

М. Студент

Ст. наук. співр., канд. техн. наук,  
Фізико-механічний інститут  
ім. Г. В. Карпенка Національної  
Академії Наук України,  
м. Львів

УДК 621.793.72:620.178.16

## ВПЛИВ БУДОВИ ЕЛЕКТРОДУГОВИХ ПОКРИВІВ З ПОРОШКОВИХ ДРОТІВ НА ЇХНІ ВЛАСТИВОСТІ

*Показано, що для електродугових покривів є характерним висока хімічна гетерогенність, яка викликана неповним сплавленням шихти та оболонки порошкового дроту під час його плавлення в процесі напилювання покривів. Запропоновано оцінювати хімічну гетерогенність за коефіцієнтом  $K_{ХІ}$ , який характеризує відхилення вмісту окремих компонентів в межах аналізованих ламелей від їх середнього вмісту у покриві. Показано що хімічна гетерогенність покривів з порошкових дротів суттєво впливає на їх абразивну зносостійкість та механічні властивості.*

**електродуговий покрив, порошковий дріт, хімічна гетерогенність, фазовий склад, адгезія, когезія, зношування покриву**

Електрометалізаційні покриви з порошкових дротів (ПД) широко використовують на залізничному транспорті, у суднобудуванні, сільському господарстві, енергетиці та газотранспортній системі для захисту від абразивного зношування за кімнатної та підвищеної температури та для відновлення деталей машин, що працюють за умов граничного тертя [1—4]. Для одержання електродугових покривів різного функціонального призначення для цих галузей і в Україні, і за її межами розроблено серію ПД. Склад шихтових матеріалів та повнота їх сплавлення з сталеву оболонку визначає властивості покривів одержаних з ПД. У цій статті наведено матеріали щодо впливу хімічної природи шихтових матеріалів, їхньої дисперсності та режимів напилювання на будову покривів та їх властивості.

**Методичні аспекти проведених досліджень.** Електродугові покриви наносили електрометалізатором ГТ-1 шляхом розпилення ПД діаметром 1,8 мм. У якості шихтових матеріалів використовували порошки ферохрому ФХ-800, алюмінію ПА-40 та ПАМ-40, ферохромбору ФХБ-2, феротитану ФТИ-40А, нікелю ПИК-1Л5, вольфраму та

феромолібдену ФМО-60 з розмірами частинок 40...300 мкм. Оболонку дроту товщиною 0,4 мм виготовляли зі стрічки шириною 10 мм зі сталі 08кп. Коефіцієнт заповнення дроту становив 22...27%. Режимом нанесення покривів: напруга дуги 32...33 В, струм дуги 150 А. Для розпилювання використали повітря під тиском 0,6 МПа за віддалі від дуги до зразка 100 мм.

На абразивне зношування за тертя нежорстко закріпленими абразивними частинками покриви випробували згідно ГОСТ 23.208-79 з використанням гумового диска під навантаженням  $P = 2,4$  Н та швидкості обертання 160 об/хв. Тривалість випробувань становила 30 хв. Перед цим абразив (пісок) фракціонували, відбираючи лише частинки завбільшки 200...1000 мкм, та просушували.

Для оцінювання схильності покривів до абразивного зношування за тертя жорстко закріпленими абразивом їх випробували з використанням абразивного диска з електрокорунду середньом'якої твердості СМ-2 на керамічній зв'язці 7К15 діаметром 150 та шириною 8 мм. Зернистість електрокорунду становила 250...315 мкм (25А, 25Н), лінійна швидкість тертя – 1 м/с, тривалість

