

УДК 621.793.7

В.М. ТОНКОНОГИЙ, д-р техн. наук,
А.С. СІНЬКОВСЬКИЙ, канд. техн. наук,
О.В. РИБАК, Одеса, Україна

ВРАХУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОРШКІВ НА ОСНОВІ TiC, ПЛАКОВАНОГО Ni(P), ПРИ РОЗРОБЦІ САПР ТП

У даній роботі проводиться дослідження покриттів, нанесених за допомогою плазмового напилювання. Покриття складаються з порошку карбиду титану, плакованого твердим розчином фосфору в нікелі. Докладно описано процес плакування та структуру одержаних покриттів. З метою визначення коефіцієнта тертя та величини зношування в умовах граничного та сухого тертя, плазмові покриття випробували на машині тертя СМЦ-2 по схемі ролик – колодочка. На основі експериментальних даних побудовані графіки залежності коефіцієнта тертя від величини пройденого шляху. Аналіз наведених графіків виявив закономірності взаємодії покриттів в процесі тертя. Випробування на зносостійкість показали, що найкращі показники мають покриття, що складаються з 65% TiC та 35% Ni(P). Покриття на основі TiC можна також наносити на ріжучий інструмент, відтак це перспективний напрямок подальших досліджень.

Ключові слова: плазмові покриття, композиційні порошки, плакування, триботехнічні властивості, зносостійкість.

В данной работе проводится исследование покрытий, нанесенных с помощью плазменного напыления. Покрытия состоят из порошка карбида титана, плакированного твердым раствором фосфора в никеле. Подробно описано процесс плакирования и структура полученных покрытий. С целью определения коэффициента трения и величины износа в условиях предельного и сухого трения, плазменные покрытия испытывали на машине трения СМЦ-2 по схеме ролик – колодочка. На основе экспериментальных данных построены графики зависимости коэффициента трения от величины пройденного пути. Анализ приведенных графиков выявил закономерности взаимодействия покрытий в процессе трения. Испытания на износостойкость показали, что наилучшие показатели имеют покрытия, которые состоят из 65% TiC и 35% Ni(P). Покрытия на основе TiC можно также наносить на режущий инструмент, таким образом, это перспективное направление дальнейших исследований.

Ключевые слова: плазменные покрытия, композиционные порошки, плакирование, триботехнические свойства, износостойкость.

In this article the research of coatings applied with plasma spraying is carried out. Coatings are composed of the powder of Titanium carbide plated with the solid solution of phosphorus in nickel. The plating process and the structure of the resulting coatings are described in detail. In order to define the coefficient of friction and the wear rate during the limit friction and dry friction, plasma coatings were tested on a friction machine СМЦ-2 after the roll-block pattern. On the basis of experimental data distance covered dependence plots for the coefficient of friction were built. Analysis of those plots has identified the general trend of interaction of coatings in the process of friction. Testing on the wear resistance has shown that the coatings composed of 65% TiC and 35% Ni(P) give the best result. Coatings based on TiC also can be applied on a cutting tool, so this is a promising direction for the future research.

Keywords: plasma coating, composite powder, plating, tribotechnical properties, wear resistance.

Вступ

При розробці систем автоматизованого проектування технологічних процесів (САПР ТП) в області створення та обробки напилених покриттів необхідно враховувати їхні триботехнічні властивості, міцність, твердість, зносостійкість, міцність зчеплення з основою та інші властивості, які впливають на ефективність прийняття рішень щодо використання того чи іншого матеріалу у певному технологічному процесі [1-6]. Велика кількість факторів, що впливають на результат, спонукали до детального вивчення вищенаведених властивостей конкретного виду матеріалів.

Метод хімічного нанесення металічних покриттів відомий давно, але через нестабільність перебігу хімічних реакцій він не набув широкого застосування у промисловості. Виділення металу під час протікання даного процесу часто відбувалося спонтанно, некеровано. Замість утворення покриттів на необхідній поверхні, метали виділялись з розчину їхніх солей миттєво, осідаючи на дні і стінках ємності. В результаті досліджень процесів хімічного плакування, проведених на кафедрі Технології конструкційних матеріалів та матеріалознавства Одеського національного політехнічного університету, було розроблено надійні стабілізатори ОП-1 та ОП-2 (витяжки з екстрактів компонентів рослинного походження), завдяки яким цей процес став технологічно надійним [7].

