

АБРАЗИВНА ЗНОСОТРИВКІСТЬ ЛЕГОВАНИХ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИВІВ ІЗ ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ

В. М. ГВОЗДЕЦЬКИЙ

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

Досліджено структуру, абразивну та газоабразивну зносотривкість електродугових покривів з порошкових дротів вітчизняних і провідних іноземних фірм TAFA, Praxair, EnDoTec DO, Castolin-EuTronic за кімнатних та підвищених температур. Встановлено, що зносотривкість покриву, напиленого з двох різнорідних дротів, у два рази більша, ніж сталі ШХ15 за випроб закріпленим абразивом внаслідок його підвищеної когезійної міцності, низького рівня залишкових напружень та високої твердості. Виявлено, що за випроб незакріпленим абразивом найвищу зносотривкість має покров з порошкового дроту марки EnDoTec DO*390N через вміст у його шихті карбідів вольфраму, ванадію та ніобію. Встановлено, що за кімнатної температури газоабразивна зносотривкість покривів є така ж, як у сталі 12Х1МФ, або суттєво нижча за неї. За підвищення температури понад 400°C вона зростає внаслідок формування оксидів різного складу.

Ключові слова: *електродугові покриви, опір зношуванню, ламелі, порошкові дроти, оксидні плівки.*

Електродуговий метод напилення покривів серед всіх газотермічних методів є технологічно найпростішим, найдешевшим, не потребує дороговартісного обладнання та легко впроваджується у виробництво [1–3]. Суттєвим його недоліком є вузький асортимент застосовуваних електродних матеріалів – суцільних дротів. Використання порошкових дротів (ПД) як електродних матеріалів для цього методу дало змогу суттєво розширити область його застосування [4, 5]. Покриви, нанесені електродуговою металізацією, дешевші в 3–10 разів, ніж плазмові. Використання методу забезпечує відновлення зношених поверхонь деталей різної форми [6–8]. Нижче дослідили структуру, механічні характеристики та опір абразивному зношуванню за кімнатних та підвищених температур електродугових покривів з порошкових дротів різного компонентного складу.

Методики досліджень. Покриви формували методом електродугового напилення із електродних матеріалів (порошкових дротів), які виготовляли в оболонці із низьковуглецевої сталі з наповнювачем (шихтою із порошків металів та сплавів) за такого режиму: струм – 120...130 А, напруга на дузі 32 V, дистанція напилення – 100...120 мм, тиск повітряного струменя 0,6...0,8 МПа. Когезивну міцність визначали на трубчатих зразках, на бічну поверхню яких наносили покров товщиною 1...1,2 мм, звільняли їх від оправки і розтягували на розривній машині, фіксуючи зусилля в момент руйнування. Внутрішні напруження визначали на розрізаному кільці згідно з методикою для біметалевих матеріалів. Опір газоабразивному зношуванню встановлювали на установці із механічним пришивденням абразиву за кімнатних та підвищених температур. Зносотривкість визначали за випроб закріпленим та незакріпленим абразивом. Опір зношуванню порівнювали із гартованою сталлю ШХ15 (HRC 62...65). Мікротвердість визначали за навантаження 200 г на ПМТ-3.

Контактна особа: В. М. ГВОЗДЕЦЬКИЙ, e-mail: gvosdetcki@gmail.com

Результати досліджень. Дослідили зносотривкість покривів із ПД, розроблених у ФМІ та іноземними фірмами Praxair, EnDoTec DO, Castolin із різним вмістом компонентів легування у шихті (див. таблицю).

