

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.248.058.7

В. О. ЗАБЛУДОВСЬКИЙ<sup>1</sup>, В. В. ДУДКІНА<sup>1\*</sup>, Е. П. ШТАПЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Фізика», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 23, +38 (056) 373 15 86, ел. пошта shtapenko@gambler.ru

<sup>1\*</sup>Каф. «Фізика», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 23, +38 (056) 373 15 86, ел. пошта dudkina2@ukr.net

### ВПЛИВ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА СТРУКТУРУ Й МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ НІКЕЛЕВИХ ПОКРИТТІВ

**Мета.** Дослідження впливу лазерного випромінювання на структуру й механічні властивості електроосаджених композиційних нікелевих покриттів, що містять ультрадисперсні алмази. **Методика.** Електроосадження плівок нікелю здійснювали зі стандартного розчину з додаванням ультрадисперсних алмазів (УДА) на лазерно-електролітичній установці, побудованій на базі газорозрядного CO<sub>2</sub>-лазера. Механічні випробування покриттів на зносостійкість виконувалися на машині із зворотно-поступальним рухом зразків в умовах сухого тертя об сталь. Спектральний мікроаналіз елементного складу границі розділу плівка–підкладка здійснювався на растровому електронному мікроскопі РЕММА-102-02. **Результати.** Дослідження нікелевих покриттів, модифікованих ультрадисперсними алмазами й електроосаджених в умовах зовнішньої стимуляції лазерним випромінюванням, показали залежність структури й механічних властивостей композиційних електролітичних покриттів, а також якісного й кількісного розподілу співосадженого наноалмазу від способу електроосадження. **Наукова новизна.** Встановлено вплив лазерного випромінювання на процес співосадження УДА, що підвищує мікротвердість і зносостійкість електролітичних нікелевих покриттів. **Практична значимість.** Лазерно-стимульоване електроосадження композиційних електролітичних нікелевих покриттів є ефективним методом локального підвищення зносостійкості металевих покриттів, що забезпечує довговічність збереження експлуатаційних (функціональних) властивостей поверхні.

**Ключові слова:** композиційні електролітичні покриття; ультрадисперсні алмази; лазерне випромінювання; структура; механічні властивості

#### Вступ

Існує безліч способів зміцнення поверхні з метою збільшення ресурсу роботи механізмів, деталей та пар тертя, зокрема хіміко-термічна обробка або різні методи нанесення покриттів. Один з відомих способів покращення механічних властивостей поверхні – її електролітична модифікація осадженням металевої плівки з необхідними експлуатаційними параметрами, найбільш важливими з яких є твердість та зносостійкість. Однак плівки металів і сплавів за

своїми фізико-хімічними властивостями часто не відповідають підвищеним вимогам сучасної техніки. Вирішити проблему зміцнення поверхні можливо за допомогою модифікації металевої матриці частинками дисперсної фази з отриманням композиційних електролітичних покриттів (КЕП). Відомо, що введення твердих дисперсних частинок (ультрадисперсних алмазів (УДА)) в електролітичні покриття підвищує їх мікротвердість і зносостійкість. Причини цього – зменшення розмірів кристалів осаджу-

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

ваного металу і наявність у покритті надтвердих частинок [1–3, 15].

Аналіз наукових праць [10, 12–16] показав, що методами впливу на процес співосадження металевих плівок з УДА є застосування в процесі електроосадження ультразвукового або механічного перемішування розчину електроліту. Внаслідок такої активації процесу електроосадження тверді дисперсні частинки, які мають масу і швидкість, що зумовлені перемішуванням розчину електроліту, у процесі співосадження забезпечують більшу кількість центрів кристалізації і дрібнозернисту структуру покриттів.

У цій статті розглядається лазерно-стимульований метод електроосадження (ЛСЕО) композиційних нікелевих електролітичних покриттів.

### Мета

Мета роботи полягала в дослідженні впливу лазерного випромінювання на структуру й механічні властивості електроосаджених композиційних нікелевих покриттів, що містять ультрадисперсні алмази.