У роботі [8] наведені результати досліджень деяких характеристик порошків карбиду вольфраму WC, плакованих твердим розчином фосфору в нікелі Ni(P), і плазових покриттів на їхній основі. Однак, не зважаючи на позитивні результати, широкого використання в техніці вони не знайшли через дефіцит вольфраму, поклади якого в Україні відсутні. Тому для створення зносостійких плазових покриттів у даній роботі було використано карбід титану, а по рудних запасах титану Україна займає одне з перших місць у світі.

На порошки карбиду титану TiC доцільно наносити метали, які добре змочують їхню поверхню. Такими металами є, зокрема, нікель та кобальт. Згідно з існуючими даними [9, с.224-225], при температурі 1500°C кут змочування у нікелю дорівнює нуль, а у кобальта – 5 градусів. Тому в своїх дослідженнях ми зосередились на плакуванні TiC нікелем.

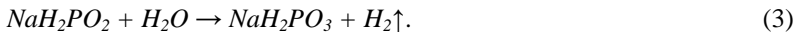
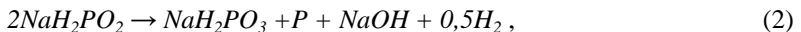
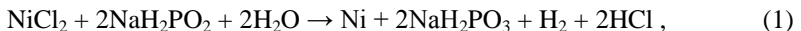
Забезпечення високого рівня продуктивності деталі з покриттям полягає не лише у досягненні високої якості поверхні, а й міцності зчеплення покриття з основою. Механічні властивості зразка з покриттям визначаються у тому числі і співвідношенням характеристик пластичності (міцності) матеріалів покриття і основи, а також адгезійною міцністю. [10] У більш міцних покриттів спостерігається відшаровування покриття від основи як одного цілого, у той час як більш пластичні покриття формують ненаскрізні тріщини, але зберігаються на підложці до високих ступенів деформації. Щоб оптимізувати процес експлуатації покриттів, слід визначити такі режими

їхньої обробки, які дозволяють забезпечити високу якість поверхні і не допустити відшаровування у подальшій роботі.

Мета даної роботи полягає у вивченні триботехнічних властивостей покриттів, одержаних за допомогою плазмового напилювання порошків на основі карбиду титану, плакованого Ni(P), випробуванні таких покриттів на зносостійкість і визначенні умов, за яких ріжучий інструмент із зазначеним покриттям може ефективно використовуватись у промисловості.

Дослідження

Оцінку кількості металу, що осіла на поверхню порошку, можна провести за кольором розчину. На початковій стадії процесу він голубий, але чим більше металу осідає, тим світлішає розчин. Після того, як метал із розчину осяде повністю, він стає зовсім прозорим. Відповідно до сучасних уявлень, сумарний процес хімічного нанесення нікелю включає наступні реакції:



Як впливає з наведених реакцій, під час хімічного плакування окрім нікелю, в незначній кількості осаджується також фосфор. Слід зазначити, що його наявність не має суттєвого впливу на механічні властивості плазмового покриття, але дещо зменшує коефіцієнт тертя одержаного матеріалу. Дослідження показали, що фосфор в покритті є корисним, якщо його вміст не перевищує 5%.

Процес плакування порошків включає наступні стадії:

1. Підготовка поверхні порошку карбиду титану.
2. Процес нанесення Ni(P).
3. Термічна обробка покритого порошку.

Підготовка поверхні порошку полягає в знежирюванні його спиртом $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, травленні порошку в розчині хлоридної кислоти, подальшому промиванні у воді, після чого його слід знову протравити в слабкому розчині хлоридної кислоти. Для плакування TiC слід використовувати ванну наступного складу: сульфат амонію $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, сульфат нікелю $(\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O})$ або хлорид нікелю $(\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$, ацетат натрію $(\text{CH}_3\text{COONa})$, в якості відновника – гіпофосфіт натрію $(\text{NaH}_2\text{PO}_2)$ та стабілізатор ОПІ. Кількісний склад солей ванни залежить від процентного співвідношення TiC – Ni(P). Процес плакування проводять до повного знебарвлення розчину.