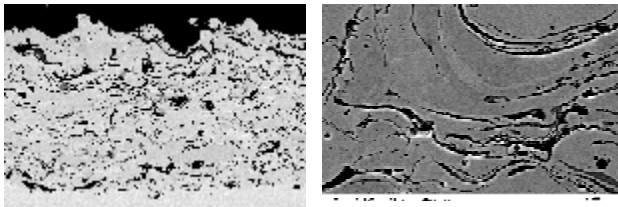


Рис. 1. Типова структура покриттів з ПД

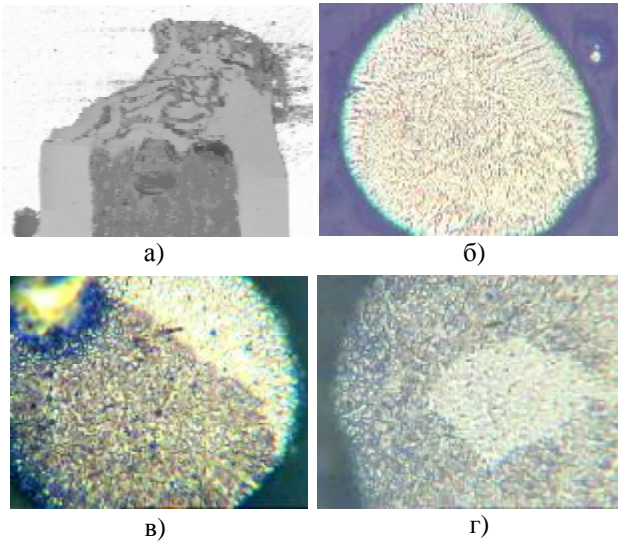


Рис. 2. Вигляд ПД (а) та краплин, одержаних шляхом розплавлення ПД у снігову мішень, (б — г) у поперечному перерізі

випробувань – 30 хв, навантаження в зоні лінійного контакту – 1,5 кг. Знос оцінювали з точністю до  $2 \cdot 10^{-4}$  г за втратою маси зразків з покриттями.

**Результати досліджень та їх обговорення.** Особливості будови покриттів з ПД. Покриття з ПД формуються зі сплюснених під час ударання об напиловану поверхню краплин розплаву ПД, закристалізованих у вигляді ламелей, які, як правило, з'єднані між собою через оксидні плівки різної товщини та природи (рис. 1). Подекуди між ламелями трапляються ділянки мікроприварів. Крім цього, особливістю структури електродугових покриттів є крупні ламелі оксидів та пори.

Під час електродугового напилювання два електродні ПД при їх плавленні в дузі не утворюють спільної ванни. Внаслідок швидкоплинності процесу плавлення ПД, шихта не встигає розчинитись у розплаві оболонки і тому розплав на торці дроту є гетерогенним (рис. 2 а). Зона розплаву ПД є невеликою за об'ємом і навіть на її вістрі, звідки краплина відривається, зберігається неоднорідність розплаву. З частини розплаву з вищим вмістом елементів легування або оксидних частинок утворюються крупніші краплини. Крім того, під час польоту краплин до поверхні напилювання з них інтенсивно вигоряє вуглець. Причому з дрібніших краплин це відбувається інтенсивніше, ніж з крупніших.

Як показує металографічний аналіз краплин, вилонених у снігову мішень з віддалі 150 мм від дуги, поряд з гомогенними, хоч і різними за хімічним складом краплинами (рис. 2 б), трапляються краплини, різні частини яких

відрізняються за хімічним складом (рис. 2 в-г). Це спричиняє хімічну (або концентраційну) гетерогенність покриттів. Для її оцінювання введено коефіцієнт хімічної гетерогенності  $K_{ХГ}$ , який визначали порівнянням інтегрального вмісту елементів легування  $c_{сеп}$  на ділянці площею  $10 \text{ мм}^2$  та їх локального вмісту  $c_i$  на прямокутних ділянках площею  $10^{-2} \text{ мм}^2$ , які сумірні за величиною з середньою площею ламелей у покриттях (рис. 3). Коефіцієнт  $K_{ХГ}$  визначали за формулою

$$K_{ХГ} = \sum_1^n \left[ \left| c_{сеп} - c_i \right| / n \right].$$

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  $c_{сеп}$  у покриттях. За коефіцієнтом  $K_{ХГ}$  можна судити про повноту сплавлення шихти й оболонки ПД. Якщо  $K_{ХГ}$  прямує до 0, то вони сплавляються повністю з утворенням гомогенного розплаву, який формує гомогенний покритив. Якщо ж  $K_{ХГ}$  прямує до 1, то шихта й оболонка не сплавляються, або сплавляються лише частково.