### Методика

Для дослідження використовували стандартний сульфатний електроліт такого складу:  $\text{Ni}_2\text{SO}_4$  – 300 г/л,  $\text{H}_3\text{BO}_3$  – 30 г/л,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  – 50 г/л, рН – 5. Концентрацію ( $n$ ) УДА у водному розчині електроліту змінювали в діапазоні від 2 до 15 г/л. Електроосадження композиційних нікелевих покриттів виконували за потенціостатичного режиму (при постійному заданому значенні катодного потенціалу  $E = -1,06$  В) і зовнішнього впливу випромінювання газорозрядного  $\text{CO}_2$ -лазера, що генерує в безперервному режимі на довжині хвилі рівній 10,6 мкм при потужності 25 Вт. Для порівняння осадження покриттів також виконували за допомогою постійного струму густиною від 100 до 300 А/м<sup>2</sup>. Характерною властивістю водного розчину електроліту нікелювання є низька седиментаційна стійкість, що призводить до нерівномірного розподілу частинок наноалмазу в металевій матриці. Для вирішення цієї проблеми в процесі електроосадження покриттів за допомогою постійного струму було застосовано механічне перемішування водного розчину

електроліту. Металографічні дослідження виконували за допомогою оптичного мікроскопа МІМ-8М. Мікротвердість покриття вимірювали на мікротвердомірі ПМТ-3. Елементний склад поверхні покриття визначали мікрорентгеноспектральним аналізом за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕММА-102-02 з роздільною здатністю 5 нм. Вміст і розподіл ультрадисперсного алмазу визначали за лініями вуглецю (С) характеристичного рентгенівського випромінювання. Для дослідження фазового складу й структури плівок нікелю використовували рентгенівське обладнання – дифрактометр ДРОН-2.0 із застосуванням сцинтиляційної реєстрації рентгенівських променів. Зйомка на фазовий склад нікелевих плівок здійснювалася в монохроматизованому  $\text{Cu K}_\alpha$ -випромінюванні. Механічні випробування покриттів на зносостійкість виконувалися на машині із зворотно-поступальним рухом зразків при швидкості 0,32 м/с в умовах сухого тертя об сталь 45 за ДСТУ 1050-74 при навантаженні 177 г за ДСТУ 23.204-78.

### Результати

Дослідження зразків нікелевих покриттів, що містять алмази, показали залежність структури осадуваного покриття від складу електроліту й режиму електроосадження. Під час металографічних досліджень нікелевих покриттів з додаванням УДА, осаджених за допомогою постійного струму без перемішування водного розчину електроліту, спостерігається утворення розвиненого рельєфу із слідами поверхневих дефектів (пітингу) (рис. 1, а; 2, а).

Використання механічного перемішування водного розчину електроліту при незмінних режимах електроосадження й концентрації УДА дозволило отримати композиційні електролітичні нікелеві покриття з меншою кількістю поверхневих дефектів, для яких характерне утворення однорідної і рівномірної по всій поверхні зразка структури (рис. 1, б; 2, б).

При потенціостатичному лазерно-стимульованому режимі осадження композиційних нікелевих покриттів відбувається подрібнення зерен покриття, в області опромінення покриття має згладжену поверхню (рис. 3, а). При переході від зони опромінення до неопромінюваної області зразка шорсткість поверхні збільшується (рис. 3, б).

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

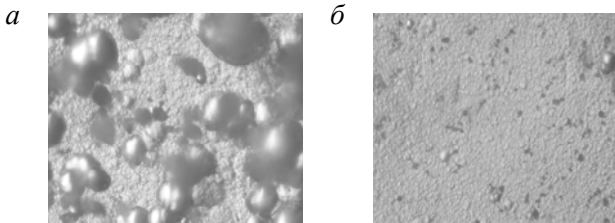


Рис. 1. Морфологія поверхні композиційних електролітичних нікелевих покриттів, осаджених при  $j = 100 \text{ А/м}^2$ ,  $n(\text{УДА}) = 2 \text{ г/л}$ :  
 а – без перемішування розчину;  
 б – з перемішуванням розчину ( $\times 900$ )