Частинки порошку можуть мати різну форму: куба, шару, двох пірамід чи конусів, з'єднаних своїми основами, а також призми, циліндра,

паралелепіеда та інші. Кожний тип порошку можна привести до близької за формою до однієї з наведених геометричних фігур. Наприклад, якщо частинки мають форму, близьку до кулі, то за допомогою мікроскопа знаходимо їхній середній діаметр у фракції. Тоді, провівши відповідні розрахунки, можна визначити приблизну товщину покриття на кожній частинці.

Нехай потрібно одержати 100 г порошку наступного складу: 60% TiC і 40% Ni(P) вагових. В цьому випадку маса порошку TiC дорівнює 60 г. Тоді середню кількість його частинок можна визначити за формулою:

$$N = \frac{6 \cdot M_{TiC}}{\rho_{TiC} \cdot \pi d_0^3}, \quad (4)$$

де M_{TiC} – маса TiC, ρ_{TiC} – його густина, d_0 – середній діаметр у фракції. Маса осаду на кожній частинці становитиме:

$$m_{NiP} = \frac{M_{Ni(P)}}{N}. \quad (5)$$

Кінцевий діаметр частинки після нанесення покриття d_k буде:

$$d_k = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot M_{Ni(P)}}{\pi \cdot \rho_{Ni(P)}} + d_0^3} \quad (6)$$

Тоді товщина покриття становитиме:

$$\delta = \frac{d_k - d_0}{2}. \quad (7)$$

Зважаючи на малу кількість фосфору в покритті, можна допустити, що густина $\rho_{Ni(P)} = \rho_{Ni}$.

На швидкість хімічного нікелювання впливають температура розчину, співвідношення концентрацій гіпофосфіту натрію і сульфату нікелю, концентрація стабілізуючої добавки та водневий показник рН розчину. Знаючи швидкість нанесення Ni(P) на поверхню поршку ϑ (мкм/год), визначаємо кількість часу, необхідного для цієї операції:

$$\tau = \frac{\delta}{\vartheta}. \quad (8)$$

В наших експериментах вищенаведені параметри були наступними: співвідношення NaH_2PO_2 та $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ становило 0,83, температура розчину $t = 90 \dots 100^\circ\text{C}$, стабілізатор ОПІ – 5 мл/л, рівень рН = 5,0...5,5, швидкість нанесення покриття $\vartheta = 10 \dots 15$ мкм/год. Після плакування порошок промивається спочатку водою, а потім спиртом, і поміщається в сушильну шафу з температурою 200°C , де витримується протягом двох годин. Готовий

порошок просівається через сита, де визначається його фракція, а також сипучість і насипна вага.

Нанесення покриттів проводилось на плазмовій установці Київ-7 потужністю 100кВт на філії кафедри ТКМіМ "Плазмотехнології" Федюк. В якості плазмоутворюючого газу використовували суміш повітря і пропан-бутану [11]. Перспективна суміш повітря і МАФ не була застосована тому, що вона виділяє надмірну кількість тепла і значно підвищує температуру, а це призводить до перегріву Ni(P) і його підвищених втрат через випаровування. Режими напилювання були наступними: величина струму – 200А, напруга – 200В, відстань від перерізу сопла до поверхні деталі у межах 120 ... 140мм. Таким чином, при напилюванні використовувалась потужність вдвічі менша від тієї, що дозволяє установка.

Отримані покриття мають білий колір і не окислюються. На рис. 1 наведена мікроструктура покриття, де позначені карбіди TiC (світлі плями) і металічна складова, твердість якої $H_{50} = 10350\text{МПа}$. Така твердість значно вища за твердість чистого нікелю, що свідчить про наявність у складі покриття більш твердої структури, найімовірніше це хімічна сполука Ni_3P . В покритті також спостерігаються пори близько 12%. При терті вони грають роль масляних карманів, які зменшують величину тертя ковзання. На структуру нанесена мікрометрична сітка з ціною поділки 10мкм для оцінки розмірів карбідів.

