5
16. *Kyryliv V. I., Zakiev V. I., and Maksymiv O. V.* Change of the modulus of elasticity of the surface nanostructured layer on U8 steel // *Materials Science*. – 2023. – **58**, № 6. – P. 795–800. DOI:10.1007/s11003-023-00732-z
17. *Kyryliv V., Kyryliv Y., and Sas N.* Formation of surface ultrafine grain structure and their physical and mechanical characteristics using vibration-centrifugal hardening // *Adv. Mater. Sci. and Eng.* – 2018. – Article number 3152170. DOI: 10.1155/2018/3152170
18. *Abrasive wear resistance and tribological characteristics of electrometallized composite coatings / M. M. Student, S. I. Markovych, V. M. Hvozdet'skyi, O. S. Kalakhan, and V. M. Yuskiv* // *Materials Science*. – 2022. – **58**, № 1. – P. 96–104. DOI:10.1007/s11003-022-00636-4

19. *The effect of increasing the air flow pressure on the properties of coatings during the arc spraying of cored wires* / M. Student, V. Gvozdetsky, O. Student, O. Prentkovskis, P. Marushchak, O. Olenyuk, and L. Titova // *J. of Mechanical Eng.: Strojnický Casopis*. – 2019. – 69, № 4. – P. 133–146. DOI: 10.2478/scjme-2019-0048
20. *Optimization of the chromium content of powder wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coatings* / T. R. Stupnyts'kyi, M. M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, and V. M. Hvozdet's'kyi // *Materials Science*. – 2016. – 52, № 2. – P. 165–172. DOI:10.1007/s11003-016-9939-8
21. *Davis J. R. Handbook of Thermal Spray Technology*. – USA: ASM Int., 2004. – 338 p. ISBN-10:0871707950. ISBN-13:978-0871707956
22. *Pawlowski L. The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. – Chichester: Wiley, 2008. – 648 p. DOI:10.1002/9780470754085
23. *Путер Ф. Руджеруо. Использование покрытий из карбида вольфрама, наносимых методами газотермического напыления, для защиты различных деталей шасси авиационной техники* // *Adv. Mater. and Processes: [Электронный ресурс]*. – Нью-Джерси, July 2005. http://www.tspc.ru/about/lit/zamena_galvaniki/
24. *Horner A. L., Hall A. C., and McCloskey J. F. The effect of process parameters on twin wire arc spray pattern shape* // *Coatings*. – 2015. – 5. – P. 115–123. DOI: 10.3390/coatings5020115
25. *Johnston A. L., Hall A. C., and McCloskey J. F. Effect of process inputs on coating properties in the twin-wire arc zinc process* // *J. Therm. Spray Technol.* – 2013. – 22, № 6. – P. 856–863. DOI: 10.1007/s11666-013-9949-0
26. *Patino-Infante M. and Marino-Camargo A. Iron based coatings deposited by arc thermal spray* // *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*. – 2017. – № 83. – P. 31–35. DOI: 10.17533/udea.redin.n83a04
27. *Матвейшин Е. Н. Нанесение слоев с высокой прочностью сцепления методами электродуговой металлизации* // *Автомат. сварка*. – 2000. – № 8. – С. 20–22.
28. *A study on high temperature oxidation behavior of high-velocity arc sprayed Fe-based coatings* / X. Zhang, Z. Wang, J. Lin, and Z. Zhou // *Surf. Coat. Technol.* – 2015. – 283. – P. 255–261. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.10.067>
29. *Microstructure and high temperature corrosion behavior of wire-arc sprayed FeCrSiB coating* / R. Li, Z. Zhou, D. He, Y. Wang, X. Wu, and X. Song // *J. Therm. Spray Technol.* – 2015. – 24, № 5. – P. 857–864. DOI: 10.1007/s11666-015-0244-0
30. *Fromm E. and Horz G. Hydrogen, nitrogen, oxygen, and carbon in metals* // *Int. Metals Reviews*. – 1980. – № 5 and 6. – P. 269–311. <https://doi.org/10.1179/imtr.1980.25.1.269>
31. *Тепловые эффекты химических реакций и расчет энергии Гиббса* / А. Б. Чанов, Г. В. Довнар, Б. М. Немененок, С. П. Задруцкий, В. А. Розум, А. П. Бежок, Е. В. Быцько // *Металл и литее Украины*. – 2011. – № 6 (217). – С. 35–39. http://nbuv.gov.ua/UJRN/MLU_2011_6_8
32. *Binnewies M. and Milke E. Thermochemical Data of Elements and Compounds* // Second, Revised and Extended Edition. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2002. – 928 p. Online ISBN:9783527618347. DOI:10.1002/9783527618347
33. *NASA/NP-2001210959/REV1*. – CAP: A Computer Code for Generating Tabular Thermodynamic Functions from NASA Lewis Coefficients / M. J. Zehe, S. Gordon, B. J. McBride. – Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, February 2002. – 78 p.
34. *NASA/TP-2002-211556*. – NASA Glenn Coefficients for Calculating Thermodynamic Properties of Individual Species / B. J. McBride, M. J. Zehe, S. Gordon. – Cleveland, Ohio: Glenn Research Center, September 2002. – 286 p.
35. *Yaws C. L. Handbook of chemical compound data for process safety*. – Houston: Gulf Publ. Company, Texas, USA, 1997. – 234 p.
36. *Barin I. Thermochemical data of pure substances* / In collab. with G. Platzki. – Weinheim, New York, Basel, Cambridge, Tokyo: VCH, 1995. – 1886 p.
37. *Wicks C. E. and Block F. E. Thermodynamic Properties of 65 Elements: Their Oxides, Halides, Carbides and Nitrides*. – U.S.: Government Printing Office, 1963. – 150 p.
38. *Zhang Y., Evans J. R. G., and Yang S. Corrected values for boiling points and enthalpies of vaporization of elements in handbooks* // *J. Chemical & Eng. Data*. – 2011. – 56, № 2. – P. 328–337. DOI: 10.1021/je1011086
39. *Yaws C. L. Handbook of Vapor Pressure. Vol. 4: Inorganic Compounds and Elements*. – Houston, Texas: Gulf Publ. Company, 1995. – 364 p.

Одержано 20.01.2024