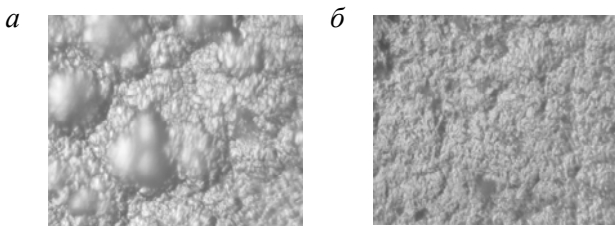


Рис. 2. Морфологія поверхні композиційних електролітичних нікелевих покриттів, осаджених при  $j = 300 \text{ А/м}^2$ ,  $n(\text{УДА}) = 15 \text{ г/л}$ :  
 а – без перемішування розчину;  
 б – з перемішуванням розчину ( $\times 900$ )

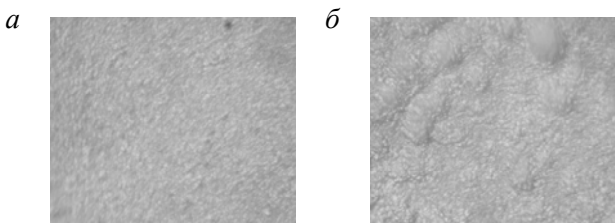


Рис. 3. Морфологія поверхні композиційних електролітичних нікелевих покриттів, осаджених при лазерно-стимульованому режимі,  $n(\text{УДА}) = 15 \text{ г/л}$ :  
 а – у зоні опромінювання;  
 б – поза зоною опромінювання ( $\times 900$ )

На рис. 4, а наведено дифрактограму порошку УДА, на якій наявні дифракційні максимуми алмазної фази вуглецю без домішок. Аналіз рентгенограм композиційних електролітичних нікелевих покриттів (рис. 4, б–д) свідчить про те, що дифракційні максимуми, які відповідають алмазній фазі вуглецю, накладаються на лінії, що відповідають кристалічній фазі електролітичного нікелю, а це ускладнює визначення співвідношення наноалмазу й нікелю в покритті і визначає необхідність досліджень елементного складу. У покриттях з чистого нікелю спостерігається переважна орієнтація кристалітів у напрямку (111) (рис. 4, б)

і формується аксіальна текстура росту із кристаліграфічними індексами [111]. Уведення УДА не привело до зміни фазового складу КЕП (рис. 4, в–д), але на дифрактограмах спостерігається перерозподіл інтенсивності ліній, що свідчить про формування в покриттях, електроосаджених з водного розчину електроліту за допомогою постійного струму, подвійної аксіальної текстури: [111] + [100] при  $n(\text{УДА}) = 2 \text{ г/л}$  (рис. 4, в) і [111] + [110] при  $n(\text{УДА}) = 15 \text{ г/л}$  (рис. 4, з). При потенціостатичному лазерно-стимульованому режимі електроосадження в плівках нікелю, що містять ультрадисперсні алмази, формується подвійна аксіальна текстура: [110] + [111] (рис. 4, д).

Металографічні дослідження композиційних нікелевих електролітичних покриттів з додаванням УДА показали, що за відсутності руху частинок УДА, який забезпечується перемішуванням розчину електроліту, структура покриття формується більш крупнокристалічною (рис. 5, а). У результаті перемішування водного розчину електроліту спостерігається зменшення розміру зерна (рис. 5, б), що пояснюється швидшим підведенням іонів до поверхні катода, внаслідок чого утворюється більша кількість центрів кристалізації. При лазерно-стимульованому потенціостатичному режимі електроосадження відбувається збільшення густини струму, значення якого при нормуванні на режим осадження при постійному струмі без лазерного випромінювання відповідає більш від'ємному значенню катодного потенціалу ( $E = -1,12 \text{ В}$ ). Крім того, згідно з роботами [4–9, 11] тверді дисперсні частинки, які перебувають у товщі рідини й мають порівняно з розчином електроліту більший показник заломлення та зміщені щодо світлового пучка, рухаються не тільки в напрямку променя, але також за напрямом до центру променя, де інтенсивність світла є максимальною. Звідси можна зробити висновок, що існує не тільки сила, спрямована вздовж променя, але й поперечна сила, яка спрямовує частинки до центру світлового променя, що пояснює збільшення швидкості зародкоутворення й формування більш дрібнокристалічної структури (рис. 5, в).