На величину  $K_{ХГ}$  впливає компонентний склад шихтових матеріалів і їхні розміри (рис. 4). Так, компоненти шихти ПД, температура плавлення яких істотно вища за температуру розплаву ПД ( $\sim 2000 \dots 2200^\circ\text{C}$ , [5]), підвищують  $K_{ХГ}$ , а ті компоненти, які утворюють між собою та сталлю оболонку евтектику, майже не змінюють його.

Загалом  $K_{ХГ}$  зменшується зі збільшенням розмірів частинок компонентів шихти на основі ФХБ (рис. 4б).

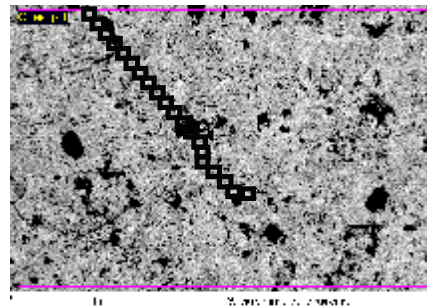


Рис. 3. Схема визначення вмісту елементів легування у матричній фазі покриття

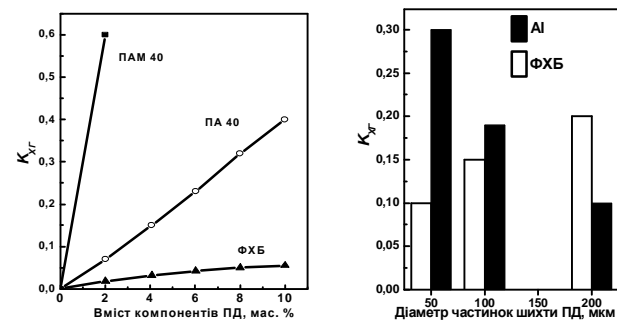


Рис. 4. Вплив вмісту компонентів (а) та діаметра частинок шихти ПД (б) на коефіцієнт хімічної гетерогенності  $K_{ХГ}$  покриттів з ПД (шихта ФХБ + Al + Mg)

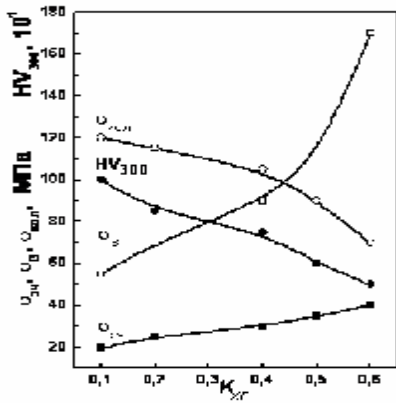


Рис. 5. Вплив коефіцієнта хімічної гетерогенності  $K_{XT}$  на механічні властивості напилених покривів з ПД (шихта ФХБ + Al + Mg)

