

УДК 621.791

**М.М. Студент, проф., д-р техн. наук, В.М. Гвоздецький, канд. техн. наук**  
*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна*

**С.І. Маркович, канд. техн. наук**

*Кіровоградський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

*E-mail: sergey\_markovich@mail.ua*

## Вплив підвищеного тиску повітряного струменю на структуру і властивості електродугових покриттів

В статті наведено результати дослідження впливу тиску повітряного струменю на властивості покриттів. Встановлено, що збільшення тиску повітряного струменю від 0,6 до 1,2 МПа забезпечує зростання швидкості повітряного струменю від 300 до 600 м/с, а швидкість диспергованих краплин від 120 до 220 м/с. Підвищення тиску повітряного струменю від 0,6 до 1,2 МПа зумовлює зменшення товщини ламелей покриття, формування більшої кількості оксидної фази у покритті, при цьому зростає твердість, когезивна міцність та знижується рівень колових залишкових напружень першого роду у покритті.

**дугове покриття, високий тиск повітряного струменю, ламель, розмір оксидів**

**М.М. Студент, проф., д-р техн. наук, В.М. Гвоздецький, канд. техн. наук**

*Физико-механический институт им. Г.В. Карпенка НАН Украины, г. Львов, Украина*

**С.И. Маркович, канд. техн. наук**

*Кировоградский национальный технический университет, г. Кропивницкий, Украина*

**Влияние повышенного давления воздушной струи на структуру и свойства электродуговых покрытий**

В статье приведены результаты исследования влияния давления воздушной струи на свойства покрытий. Установлено, что увеличение давления воздушной струи от 0,6 до 1,2 МПа обеспечивает рост скорости воздушной струи от 300 до 600 м/с, а скорости диспергированных капель от 120 до 220 м/с. Повышение давления воздушной струи от 0,6 до 1,2 МПа предопределяет уменьшение толщины ламелей покрытия, формирование большего количества фазы окисла в покрытии, при этом растет твердость, когезионная прочность и снижается уровень окружных остаточных напряжений первого рода в покрытии.

**дуговое покрытие, высокое давление воздушной струи, ламель, размер окислов**

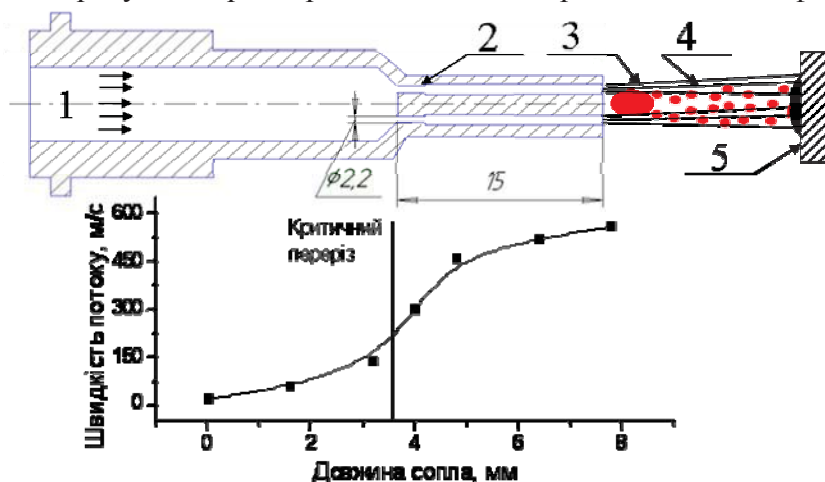
**Постановка проблеми та аналіз публікацій.** Серед газотермічних методів отримання покриттів електродугова металізація (ЕДМ) є технологічно найпростішим і найдешевшим методом. Використання останнім часом електродних матеріалів у вигляді спеціальних порошкових дротів (ПД) дало змогу розширити сферу застосування методу електродугової металізації та одержати нові відновні та захисні покриття різного функціонального призначення, з високими експлуатаційними характеристиками [1-3]. Проте, для електродугових покриттів характерною є висока пористість – 7-10 %, високий рівень залишкових напружень розтягу 60-70 МПа, низька когезія 80-90 МПа та адгезія – 8-10 МПа (порівняно із покриттями, нанесеними іншими газотермічними методами). Останнім часом у світовій практиці ведуться роботи по підвищенню фізико-механічних характеристик електродугових покриттів (метод ЕДП). Для цього в ряді робіт стиснуте повітря замінюють на суміш горючих газів із киснем [3, 4]. Такий метод, за рахунок підвищення швидкості розплавлених

краплин, що формують покриття, дозволяє суттєво підвищити механічні характеристики покриттів та зменшити пористість, однак при цьому значно ускладнюється конструкція обладнання, суттєво зростають енергетичні затрати та собівартість нанесення покриттів.