Хімічний склад порошкових дротів

Марка ПД	Хімічний склад ПД
ФМІ-6	X6P3Ю14
ФМІ-10	50X6M2T2 + X6P3Ю14
Praxair and TAFA 95MXC	X29P4Г2C2
TAFA 140 MXC	400X25P5M6B15B12Г3C2
EnDoTec DO*390N	500X20P5M10B10B10Г5C2
Castolin-EuTronic® Arc 509	X30M15Ю4

Електродугові покриви з ПД мають типову ламелярну будову (рис. 1). Ламелі покривів відрізняються за довжиною та товщиною і, зазвичай, розділені між собою оксидними плівками різної товщини та хімічної природи (рис. 1а). Однак у структурі покривів часто трапляються ділянки, в межах яких ламелі зварені між собою (рис. 1б), про що свідчить відсутність оксидної плівки між ними. Крім того, у їхніх міжламелярних порожнинах спостерігали втілення крупних оксидів алюмінію або заліза, а також пори. Товщина та довжина ламелей залежить від режимів напилювання покривів, а саме, від тиску повітряного розпилюваного струменя. Із його збільшенням дисперговані краплини зменшуються за розмірами. При цьому зростає швидкість їх польоту та сила удару об поверхню напилювання.

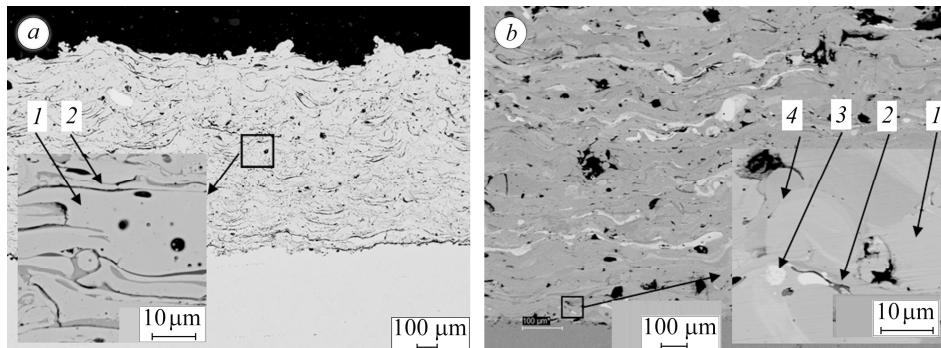


Рис. 1. Типова структура напилених покривів: *a* – ФМІ-6; *b* – EnDoTec DO*390N; 1 – ламелі, 2 – оксидні плівки, 3 – нерозчинені у розплаві сталеві оболонки легувальні компоненти шихти молібден та вольфрам, 4 – зварені ламелі.

Fig. 1. Typical structure of sprayed coatings: *a* – FMI-6; *b* – EnDoTec DO*390N; 1 – lamel coating, 2 – oxide films, 3 – insoluble charge alloying components molybdenum and tungsten in steel shell melts, 4 – lamellae welded with each other.

Всі досліджені покриви мають високу мікрогетерогенність за хімічним складом. Це означає, що ламелі, які формують покрив, мають різний вміст легувальних елементів. Встановлено, що мікрогетерогенність покривів зростає з підвищенням температури плавлення шихтових матеріалів. Наприклад, за додавання до складу шихти ПД молібдену ($T_{\text{melt}} = 2900^{\circ}\text{C}$) або вольфраму ($T_{\text{melt}} = 3400^{\circ}\text{C}$) які не встигають розчинитися у розплаві сталеві оболонки (рис. 1б, поз. 3), посилюється мікрогетерогенність покриву.

За вмісту 14 mass% Al у шихті (ПД Х6Р3Ю14) на поверхні краплин, які формують покрив, утворюється тугоплавка оксидна плівка Al_2O_3 , яка знижує когезивний зв'язок між ламелями. Напиленням покриву з двох різнорідних дротів (рис. 2) зменшили кількість та товщину міжламелярних оксидних плівок. Склад шихти ПД 50Х6М2Т2 створює передумови для формування у покриві ламелей мартенситної структури, які зменшують рівень залишкових напружень розтягу та кількість міжламелярних оксидних плівок на основі заліза.