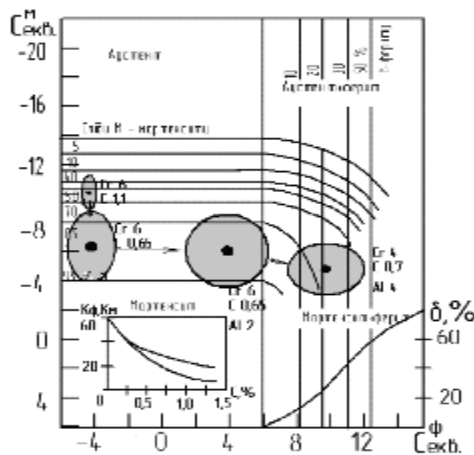


Рис. 6. Структурна діаграма, яка враховує вплив складу шихтових матеріалів на хімічну гетерогенність покривів, на якій  $C^{\Phi} \text{ екв} = [\% \text{Cr} - 1,5\% \text{Ni} + 2\% \text{Si} - 0,75\% \text{Mn} - K_{\Phi} (\% \text{C} + \% \text{N}) + \% \text{Mo} + 4\% \text{Al} + 4\% \text{Ti} + 1,5\% \text{V} + 0,5\% \text{W} + 0,9\% \text{Nb} - 0,6\% \text{Co} - 0,5\% \text{Cu}]$ , а  $C^{\text{м}} \text{ екв} = 29 - [\% \text{Cr} + 1,5\% \text{Ni} + 0,7\% \text{Si} + 0,75\% \text{Mn} + \text{KM} (\% \text{C} + \% \text{N}) + 0,6\% \text{Mo} + 1,5\% \text{V} + 1,1\% \text{W} + 0,2\% \text{Co} + 0,2\% \text{Cu} + 1,9\% \text{Ti} - 0,1\% \text{Al}]$

Водночас для алюмінію встановлено зворотну тенденцію. Це пов'язано з наявністю на частинках Al оксидних тугоплавких плівок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $T_{\text{пл}} = 2200 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Чим дрібніші частинки Al, тим більше оксидів, тим вищий  $K_{XT}$ . Гетерогенність визначає будову покривів. Наприклад, за додавання до складу шихти ПД порошок молібдену ( $T_{\text{пл}} = 2900 \text{ }^\circ\text{C}$ ) або вольфраму ( $T_{\text{пл}} = 3400 \text{ }^\circ\text{C}$ ) вони не встигають розчинитися у розплаві сталльної оболонки і тому з'являються у структурі покривів у вільному стані, посилюючи таким чином їх хімічну гетерогенність. Температура плавлення феросплавів на їх основі близька до  $T_{\text{пл}}$  ПД ( $1900 \text{ }^\circ\text{C}$ ), тому вони розчиняються в розплаві сталльної оболонки і, як результат, Mo і W з'являються в структурі покриву у твердому розчині. При цьому хімічна гетерогенність покривів зменшується.

Якщо розмір частинок феросплавів крупніший (200...300 мкм), то вони лише частково розчиняються у

розплаві ПД і лише частина Mo та W переходить у твердий розчин. Зі зменшенням розміру частинок феросплавів до 20...50 мкм вони повністю розчиняються у розплаві ПД і Mo та W повністю переходять у твердий розчин, а  $K_{XT}$  при цьому зменшується.

Зменшення розмірів частинок Al або його сплаву з Mg приводить до збільшення вмісту тугоплавких оксидів у шихті ПД ( $\text{MgO}$ :  $T_{\text{пл}} = 2900 \text{ }^\circ\text{C}$ ), що підвищує хімічну гетерогенність. Коли ж розміри частинок ПАМ зменшити до 40 мкм, то це може повністю заблокувати сплавлення шихти й оболонки.

Коефіцієнт  $K_{XT}$  істотно впливає на механічні властивості покривів. З його збільшенням напруження розтягу 1-го роду  $\sigma_{\text{кол}}$  та твердість  $\text{HV}_{300}$  зменшуються, а адгезія  $\sigma_{\text{зч}}$  та когезія  $\sigma_{\text{в}}$  зростають (рис. 5). Зі збільшенням  $K_{XT}$  погіршуються також корозійні характеристики покривів, причому і за кімнатної, і за підвищеної температури.

Хімічна гетерогенність покривів впливає також на їхній фазовий склад. Фазовий склад суцільних матеріалів визначається точкою на відомих структурних діаграмах [6]. Внаслідок гетерогенності покривів з ПД їхній фазовий склад визначається не точкою, а областю на структурній діаграмі (рис. 6), площа якої тим більша, чим більший  $K_{XT}$  (склад покриву наведено поблизу відповідної йому області на структурній діаграмі).