**Постановка завдання.** В даній роботі для підвищення механічних характеристик електродугових покриттів за рахунок підвищення тиску повітря, яке подається в систему розпилювання металізатора від 0,6 до 1,2 МПа.

**Методики експериментів.** Електродугові покриття товщиною 1 мм наносили металізатором ГТ-1 виробництва Фізико-механічного інституту НАН України. Для наплення покриттів використали електродні матеріали: дріт суцільного перерізу Св 08, та порошкові дроти марки 1 – 140X14; 2 – 140X14ФФ; 3 – 140X14Н2ТЮ; 4 – 140X16РЗТ2Н2; 5 – 140X16РЗ; 6 – Х6РЗЮ3Mg2. Покриття напилували за наступних режимів: напруга на дузі  $U = 32$  В, струм  $I = 120$  А, тиск повітря 0,6; 0,9 та 1,2 МПа за витрати повітря  $1,3$  м<sup>3</sup>/хв, віддаль від дуги до напилуваної поверхні у всіх випадках 120 мм. Перед напленням зразки піддавали абразивно-струменевій обробці корундом. Мікротвердість визначали на приладі ПМТ-3 за навантаження 200 г.

Для отримання надзвукової швидкості повітряного струменю числом Маха 2 використовували сопло Лавалю з вертикальним розміщенням двох повітряних каналів у соплі з критичним діаметром кожного отвору 2,2 мм. (рис. 1), довжиною надзвукової частини 15 мм. Розрахунок параметрів сопла Лавалю проводили згідно формул:



1 – повітряний потік, 2 – критичний переріз сопла, 3 – розплав з електродних матеріалів, 4 – металоповітряний потік, 5 – стальна підкладка з напленням покриттям

Рисунок 1 – Схема сопла для отримання надзвукового потоку

а) площа поперечного перерізу:  $f = G / (\rho_i \cdot w_i)$ ;

б) діаметр:  $d_i = ((4/\pi) \cdot f_i)^{0,5}$ ;

в) довжина сопла: 1) дозвукова частини  $l_1 = (d_i - d_{кр}) / (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2 / 2))$  2) надзвукова частина  $l_2 = (d_i - d_{кр}) / (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1 / 2))$  [5].

Віддаль від зрізу сопла до дуги 10 мм.

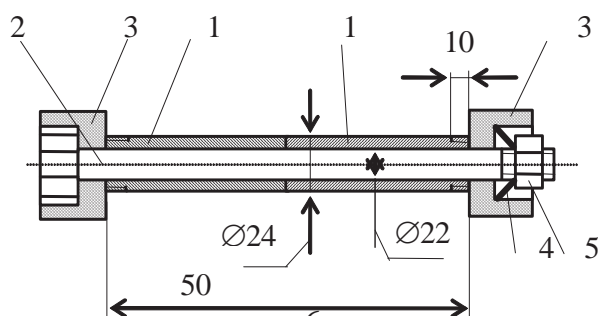
Швидкість повітряного потоку визначали за формулою  $w_i = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k-1} \cdot R \cdot (T_0 - T_i)}$  [5], де  $w_i$  – швидкість повітряного потоку у соплі;  $k$  – показник адіабати,  $k = C_p / C_v$ ;

$R$  – постійна газова повітря;  $T_o$  та  $T_i$  – температура повітряного потоку у дозвуковій та надзвуковій частинах сопла. Швидкість диспергованих повітряним струменем краплин визначали експериментально з використанням двох обертових дисків [6].