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

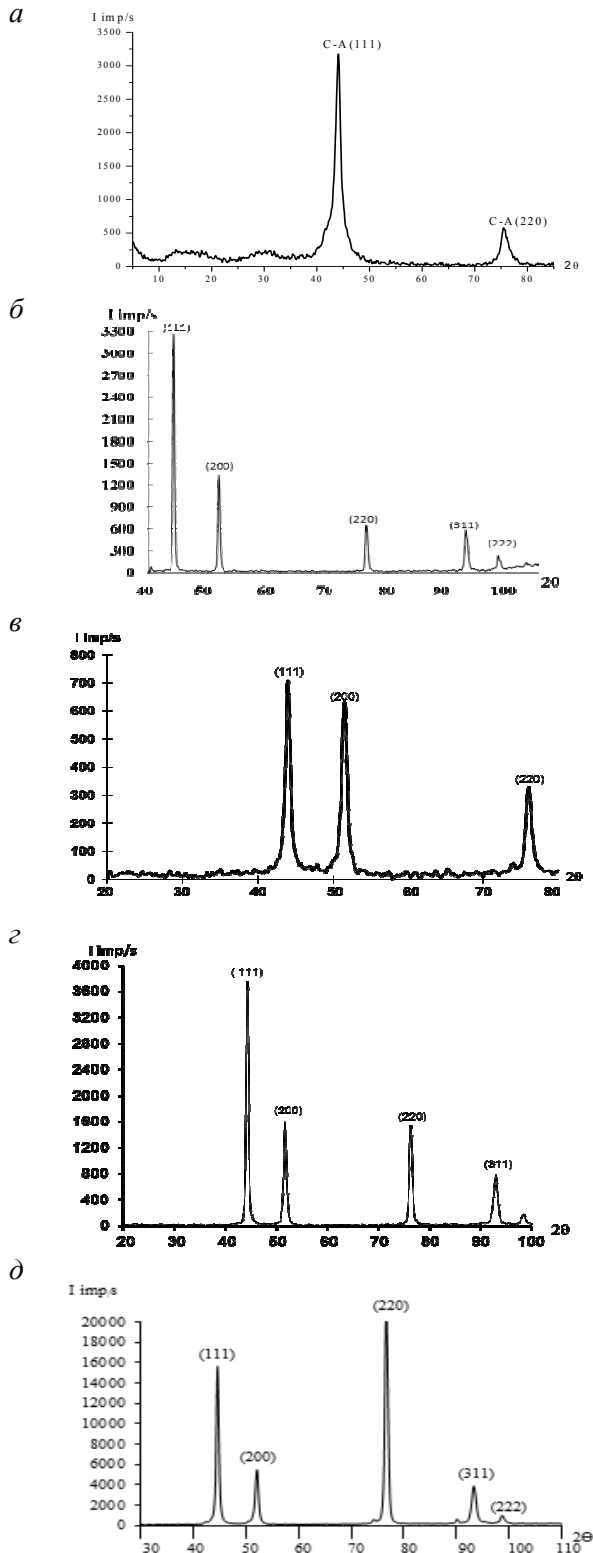
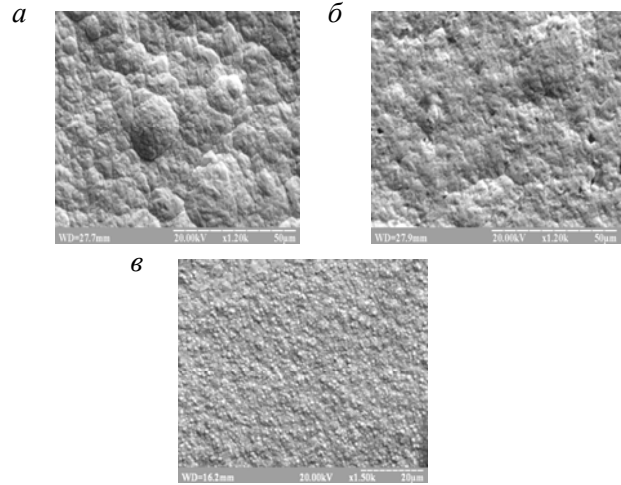