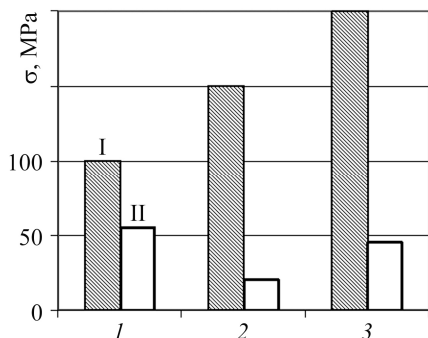
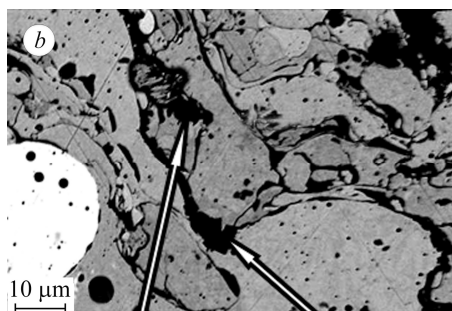
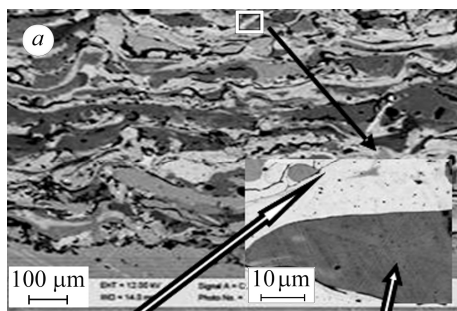


Рис. 2. Вплив складу шихти покривів на когезивну міцність σ_B (I) та залишкові колові напруження σ_R (II):
1 – ПД Х6Р3Ю14; 2 – ПД 50Х6М2Т2;
3 – ПД Х6Р3Ю14 + 50Х6М2Т2.

Fig. 2. Influence of coatings charge composition on cohesive strength σ_B (I) and residual circular stresses σ_R (II): 1 – powder wire (PW) Cr6B3Al14; 2 – PW 50Cr6Mo2Ti2; 3 – PW Cr6B3Al14 + 50Cr6Mo2Ti2.

За використання різнорідних ПД (Х6Р3Ю14 + 50Х6Г2М2) когезивна міцність покриву у двічі вища, ніж для покриву, отриманого розпилюванням ПД Х6Р3Ю14, і на 33% вища, ніж з ПД 50Х6Г2М2 (рис. 2). На межах між різнорідними ламелями у покриві з ПД Х6Р3Ю14 + 50Х6Г2М2 практично відсутні оксидні плівки (рис. 3a) на відміну від покриву з однорідного ПД (рис. 3b). Це зумовлено протіканням екзотермічної реакції, внаслідок чого відбувається мікрозварювання різнорідних ламелей: $Al + Fe_2O_3 = Al_2O_3 + Fe + Q$.



Елемент	mass%
Ti	0,4
Cr	6,5
Mn	1,3
Fe	90,0
Mo	1,8
Разом	100,00

Елемент	mass%
O	29,62
Al	1,12
Si	5,78
Ti	10,12
Cr	15,16
Mn	9,79
Fe	26,820
Разом	100,00

Елемент	mass%
O	25,78
Cr	1,62
Fe	71,60
Разом	100,00

Елемент	mass%
Al	10,6
Cr	5,6
Fe	83,8
Разом	100,0

Рис. 3. Хімічний склад та оксидні фази на межах поділу ламелей ПД:
a – Х6Р3Ю14 + 50Х6Г2М2; b – Х6Р3Ю14.

Fig. 3. Chemical composition and oxide phases at the boundaries PW lamellae division:
a – Cr6B3Al14 + 50Cr6Si2Mo; b – Cr6B3Al14.

Опір зношуванню покривів з ПД після випробувань закріпленим та незакріпленим абразивом. Встановлено, що за випробувань закріпленим абразивом зносотривкість покривів із різнорідних ПД (50X6M2T2 + X6P4Ю14) на 20% вища, ніж з ПД провідних іноземних фірм (рис. 4). Це зумовлено тим, що використання двох різнорідних дротів дало змогу одержати покриви з високою мікрогетерогенністю, низьким рівнем залишкових напружень розтягу та високою твердістю. Крім того, якщо в покриві із однакових ПД зносотривкість у 2,5 рази вища, ніж гартованої сталі ШХ15, то з двох різнорідних ПД (ФМІ-10) – у 3 рази вища (рис. 4).