З метою визначення температури напилюваної поверхні під час напилення за тиску 0,6 та 1,2 МПа, нанесення покриття виконували нерухомим металізатором протягом 30 с. на пластину товщиною 5 мм, на зворотній стороні якої фіксували термопару у отворі на глибині 4 мм. В процесі напилення покриття з електродного дроту масою 300 г, температура на поверхні деталі в плямі напилення змінюється за параболічним законом. За тиску повітря 0,6 МПа була зафіксована максимальна температура 450 °С, а за тиску 1,2 МПа – 600°С.

Когезивну міцність покриттів визначали на трубчатих зразках (рис. 2), що складаються із двох половинок загальною довжиною 100 мм. Половинки зразків з'єднували між собою болтом з гайкою. На поверхню зразків наносили покриття товщиною 1 мм. Після цього зразки звільняли від оправки і розтягували на розривній машині FPZ-10, фіксуючи зусилля в момент руйнування. Когезивну міцність визначали

за відомою формулою:  $\sigma = \frac{P}{S}$  де  $P$  – зафіксоване зусилля в моменту руйнування;  $S$  – площа напиленого покриття.



1 – поверхні зразків для напилення покриття; 2 – штифт; 3 – захисні шайби; 4 – пружина; 5 – гайка

Рисунок 2 – Схема зразків для нанесення покриття з метою визначення величини його когезивної міцності

Розрахунок напружень визначали за методикою, розробленою для біметалевих кілець (діаметром 60 мм, висотою 20 мм, товщиною 4 мм) з повздовжнім розрізом [7], у яких відношення радіусів центральної лінії до радіальної товщини кільця не менше 10. На зовнішню поверхню кілець наносили ЕДП товщиною 1 мм. Для визначення напружень враховували модулі пружності сталевого кільця-підкладки і напиленого шару, який становить 70 МПа [7]. Розходження крайок заміряли штангенциркулем ШЦ-I-125-0,05, ГОСТ 166-89.

**Виклад основного матеріалу.** Розрахунки швидкості повітряного струменю за вище приведеною формулою показали, що зростання тиску повітряного струменю від 0,6 до 1,2 МПа зумовлює підвищення швидкості повітряного потоку у 2 рази від 300 до 600 м/с (рис. 1). При цьому швидкість диспергованих повітряним струменем краплин при розпиленні електродних порошкових дротів зростає від 60 – 90 м/с до 160 - 220 м/с (рис. 3), а розмір зменшується.

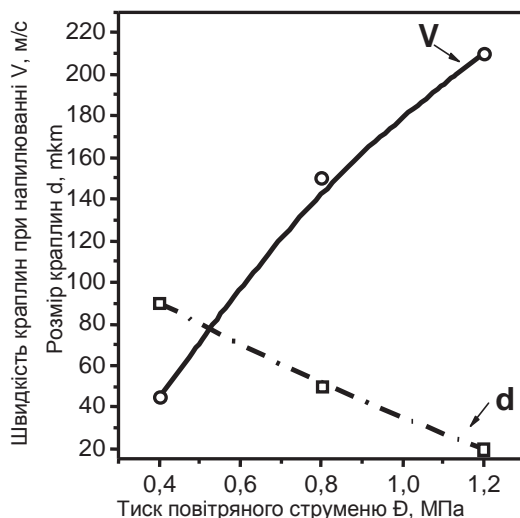


Рисунок 3 – Зміна швидкості краплини  $V$  та діаметру  $d$  краплин залежно від тиску повітряного струменю  $P$

Зменшення часу польоту диспергованих краплин від дуги до напилюваної поверхні забезпечує вищу їх температуру при вдарянні об напилювану поверхню.

Підвищення тиску повітряного струменю від 0,6 до 1,2 МПа сприяє інтенсивнішому диспергуванню розплаву з електродних дротів, що забезпечує зменшення розміру краплин, з яких формується покриття. За тиску повітря 0,6 МПа формуються краплини розміром від 30 до 100 мкм, (рис. 4, а), а за тиску повітря 1,2 МПа – 30...10 мкм і менше (рис. 4, б).