Під час визначення фазового складу покриву необхідно враховувати, що вуглець під час напилування частково вигоряє. Тому на базі експериментальних даних запропоновано емпіричні формули, що дозволяють визначити вміст вуглецю у покривах залежно від компонентного складу шихти ПД і режимів напилування. Також слід врахувати, що під час напилування частина компонентів шихтових матеріалів інтенсивно окислюється і не бере участі у формуванні твердого розчину матричної фази покриву. Наприклад Mg, введений до шихти ПД у вигляді сплаву з алюмінієм ПАМ-40, повністю переходить в оксидну фазу незалежно від режимів напилування. Титан і алюміній частково переходять в оксидну фазу, причому, чим більший тиск повітряного струменю, тим інтенсивніше Al та Ti перетворюються в оксиди і, як наслідок, менша їх кількість бере участь у формуванні твердого розчину матричної фази. Для визначення того, яка кількість Al та Ti переходить в оксидну фазу, а яка бере участь у формуванні твердого розчину матричної фази, запропоновано емпіричні формули (рис. 7), які одержані шляхом поелементного аналізу напилених покривів з використанням різних тисків розпилювального повітряного струменю.

Компоненти ПД	Вміст елементів у покриві, мас. %	
	У твердому розчині, мас. %	В оксидах, мас. %
C	$\% C_{\text{ТЛР}} = \% C_{\text{ПД}} (\% C_{\text{I}} 0,5 + \% C_{\text{II}} 0,8) \times \left(1 - \frac{L-50}{500}\right) \times \left(1 - \frac{U-28}{100}\right) \times \left(1 - \frac{P-4}{15}\right)$	
Mg	—	100
Al	$100 - 10 \left(1 + \frac{P-4}{2}\right)$	$10 \left(1 + \frac{P-4}{2}\right)$
Ti	$100 - 40 \left(1 + \frac{P-4}{7}\right)$	$40 \left(1 + \frac{P-4}{7}\right)$

Рис. 7. Емпіричні формули для визначення кількості елементів у твердому розчині та в оксидній фазі напиленого покриву

**Механічні властивості покривів з ПД.** Коєзивна міцність покривів залежить від таких чинників: товщини оксидної плівки між ламелями, залишкових напружень розтягу 1-го роду та коефіцієнта  $K_{ХТ}$  (рис. 8).

Найменшу товщину оксидної плівки забезпечує одночасна присутність у ПД вуглецю, алюмінію і титану. Під час утворення розплаву ПД і польоту краплин вуглець утворює навколо них захисну атмосферу, а алюміній і титан мінімізують окиснення.

З підвищенням вмісту бору (додавання ФХБ) та компонентів, які утворюють з бором евтектики (Ni),  $K_{ХТ}$  зменшується, що сприяє релаксації напружень розтягу шляхом розкриття тріщин і зменшує коєзію покривів. Додавання компонентів, які підвищують  $K_{ХТ}$  (наприклад дисперсного порошку Al або W), зменшує напруження розтягу через пластичну деформацію в'язких ламелей і коєзія зростає.

**Зносостійкість покривів.** Встановлено, що твердість, хімічна гетерогенність і товщина ламелей у покривах визначають їхню абразивну зносостійкість. Зі зростанням твердості покривів (за рахунок підвищення вмісту бору або вуглецю у шихті ПД) до  $700 \text{ HV}_{300}$ , їхня зносостійкість зростає, а понад  $700 \text{ HV}_{300}$  – зменшується (рис. 9). Підвищення твердості покриву спричиняє зростання напружень розтягу у ньому. За досягнення їх критичного рівня