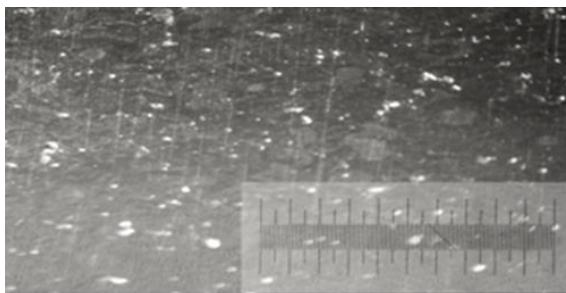


Рисунок 1 – Мікроструктура плазмового покриття TiC+Ni(P) після комп'ютерної обробки за допомогою програми FastStone Image Viewer 6.0

Для вивчення триботехнічних властивостей одержаних покриттів дослідження проводили на машині тертя СМЦ-2 по схемі ролик - колодочка, а в якості контртіла була сталь після загартовування та низького відпуску. Ролики з плазмовим покриттям насаджували на оправку і міцно затискали гайкою, встановлювали на круглошліфувальному верстаті та обробляли до шорсткості поверхні Rz 6.30. Діаметр ролика 5 см, площа контакту поверхонь тертя 15.7 см^2 . Випробування проводили з метою визначення коефіцієнта тертя та величини зношування в умовах граничного та сухого тертя.

Граничним вважається тертя між поверхнями, що труться при товщині мастильного шару менше 0,1 мкм. Для створення таких умов на поверхню ролика, який обертається, в момент входу його під колодочку подавалося одну краплю мастила за хвилину. Для порівняння, дослідження також проводили на зразках з покриттям WC +Ni(P) (карбід вольфраму, плакований твердим розчином фосфору в нікелі).

Результати та аналіз отриманих даних

За результатами експериментальних досліджень, у програмному пакеті MatLab було побудовано криві залежності коефіцієнта тертя від величини пройденого шляху. Для більш зручного аналізу дискретних даних, вони наведені у вигляді кусочно-поліноміальної апроксимуючої функції, представленої за допомогою кубічної сплайн-інтерполяції. Величину пройденого шляху визначали за діаметром ролика та кількістю його обертів. На рис. 2а і 2б зображено графіки результатів досліджень при граничному терті і тисках у 2МПа та 10МПа. Покриття, в залежності від номеру, мають наступний склад: 1) 65% TiC та 35% Ni(P); 2) 50% TiC та 50% Ni(P); 3) 35% TiC та 65% Ni(P); 4) 65% WC та 35% Ni(P); 5) 50%TiC та 50% Ni(P). Контртілом у всіх випадках були сталеві колодки і лише у випадку кривої 5, наведеної для порівняння, використали БрАЖМц 10–3–1,5.

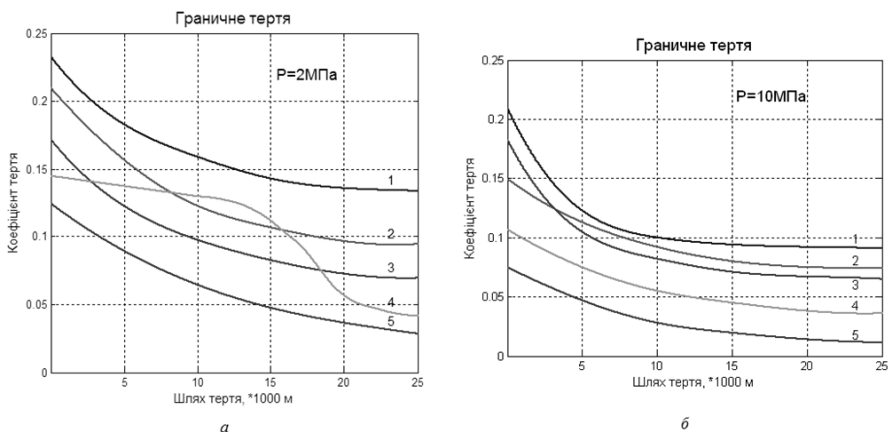


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта тертя від пройденого шляху при граничному терті і тиску 2 МПа (а) та 10 МПа (б)

З рис. 2а і 2б можна зробити висновок, що на характер залежності коефіцієнта тертя від шляху при граничному терті впливає хімічний склад плазмового покриття у процентному співвідношенні, величина тиску і природа контртіла. Для всіх композицій покриттів при збільшенні шляху

тертя коефіцієнт тертя зменшується незалежно від тиску і швидкості ролика, хоча у карбиду вольфраму при $P = 2\text{МПа}$ на початковій стадії ця залежність має свої особливості: крива спочатку майже не змінюється, а потім стрімко падає. Це можна пояснити поганим приробленням поверхні з цим покриттям.