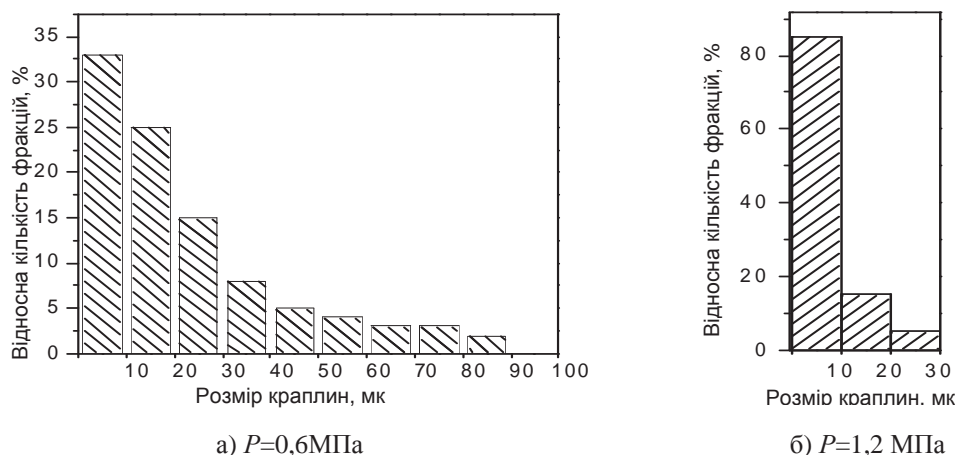
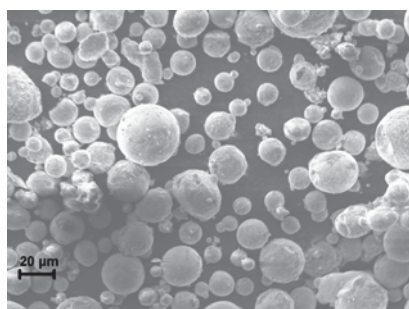


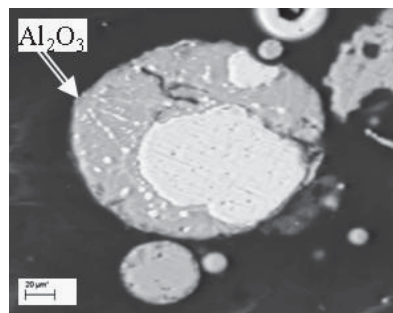
Рисунок 4 – Фракційний розподіл краплин із ПД Х6РЗЮ3Мg2

Металографічними дослідженнями підтверджено результати фракційного розподілу краплин, отриманих при напиленні за тиску 1,2 МПа (рис. 5, а).

На поверхні диспергованих краплин формуються оксидні плівки різного складу. Зменшення розмірів краплин забезпечує зростання площі їх контактної взаємодії з повітряним середовищем, як наслідок – часткове або повне їх окислення (рис. 5, б), що збільшує кількість оксидів і формування композиційної структури покриття (рис.б).

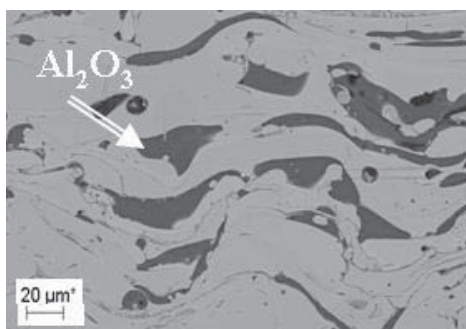


а) загальний вигляд краплин з поверхні

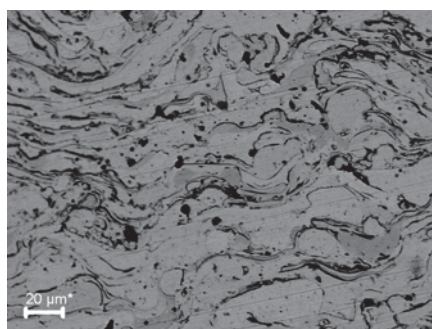


б) поперечний шліф напилених у снігову мішень краплин: повне та часткове окиснення краплини з поверхні

Рисунок 5 – Дисперговані краплин з металевого розплаву із ПД Х6РЗЮ3Mg2



а)