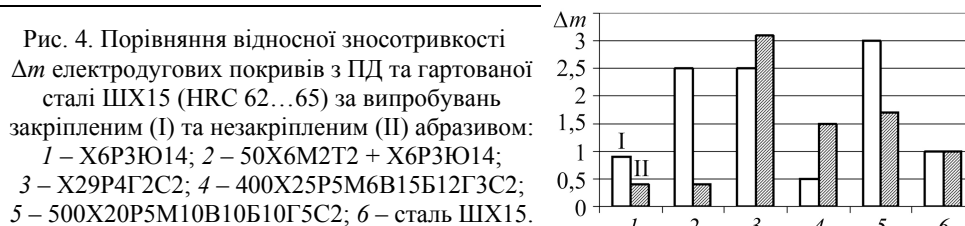


Fig. 4. Comparison of the relative wear resistance Δm of electric arc coatings from PW and tempered ШХ15 steel (HRC 62 ... 65) for test-fixed (I) and non-fixed (II) abrasives:
 1 – Cr6B3Al14; 2 – 50Cr6Mo2Ti2 + Cr6B3Al14; 3 – Cr29B4Mn2Si2;
 4 – 400Cr25B5Mo6V15Nb12Mn3Si2; 5 – 500Cr20B5Mo10V10Nb10Mn5Si2;
 6 – ШХ15 steel.

Дослідження закріпленим абразивом показали, що напилення різнорідними дротами дає покрив за зносотривкістю ліпший, ніж високолеговані покриви. Випробовуючи незакріпленим абразивом, встановили, що найвищу зносотривкість має покрив з ПД EnDoTec DO*390N, до складу шихти якого входить значна кількість карбідів вольфраму, ванадію та ніобію (рис. 4). Вона є більш ніж у тричі вища порівняно зі сталлю ШХ15. Покрив ФМІ-10 має майже вдвічі більшу зносотривкість, ніж еталон через вміст дисперсних боридів Fe₂B, CrB та інтерметалідів Al₃Fe.

Газоабразивна зносотривкість електродугових покривів. На інтенсивність газоабразивного зношування суттєвий вплив має морфологія оксидної плівки на поверхні покриву. Газоабразивна зносотривкість покриву із ПД X6P3Ю14 (рис. 5), на поверхні якого за підвищених температур формується монолітна оксидна плівка гематиту, легована алюмінієм (FeAl)₂O₃, є вищою, ніж зносотривкість гематиту голкоподібної форми на сталі 12X1MФ. Експозиція покривів забезпечує внутрішнє міжламелярне окиснення. Міжламелярні пори та мікротріщини у покривах заповнюються продуктами газової корозії – оксидними плівками (переважно з оксидів заліза, легованих алюмінієм та хромом). Утворені оксиди мають більший питомий об'єм, ніж поверхні ламелей, і заповнюють повністю пори між ними та берегами мікротріщин, суттєво збільшують об'єм всього покриву. При цьому напруження розтягу, які виникають у покриві через менший, ніж сталі, коефіцієнт термічного розширення, знижуються або переходять у напруження стиску.

У складі покриву з ПД TAFA 95MXC та EnDoTec DO*390N міститься велика кількість елементів легування (особливо хрому) (див. таблицю), що забезпечує їм високу тривкість до окиснення за підвищених температур. Такі покриви також мають високу твердість (1100...1200 HV) через підвищений вміст бору та вуглецю у ПД. Це призводить до виникнення мікротріщин у покривах під час напилення. Високий вміст хрому у них суттєво сповільнює внутрішнє міжламелярне окиснення і рівень напружень розтягу не зменшується.