Дещо інша залежність коефіцієнта тертя від пройденого шляху спостерігається для тих самих покриттів при сухому терті. Графіки цієї залежності представлені на рис. 3а і 3б. Зазначені номери кривих відповідають хімічному і кількісному складу покриттів з попереднього рисунку.

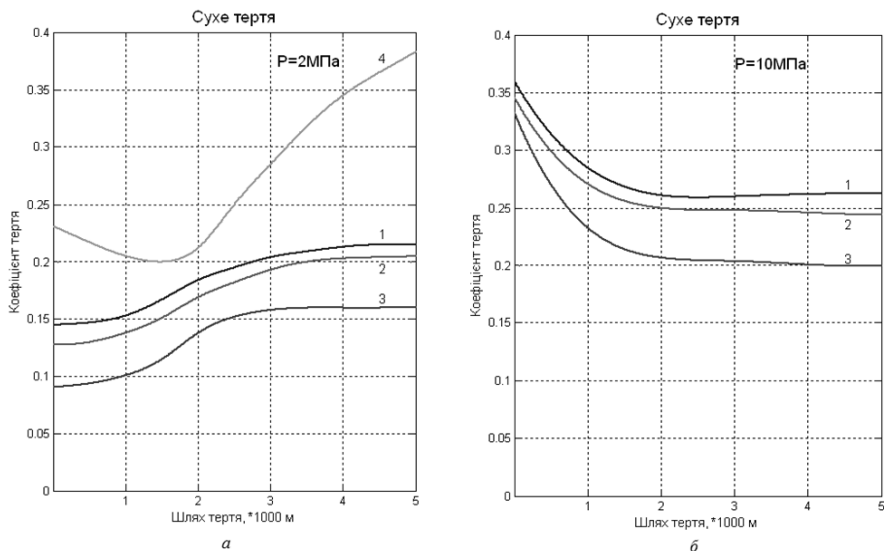


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта тертя від пройденого шляху при сухому терті і тиску 2 МПа (а) та 10 МПа (б)

Відсутність мастил призводить до нагрівання поверхонь, що труться, з'являються ділянки схоплювання, що, в свою чергу, призводить до збільшення коефіцієнта тертя до того моменту, коли процес стабілізується (рис.3а). Виняток становить крива під номером 4, побудована для покриття на основі WC, яка спочатку фіксує зниження коефіцієнта тертя, а потім різке його зростання. При тиску 10 МПа (рис. 3б) усі покриття, окрім композиції, що містить WC, хоча і мають високе значення коефіцієнту тертя, але підкоряються закономірностям його зниження і подальшої стабілізації. Щодо покриття на основі WC (композиція №4), значення його коефіцієнта тертя на рис.3б відсутні, тому що вже при тиску 6 МПа після пробігу в 3,8 км спостерігалось міцне схоплювання, і дослідження ми були змушені зупинити. Більш високий рівень протидії схоплюванню покриттів, у складі яких є TiC,

можна пояснити більш високою температурою плавлення цього карбіду у порівнянні з WC, і більш низьким коефіцієнтом тертя.

Випробування на зносостійкість (табл. 1) теж показали переваги покриттів на основі карбіду титану.

Таблиця 1 – Залежність величини зношування від тиску при граничному і сухому терті

№	Матеріал покриття	Характер тертя	Зношування (г)				
			Тиск на зразок, МПа (швидкість ковзання: 1,31 м/с)				
			2	4	6	8	10
1	65%TiC+35%Ni(P)	Граничне	0,0000	0,0000	0,0000	0,0012	0,0035
		Сухе	0,0002	0,0002	0,0082	0,0284	0,0495
2	50%TiC+50%Ni(P)	Граничне	0,0000	0,0000	0,0007	0,0025	0,0064
		Сухе	0,0005	0,0150	0,0300	0,0515	0,0784
3	35%TiC+65%Ni(P)	Граничне	0,0000	0,0009	0,0026	0,0047	0,0073
		Сухе	0,0081	0,0243	0,0420	0,0693	0,1055
4	65%WC+35%Ni(P)	Граничне	0,0000	0,0003	0,0011	0,0026	0,0052
		Сухе	0,0285	0,0521	0,0750	—	—

Зносостійкість вимірювали шляхом зважування роликів до і після випробувань, ретельно промивши їх у спирті і помістивши в сушильну шафу при температурі 80°C. Найкращі результати показали зразки, в покритті яких було 65% TiC. В умовах сухого тертя покриття, до складу яких входить карбід титану, за показниками зносостійкості значно перевищують аналогічні покриття на основі WC.