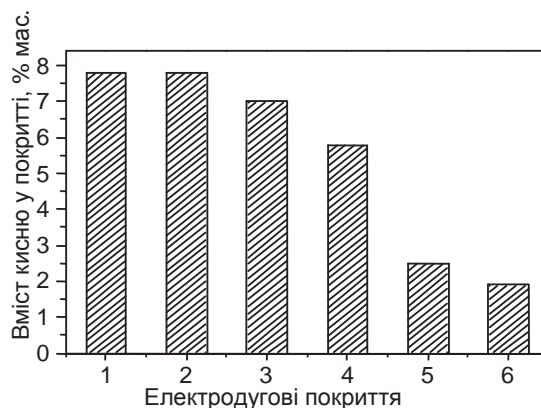


б)

Рисунок 6 – Розміщення оксидних плівок у структурі покриття із ПД140X14Н2ТЮ, P = 0.6 МПа (а) та P = 1.2 (б) МПа

За тиску розпилення 0,6 МПа кількість оксидної фази у структурі покриття із ПД140X14Н2ТЮ становить 15...20 % об., а за тиску –1,2 МПа вміст оксидів зростає у 1,3...1,5 рази та становить 20...30 % об. Як правило, оксидна фаза розташовується між ламелями покриття (рис. 6, а), хоча в деяких випадках формується оксидними ламелями із повністю окиснення краплин (рис. 6, б).

Аналіз одержаних експериментальних даних показує, що максимальний вміст оксидів у покритті спостерігається при додаванні у шихту ферофосфору, ферохрому та феротитану (рис. 7) і, при цьому, у покритті формуються переважно оксиди із Ті, Сг та Fe, або їх суміші.



1 – 140X14; 2 – 140X14ФФ; 3 – 140X14Н2ТЮ ; 4 – 140X16РЗТ2Н2; 5 – 140X16РЗ; 6 – Х6РЗЮ3Mg2

Рисунок 7 – Вплив компонентів шихти порошкових дротів на вміст кисню у покриттях з ПД



Додавання у шихту ПД таких елементів, як В, Al та Mg суттєво зменшує вміст оксидів у покритті, причому змінюється і їх хімічний склад, переважно утворюються оксиди Mg або Al за рахунок відновлення інших оксидів до металу.

Товщина міжламельних оксидних плівок у покритті за тиску розпилення 1,2 МПа становить 1...3 мкм (рис. 6, б), в той же час товщина оксидних плівок за тиску 0,6 МПа може досягати 20 мкм. (рис. 6, а). Мікротвердість оксидних включень заліза – магнетиту, вюститу та гематиту в покритті, напиленого з нелегованого сталюого дроту, знаходиться в межах 700-800 НВ. Це забезпечує мікротвердість покриття із нелегованого дроту Св 08 на рівні 200...300 НВ за тиску 0,6 МПа. Напилення цього ж покриття за тиску 1,2 МПа сприяє зменшенню розміру ламелей та оксидів, а об'ємний вміст їх зростає, що забезпечує підвищення мікротвердості до 320...450 НВ. У покриттях, напилених з порошкового дроту Х6РЗЮ6Mg2 за тиску 0,6 МПа та підвищеного тиску 1,2 МПа, мікротвердість зростає від 600...650 до 850...900 НВ відповідно. Це забезпечується підвищеним вмістом оксидів алюмінію (мікротвердість  $Al_2O_3$  становить 2000 НВ) та більш рівномірним розподілом боридів  $FeCrB_2$  у структурі покриття (рис. 8).