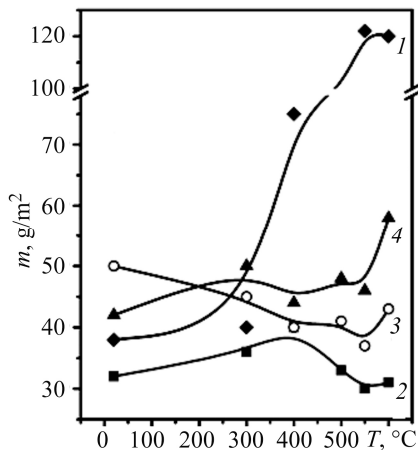


Рис. 5. Вплив температури на газоабразивну зносотривкість електродугових покриттів:
 1 – сталь 12Х1МФ, 2 – ПД Х6РЗЮ14,
 3 – ПД 400Х25Р5М6В15Б12Г3С2,
 4 – ПД 500Х20Р5М10В10Б10Г5С2.

Fig. 5. Influence of temperature on gasabrasive wear resistance of electric arc coatings:
 1 – 12X1MΦ steel, 2 – PW Cr6B3Al14,
 3 – PW 400Cr25B5Mo6V15Nb12Mn3Si2,
 4 – PW 500Cr20B5Mo10W10Nb10Mn5Si2.

Покриття із досліджуваними легувальними елементами мають високу зносотривкість за дисперсійного твердіння, інтенсивного внутрішнього міжламелярного окиснення, трансформації напружень розтягу в напруження стиску та утворення поверхневої окисної плівки з високим опором до зношування.

Порівняльними випробуваннями встановлено, що електродуговий покриття із ПД Х6РЗЮ14 має вищий опір до газоабразивного зношування за кімнатних та підвищених температур, ніж покриття з підвищеним вмістом легувальних елементів (рис. 5).

Зношування сталі 12Х1МФ з твердістю 350 HV відбувається шляхом втомного руйнування поверхні внаслідок пластичної деформації, яка виникає через багаторазові удари абразивних частинок. На поверхні сталі утворюються заглибини, які виникли після відшарувань наклепаних часточок, а також мікроборозенки від різання абразивом.

Внаслідок ерозійного зношування покриття руйнуються і утворюються мікротріщини радіальні, поперечні та Герца (рис. 6), що зумовлює викришування цілих ламелей покриття.

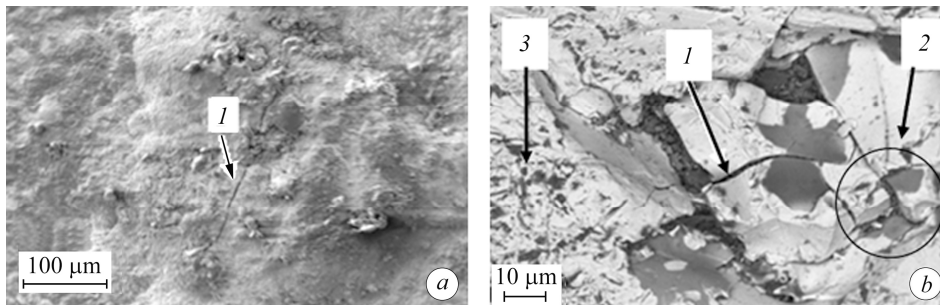


Рис. 6. Характер руйнування покриттів під час абразивного зношування за підвищених температур: *a* – зародження мікротріщини (1); *b* – мікротріщина (1), фрагментовані (2) і зрізані абразивом (3) ламелі.

Fig. 6. The fracture behaviour of coatings during abrasive wear at elevated temperatures:
a – the microcrack initiation (1); microcrack (1), fragmented (2)
 and cutted by abrasive (3) lamellae.

Радіальні тріщини, які утворюються у покритті під дією абразиву, орієнтуються перпендикулярно до його поверхні, а поперечні – в основному паралельно. Радіальні тріщини знижують границю міцності, а поперечні ростуть у зоні пластичної деформації, виходять на поверхню і спричинюють руйнування покриттів та ламелей, твердість яких перевищує 800 HV. Під час напилення, нагріву та охолодження гомогенних покриттів у їхній структурі утворюються мікротріщини, які

ініціюють їх руйнування (рис. 6a). Під дією абразиву мікротріщини починають рости з поверхні всередину. Руйнування відбувається шляхом сколювання ламелей, а пластичні ламелі зазнають мікрорізання частинками абразиву (рис. 6b).