**15 Зони утворення тріщин**

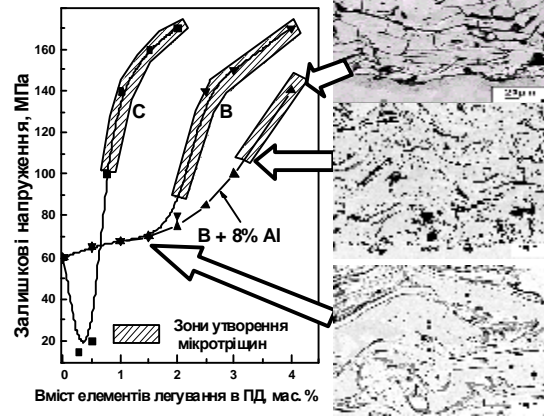


Рис. 10. Зміна залишкових напружень у покривах залежно від вмісту елементів легування в ПД та типові дефекти у структурі покривів

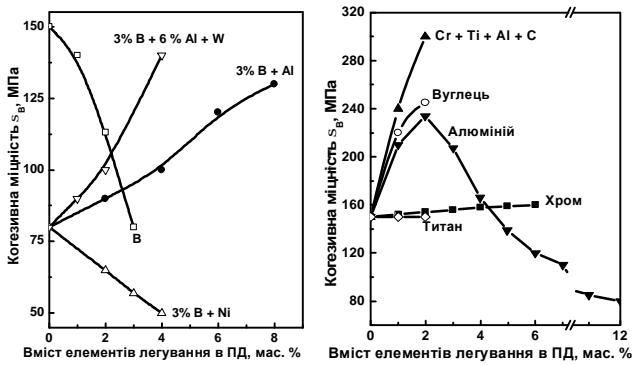


Рис. 8. Вплив вмісту елементів легування в ПД на коєзивну  $K_{ХТ}$  міцність покривів

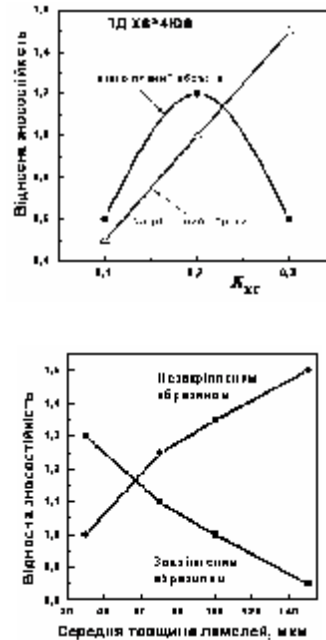


Рис. 11. Вплив товщини ламелей та хімічної гетерогенності покривів на їх абразивну зносостійкість за випроб закріпленням та незакріпленням абразивом

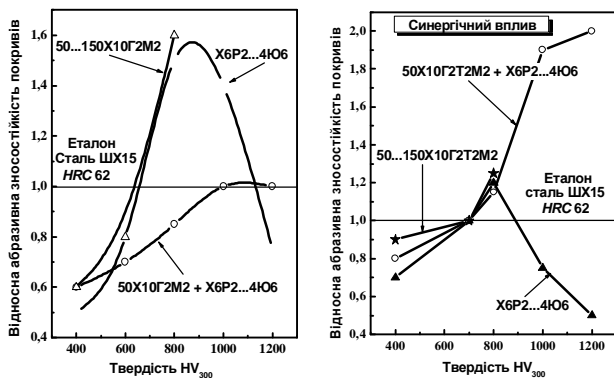


Рис. 9. Вплив твердості  $\text{HV}_{300}$  на відносну абразивну зносостійкість покривів під час тертя незакріпленням (а) і закріпленням (б) абразивом

(експериментально встановлено  $100 \dots 120 \text{ МПа}$ ) у покривах виникає мережа мікротріщин (рис. 10).

Зношування при цьому реалізується шляхом поширення тріщин та відколу ламелей. Встановлено, що механізм зношування закріпленням і незакріпленням абразивом — різний. Зношування закріпленням абразивом відбувається переважно по вершинах твердих ламелей. У цьому випадку необхідно формувати покриви з високою хімічною гетерогенністю, щоб забезпечити низькі напруження розтягу, та дисперсними ламелями (рис. 11).