Покриття на основі TiC можна використовувати не лише в якості зносостійких матеріалів для нанесення на поверхні деталей, що труться. Їх можна також наносити на ріжучий інструмент. На рис.4а показано профіль різця з плазмовим покриттям, а на рис.4б – переріз напиленого шару, товщина якого, в середньому, становить 3мм.

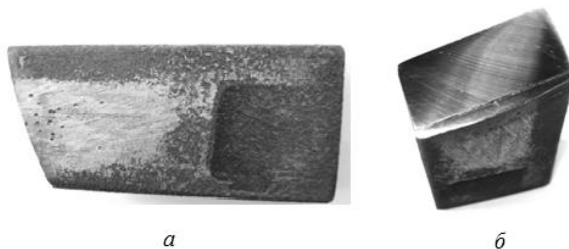


Рисунок 4 – Профіль різця з плазмовим покриттям TiC+Ni(P) (а) та переріз оправки різця з цим покриттям (б)

Висновки

За результатами експериментів, умови проведення яких викладені у рамках даної роботи, було проаналізовано триботехнічні характеристики покриттів з різним процентним співвідношенням TiC та Ni(P) та різною природою контртіла. Дослідження проводились при сухому та граничному терті і тисках у 2МПа та 10МПа. Для порівняння наводились результати покриттів на основі карбіду вольфраму, плакованого Ni(P). Знайдено пояснення поведінки побудованих графіків залежності коефіцієнта тертя від пройденого шляху, що виявило закономірності взаємодії покриттів в процесі тертя.

Переваги покриттів на основі карбіду титану показали також випробування на зносостійкість. Встановлено, що найкращу зносостійкість мають покриття, що складаються з 65% TiC і 35% Ni(P).

Плазмові покриття на основі TiC+Ni(P), нанесені на оправку різця, мають непогані ріжучі властивості. Вони можуть використовуватись при обробці алюмінію, магнію та їхніх сплавів, мідних сплавів, а також низьковуглецевих сталей і сірого чавуну. Збільшення в покритті процентного співвідношення TiC дозволить створити ріжучі інструменти, здатні обробляти середньовуглецеві сталі. Проте слід зазначити, що для цього потрібно перейти на режим надзвукового напилювання щоб збільшити міцність зчеплення покриття з основою. Отримані результати будуть використані при розробці САПР ТП нанесення та обробки покриттів.

Список використаних джерел: 1. *Петров С.В.* Плазма продуктів сгорания в инженерии поверхности / *С.В. Петров, А.Г. Сааков.* – Київ: Топас, 2000. – 220 с. 2. *Синьковський А.С.* Теорія та методи газотермічного напилювання: (навч. посіб.). – Одеса: Астропринт, 2014. – 206 с. 3. *Синьковський А.С.* Матеріали для напилення і наплавлення: конспект лекцій. – Одеса: Наука і техніка, 2008. – 126 с. 4. *Балдаев Л.Х.* Газотермическое напыление / [Л.Х. Балдаев, В.Н. Борисов и др.]; под ред. Л.Х. Балдаева. – М.: Маркет ДС, 2007. – 344 с. 5. *Борисов Ю. С.* Газотермические покрытия из порошковых материалов: справочник. / *Ю.С. Борисов, Ю. А. Харламов* и др. – Київ: Наукова думка, 1987. – 543с. 6. *Тонконогий В.М.* Моделирование прочности сцепления износостойких покрытий с подложкой с помощью виртуальных конечных элементов // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: ХПИ, 2004. – Вып. 66. – С. 191 – 196. 7. *Синьковський А. С.,* Износостойкие плазменные покрытия из композиционных порошков / *А.С. Синьковский, В.К. Толоч и ін.* // Защитные покрытия на металлах. Выпуск 10. – К: Наукова думка, 1976. 8. *Синьковський А.С., Рибак О.В.* Композиційні порошкові матеріали на основі карбіду вольфраму для газотермічного напилювання / Матеріали Міжнародної Інтернет-конференції «Молодь в технічних науках: дослідження, проблеми, перспективи (МТН-2016)». – Вінниця: ТОВ "Нілан-ЛТД", 2016. – с.179-181. 9. *Котельников Р.Б.* Особо тугоплавкие элементы и соединения (Справочник) / *Р.Б. Котельников, С.Н. Башлыков и ін.* – М.: Металлургия, 1966. – 372с. 10. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / [Балахонов Р.Р., Болеста А.В. и др.]; под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск, Сибирское отделение Российской академии наук, 2006. – 519 с. 11. Пат. 70854 А України, МКІ Е21В1/26. Спосіб одержання пульсуючого струменя ударної дії та пристрій для його реалізації / *Савченко Н.В., Яхно О.М.* / Заявл. 30.12.2003, Опубл. 15.10.2004. Бюл.№10. – 2 с.