За температури вище 500°C у покритті суттєво знижуються напруження розтягу і вони трансформуються у напруження стиску. Збільшується вміст міжламельярних оксидів, які заповнюють всі мікропустоти у структурі покриття, а також мікротріщини. Покриття стає композитним і утворена оксидна фаза нелегovanого гематиту (рис. 7a) зменшує, а легована алюмінієм та хромом (рис. 7b), перебуваючи у стиснутому стані, підвищує його зносотривкість (рис. 5).

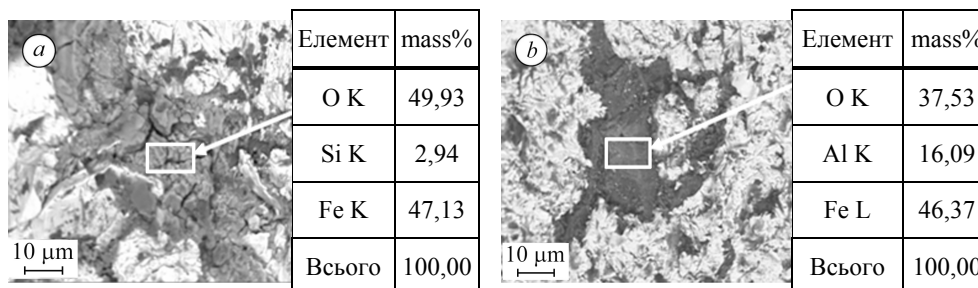


Рис. 7. Міжламельярні оксиди нелегovanого (a) та легovanого алюмінієм (b) гематиту.

Fig. 7. Interlamellar oxides of unalloyed (a) and alloyed with aluminum (b) hematite.

Високолегovanі покриття твердістю більше 1100 HV руйнуються внаслідок викришування складових без пластичної деформації. За високого вмісту в покриттях легувальних елементів, зокрема хрому 20...30%, міжламельярне окиснення за температури 600°C відбувається дуже слабо. Мікротріщини (рис. 6) не заповнюються продуктами газової корозії і напруження розтягу та опір абразивному зношуванню не зменшуються.

ВИСНОВКИ

Найвищу зносотривкість (у 3 рази більшу, ніж для еталона ШХ15) за умов зношування закріпленим абразивом має покриття, напилений із двох різнорідних дротів ПД (ФМІ-10). Вона зумовлена високою когезійною міцністю, низьким рівнем залишкових напружень та високою твердістю покриттів. За випроб незакріпленим абразивом найвищу зносотривкість має високолегovanий покриття з ПД EnDoTec DO*390N, у шихті якого є карбіди вольфраму, ванадію та ніобію. Газоабразивна зносотривкість покриттів за кімнатної температури є така ж, як для сталі 12X1MФ, або суттєво нижча. За підвищення температури понад 400°C вона зростає та стає більшою, ніж сталі 12X1MФ. Це зумовлено тим, що у покритті суттєво знижуються напруження розтягу і вони трансформуються у напруження стиску через збільшення вмісту міжламельярних оксидів, які заповнюють всі мікропустоти покриття. Він стає композитним і утворена оксидна фаза, легована алюмінієм та хромом, перебуваючи у стиснутому стані, підвищує його зносотривкість.

РЕЗЮМЕ. Исследовано структуру, абразивную и газоабразивную износостойкость электродуговых покрытий при комнатных и повышенных температурах отечественных и ведущих иностранных фирм TAFA, Praxair, EnDoTec DO, Castolin-EuTronic. Установлено, что износостойкость покрытия из двух разнородных проволок в два раза выше, чем стали ШХ15 при испытаниях закрепленным абразивом из-за повышенной когезивной прочности, низкого уровня остаточных напряжений и высокой твердости. Установлено, что при испытаниях незакрепленным абразивом высокую износостойкость имеет высоколегированное покрытие из порошковой проволоки марки EnDoTec DO*390N, что обусловлено наличием в шихте карбидов вольфрама, ванадия и ниобия. Выявлено, что при комнатной температуре газоабразивная износостойкость покрытий такая же, как и стали 12X1MФ, или

ниже. При увеличении температуры выше 400°C их износостойкость растет в результате формирования оксидов разного состава.