Зношування незакріпленням абразивом відбувається переважно по ламелях з найменшою твердістю та міжламелярних межах. У цьому випадку необхідно засто-

совувати покриття з низькою хімічною гетерогенністю і максимальною товщиною ламелей. Це забезпечує мінімальну кількість меж між ламелями.

**Висновки.** 1. Розроблено метод оцінювання хімічної гетерогенності електродугових покриттів з ПД. Хімічну гетерогенність, яка визначається повнотою сплавлення шихти й оболонки ПД, запропоновано оцінювати за коефіцієнтом  $K_{\text{Х}}$ , який характеризує відхилення вмісту окремих компонентів у межах аналізованих ламелей від їх середнього вмісту у покритті.

2. Показано що хімічна гетерогенність покриттів з ПД істотно впливає на їхню зносостійкість і механічні властивості.

### Література

1. *Електродугові відновні та захисні покриття* / В. Похмурський, М. Студент, В. Довгунік, Г. Похмурська І. Сидорак. – Львів: ФМІ, 2005. – 192 с.

2. *Effect of friction on phase transitions in the surface layers of FeCrB + Al gas-thermal coatings* / M. Student, V. Dovhnyuk, I. Sydorak, H. Pokhmurs'ka, O. Yas'kiv // *Materials Science*. – 2000. – **36**, 4. – P. 607-611.

3. *Tribological properties of arc sprayed coatings obtained from FeCrB and FeCr-based powder wires* / H. Pokhmurska, V. Dovhnyuk, M. Student, E. Bielanska, E. Beltowska // *Surface and Coatings Technology*. – 2002. – 151-152. – P. 490-494.

4. *Зносотривкість електродугових покриттів за умов високотемпературного окиснення та абразивного зношування* / М. Студент, Ю. Дзьоба, І. Сидорак, та інші. // *Фіз.-хім. механіка матеріалів*. – 2006. – **2**, Спецвип. 5. – С. 712-717.

5. *Студент М.М.* Розробка захисних та відновних електрометалізаційних покриттів з використанням порошкових дрітків // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – 1998. – Львів. – 18 с.

6. *Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г.* Специальные стали. – М.: Металургия, 1985. – 320 с.

Отримана 14.02.10

*M. Student*

**Influence of structure of the electric arc sprayed coating from the flux cored wires on its properties**

*G. V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Lviv*

*It was shown that chemical heterogeneity is the peculiarity of the electric arc sprayed coating from the flux cored wires. It is caused by the incomplete fusion of the componentry of mix materials of flux cored wires with its shell during spraying of coatings. It was proposed to estimate the chemical heterogeneity of the coatings with using of offered ratio of the chemical heterogeneity. It characterize the deflection of the composition of certain alloying components in the middle of analyzed lamellas from its average composition in the clouding. It was shown that chemical heterogeneity of the electric arc sprayed coating from the flux cored wires essentially influences on its abrasive wear resistance and mechanical properties.*

21 01 01 2011

EUROMECH Colloquium 511

## BIOMECHANICS OF HUMAN MOTION. NEW FRONTIERS OF MULTIBODY, TECHNIQUES FOR CLINICAL APPLICATIONS

Azores, Portugal, March 9-12 2011

<http://www.dem.ist.utl.pt/euomech511>

### Colloquium Topics

- Biomechanical modelling
- Multibody formulations for biomechanics
- Finite element analysis in human motion
  - Kinematic and kinetic data acquisition
- Optimization in biomechanics of human motion
  - Musculoskeletal modelling
    - Stability analysis
    - Motor control
  - Contact mechanics in biomechanics
  - Human dynamics and rehabilitation

### Contact Us

For any information regarding the conference please send a message to the Secretariat:

Ms. Paula Jorge

IDMEC Instituto Superior Técnico

Av. Rovisco Pais 1, Portugal

Fax: +351 21 841 7915; e-mail: euomech511(at)dem.ist.utl.pt