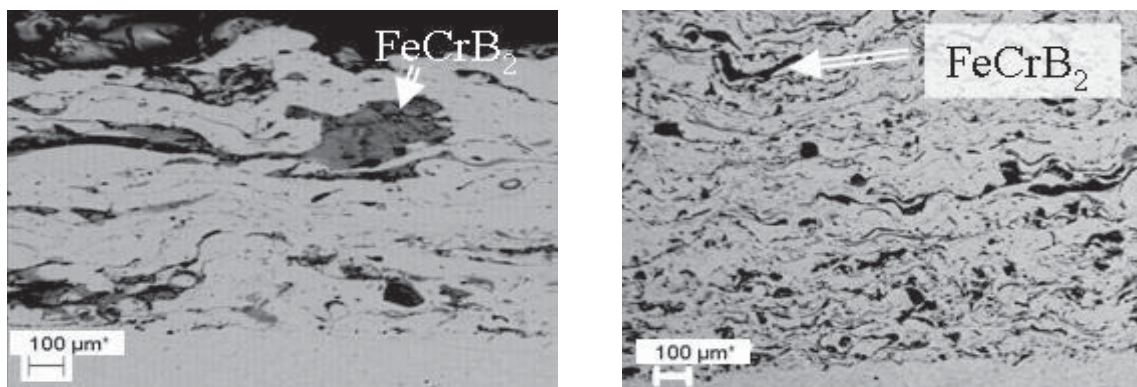


Рисунок 8 – Мікроструктура покриттів з ПД Х6РЗЮ3Mg2, P = 0.6 МПа (а) та P = 1.2 МПа (б)

На прикладі покриття з ПД 140Х14Н2ТЮ показано, що із підвищенням тиску повітряного струменю від 0,4 МПа до 1,2 МПа зменшується не тільки загальна пористість від 8,0 до 2,0 %, а також і геометричні розміри його пор від 30 до 3 мкм (табл.1).

Таблиця 1 – Вплив тиску повітряного струменю на пористість та розміри пор у покритті із ПД 140Х14Н2ТЮ.

Тиск повітряного струменю <i>P</i> , МПа	Відкрита об'ємна поруватість, %	Середня товщина пори, мкм
0,4	8,0	30
0,6	4,4	10
0,8	3,0	5
1.2	2,0	3

З'ясовано, що тиск повітряного струменю в значній мірі впливає на пористість покриття.

Із підвищенням тиску повітряного струменю від 0,6 до 1,2 МПа зменшується рівень залишкових напружень розтягу першого роду (рис. 9). Внаслідок міцнішого зв'язку між ламелями та формування тонких оксидних плівок великої довжини, як армуючої складової покриття, когезивна міцність покриття, напиленого з ПД за тиску 1,2 МПа, зростає у 2 рази.

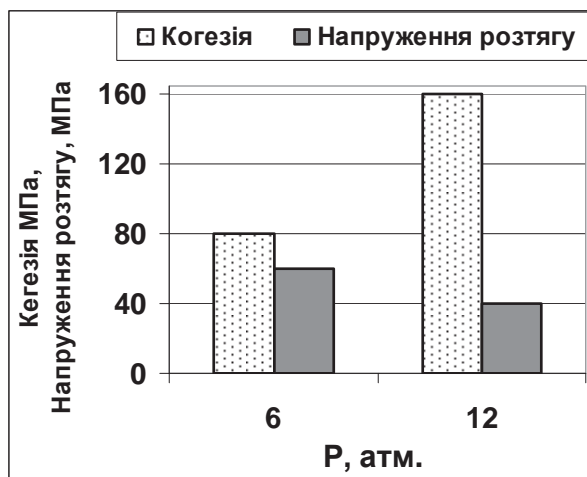


Рисунок 9 – Когезивна міцність та залишкові напруження розтягу покриття з порошкового дроту Х6Р3Ю3Mg2

**Висновки.** Встановлено, що збільшення тиску повітряного струменю від 0,6 до 1,2 МПа забезпечує зростання швидкості повітряного струменю від 300 до 600 м/с, а швидкість диспергованих краплин від 120 до 220 м/с.

Підвищення тиску повітряного струменю від 0,6 до 1,2 МПа зумовлює зменшення товщини ламелей покриття, формування більшої кількості оксидної фази у покритті, при цьому зростає твердість, когезивна міцність та знижується рівень колових залишкових напружень першого роду у покритті.