SUMMARY. The structure, abrasive and gasabrasive wear resistance of electric arc coatings from powder wires produced by domestic and leading foreign firms TAFA, Praxair, EnDoTec DO, Castolin-EuTronic at room temperature and elevated temperatures were studied. It has been established that the wear resistance of the coating sprayed from two heterogeneous wires is twice as large as for ШХ15 steel during test-fixed abrasive research. It is provided by the increased cohesive strength, low level of residual stresses and high hardness of coatings. It has been found that for researches with non-fixed abrasive the highest wear resistance has the high alloy coating from powdered wire EnDoTec DO*390N. It is provided by the presence of tungsten carbides, vanadium and niobium in the charge. It is established that at room temperature the gasabrasive wear resistance of coatings is the same as for 12Х1МФ steel or lower. As temperatures rise above 400°C their wear resistance increases due to the formation of oxides of various composition.

1. *Електродугові відновні та захисні покриття* / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. М. Довгунік, Г. В. Похмурська, І. Й. Сидорак. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2005. – 190 с.
2. *Оптимізація вмісту хрому в порошкових дротах систем Fe–Cr–C, Fe–Cr–B за корозійною тривкістю електродугових покривів* / Т. Р. Ступницький, М. М. Студент, В. М. Гвоздецький, Г. В. Похмурська // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2016. – 52, № 2. – С. 23–29.
(*Optimization of the chromium content of powder wires of Fe–Cr–C and Fe–Cr–B systems according to the corrosion resistance of electric-arc coating* / T. R. Stupnytskyi, M. M. Student, H. V. Pokhmurska, V. M. Hvozdet'skyi // Materials Science. – 2016. – 52, № 2. – P. 165–172.)
3. *Влияние режимов электродуговой металлизации и состава применяемых порошковых проволок на структуру и абразивную износостойкость покрытий* / В. И. Похмурский, М. М. Студент, И. А. Рябцев, И. И. Сидорак, Ю. В. Дзьоба, В. М. Довгунік, Б. Форманік // Автомат. сварка. – 2006. – № 7. – С. 31–36.
4. *Возникновение и перераспределение внутренних напряжений в электродуговых покрытиях во время формирования* / В. И. Похмурский, М. М. Студент, В. М. Довгунік, І. Й. Сидорак, Ю. В. Дзьоба, І. А. Рябцев // Автомат. сварка. – 2006. – № 10. – С. 15–20.
5. *Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures* / B. Wielage, H. Pokhmurska, M. Student, V. Gvozdeckii, T. Syupnyckyj, V. Pokhmurskii // Surface & Coatings Technology. – 2013. – № 220. – P. 27–35.
6. *Plasma electrolytic oxidation of arc-sprayed aluminum coatings* / V. Pokhmurskii, H. Nykforchyn, M. Student, M. Klapkiv, H. Pokhmurska, B. Wielage, T. Grund, A. Wank // J. of Thermal Spray Technology. – 2007. – 16, № 5–6. – P. 998–1004.
7. *Вплив виду шліфування на параметри шорсткості та трибологічні характеристики оксидокерамічних шарів* / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. В. Шмирко, В. М. Довгунік, М. Д. Клапків // Проблеми трибології. – 2014. – № 1. – С. 116–122.
8. *Високотемпературна корозія електродугових покривів з порошкових дротів на базі системи Fe–Cr–B–Al* / М. Студент, Ю. Дзьоба, В. Гвоздецький, Г. Похмурська, В. Вілаге, Т. Грунд // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2008. – 44, № 5. – С. 93–97.
(*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'skyi, H. Pokhmurska, B. Wielage, T. Grund // Materials Science. – 2008. – 44, № 5. – P. 693–699.)

Одержано 13.10.2017