Bibliography (transliterated): 1. *Petrov S.V.* Plazma produktov sgoranija v inzhenerii poverhnosti / *S.V. Petrov, A.G. Saakov*. – Kiiv: Topas, 2000. – 220 s. 2. *Sin'kovs'kij A.S.* Teorija ta metodi gazotermichnogo napiljuvannja: (navch. posib.). – Odesa: Astroprint, 2014. – 206 s. 3. *Sin'kovs'kij A.S.* Materiali dlja napilennja i naplavlennja: konspekt lekcij. – Odesa: Nauka i tehnika, 2008. – 126 c. 4. *Baldaev L.H.* Gazotermicheskoe napylenie / [*L.H. Baldaev, V.N. Borisov* i dr.]; pod red. *L.H. Baldaeva*. – M.: Market DS, 2007. – 344 s. 5. *Borisov Ju. S.* Gazotermicheskie pokrytija iz poroshkovyh materialov: spravocchnik./ *Ju.S. Borisov, Ju. A. Harlamov* i dr. – Kiiv: Naukova dumka, 1987. – 543s. 6. *Tonkonogij V.M.* Modelirovanie prochnosti sceplenija iznosostojkih pokrytij s podlozhkoj s pomoshh'ju virtual'nyh konechnyh jelementov // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah. – Har'kov: HPI, 2004. – Vyp. 66. – S. 191 – 196. 7. *Sin'kovs'kij A. S.*, Iznosostojkie plazmennye pokrytija iz kompozicionnyh poroshkov / *A.S. Sin'kovskij, V.K. Tolok* i in. // Zashhitnye pokrytija na metallah. Vypusk 10. – K: Naukova dumka, 1976. 8. *Sin'kovs'kij A.S., Ribak O.V.* Kompozicijni poroshkovi materialy na osnovi karbidu vol'framu dlja gazotermichnogo napiljuvannja / Materialy Mizhnarodnoi Internet-konferencii «Molod' v tehnicnih naukah: doslidzhennja, problemi, perspektivi (MTN-2016)». – Vinnicja: TOV "Nilan-LTD", 2016. – s.179-181. 9. *Kotel'nikov R.B.* Osobo tugoplavkie jelementy i soedinenija (Spravocchnik) / *R.B. Kotel'nikov, S.N. Bashlykov* i in. – M.: Metallurgija, 1966. – 372s. 10. Poverhnostnye sloi i vnutrennie granicy razdela v geterogennyh materialah / [*Balahonov R.R., Bolesta A.V. i dr.*]; pod red. *V.E. Panina*. – Novosibirsk, Sibirskoe otdelenie Rossijskoj akademii nauk, 2006. – 519 s.. 11. Pat. 70854 A Ukraini, MKI E21V1/26. Sposib oderzhannja pul'sujuchogo strumenja udarnoї diї ta pristirij dlja jogo realizacii / *Savchenko N.V., Jahno O.M.* / Zajavl. 30.12.2003, Opubl. 15.10.2004. Bjul.№10. – 2 s.