## Список літератури

1. Wielage B. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures [Text] / Wielage B., Pokhmurska H., Student M., Gvozdeckii V., Stupnytskyi, Pokhmurskii V. // Surface and coating technology. – 2013. – №220. – P. 27-35.
2. Pokhmurskyi V. I. Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures [Text] / Pokhmurskyi V. I., Student M.M., Pokhmurska H.V., Student O.Z., Hvozdecky V.M., Stupnytskyi T.R. // Journal of Thermal Spray Technology. – 2013. – Vol:22.
3. Effect of high-temperature corrosion on the gas-abrasive resistance of electric-arc coatings [Text] / M.M. Student, H. V. Pokhmurs'ka, V.M. Hvozdet's'kyi, M.Ya. Holovchuk, M.S. Romaniv // Materials Science. – 2009. – 45, N 4. – P. 481-489.
4. High-temperature corrosion of electric-arc coatings sprayed from powder core wires based on the Fe–Cr–B–Al system [Text] / M. Student, Yu. Dzioba, V. Hvozdet's'kyi, H. Pokhmurska, B. Wielage, T. Grund // Materials Science. – 2008. – 44, 5. – P. 693-699.
5. Ванєєв С.М. Методичні вказівки до індивідуальних занять та виконання індивідуальної роботи «Розрахунок сопла Лавалю» з курсів «Спецрозділи теплофізики» та "Розширювальні і компресорні турбомашини для газової та нафтової промисловості" [Текст] / С.М. Ванєєв. – Суми: Вид-во СумДУ, 2009. – 22с.
6. Баргенов С.С. Детонационные покрытия в машинностроении [Текст] / С.С. Баргенов, Ю.П. Федько, А.И. Григоров. – Л.: Машиностроение, 1952. – 215с.
7. Бабичев М. А. Методы определения внутренних напряжений в деталях машин [Текст] / М. А. Бабичев. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 132 с.

**Muhajlo Student, Prof., DSc., Volodumir Hvozdetskyi, PhD tech. sci**

*Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine*

**Sergey Markovich, Assoc. Prof., PhD tech. sci**

*Kirovohrad National Technical University, Kropyvnickiy, Ukraine*

**Influence of enhanceable pressure air a stream on a structure and properties electro- arc coverages**

The aim is to investigate the effect of increasing the airspeed of molten drops during spraying coating.

The article presents the results of research impact pressure air jet on the properties of coatings. It was established that increasing pressure air jet from 0.6 to 1.2 MPa, the growth speed air jet from 300 to 600 m / s, and shvydkisty dispersed droplets from 120 to 220 m / s.

Increasing pressure air jet from 0.6 to 1.2 MPa causes thinning lamella coatings, forming more oxide phase in the coating, thus increasing strength, cohesive strength, and reduced levels of residual stresses circular first kind

**arc coating, high pressure air nozzle Laval, lamella, size of oxides**

Одержано 09.11.16

**УДК 620.169.1**

**С.М. Анастасенко, канд. техн. наук, В.Л. Будуров, викл., І.О. Григурко, ст.викл.**

*Первомайський політехнічний інститут Національного університету*

*кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Первомайськ, Україна,*

*E-mail: ondi2008@rambler.ru*

## **Вплив режимів різання на збереження стійкості інструмента: проблеми та шляхи їх вирішення**

У статті визначено вплив чинників на стійкість інструмента. Досліджено наступні чинники: швидкість різання, подача, глибина різання, задній кут, головний кут в плані, допоміжний кут в плані, радіус при вершині, передній кут, змінні багатогранні пластини (ЗБП).

Встановлено і систематизовано причини зниження стійкості інструмента та запропоновано шляхи збереження стійкості інструмента.

**подача, глибина різання, задній кут, головний кут в плані, радіус при вершині, передній кут, швидкість різання, стійкість інструмента**

**С.Н. Анастасенко, канд. техн. наук, В.Л. Будуров, препод., І.А. Григурко, ст.препод.**

*Первомайський політехнічний інститут Національного університету кораблебудування ім. адм.*

*Макарова, г. Первомайск, Украина*

**Влияние режимов резания на сохранение стойкости инструмента: проблемы и пути их решения**

В статье определено влияние факторов на стойкость инструмента. Исследованы следующие факторы: скорость резания, подача, глубина резания, задний угол, главный угол в плане, вспомогательный угол в плане, радиус при вершине, передний угол, сменные многогранные пластины (СМП).

Установлено и систематизировано причины снижения стойкости инструмента и предложены пути сохранения стойкости инструмента.

**подача, глубина резания, задний угол, главный угол в плане, радиус при вершине, передний угол, скорость резания, стойкость инструмента**

---

© С.М. Анастасенко, В.Л. Будуров, І.О. Григурко, 2016