Рис. 4. Дифрактограми:

а – УДА; постійний струм:

б – Ni; в – Ni + УДА ( $n = 2$  г/л); г – Ni + УДА ( $n = 15$  г/л); лазерно-стимульований режим: д – Ni + УДА ( $n = 15$  г/л)Рис. 5. Композиційні електролітичні нікелеві покриття, осаджені: при постійному струмі ( $j = 300$  А/м<sup>2</sup>):

а –  $n(\text{УДА}) = 2$  г/л без перемішування водного розчину електроліту; б –  $n(\text{УДА}) = 15$  г/л з перемішуванням водного розчину електроліту; при лазерно-стимульованому режимі: в –  $\lambda = 10,6$  мкм,  $E = -1,06$  В,  $n(\text{УДА}) = 15$  г/л

Порівняння результатів мікрорентгеноспектрального аналізу зразків, отриманих за допомогою постійного струму без лазерного випромінювання (рис. 6, а, б), показали, що найбільший вміст вуглецю (наноалмазу) відмічений в зразках, електроосаджених при катодній густині струму  $300$  А/м<sup>2</sup> з додаванням УДА концентрацією  $15$  г/л із застосуванням механічного перемішування водного розчину електроліту в процесі електроосадження (рис. 6, б). У цих зразках також спостерігається більш однорідний по поверхні розподіл вуглецю, проте його кількісний вміст не перевищує  $0,14$  ат. %, але є окремі ділянки, які збагачені вуглецем до  $0,31$  ат. % (табл. 1). Мікрорентгеноспектральний аналіз елементного складу КЕП, отриманих при лазерно-стимульованому режимі електроосадження (рис. 6, в), показав локальне підвищення вмісту вуглецю (наноалмазу) в області поверхні півки, що відповідає зоні опромінювання, від  $0,14$  до  $0,84$  ат. % (див. табл. 1).

Збільшення концентрації у водному розчині електроліту частинок дисперсної фази і вмісту вуглецю в покритті відповідно, отриманому при лазерно-стимульованому режимі, приводить до формування дрібнокристалічних більш щільноупакованих покриттів, що визначило підвищення механічних характеристик КЕП.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

При формуванні нікелевих покриттів, які містять алмази, при катодній густині струму  $100 \text{ А/м}^2$  із збільшенням концентрації УДА у водному розчині електроліту від 2 до 15 г/л мікротвердість покриттів зростає від 1 800 до 2 200 МПа. Зростання густини струму від  $100$  до  $300 \text{ А/м}^2$  приводить до збільшення мікротвердості покриттів нікель–УДА від 2 200 до 2 700 МПа.

Таблиця 1

**Залежність елементного складу поверхні композиційних електролітичних нікелевих покриттів від режимів осадження і концентрації УДА у водному розчині електроліту ( $j = 300 \text{ А/м}^2$ )**

Режим осадження	Механічне перемішування	$n(\text{УДА}), \text{ г/л}$	Вміст, ат. %			
			Ni	C	Si	S
Пост. струм	–	2	99,55	0,10	0,35	–
	+	15	99,48	0,14	0,378	–
			98,08*	0,31*	0,79*	0,82*
ЛСЕО	–	–	79,68	0,84	18,98	0,70

\* Ділянки, збагачені вуглецем.

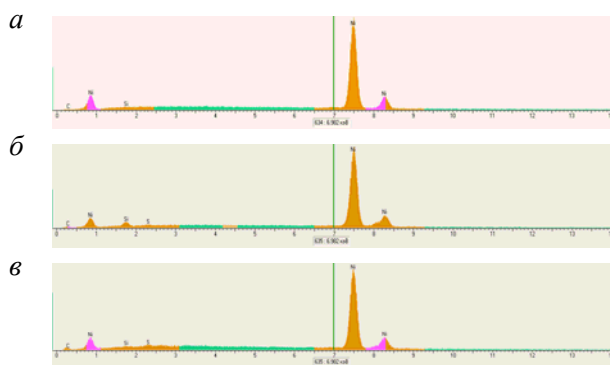


Рис. 6. Мікрорентгеноспектральний аналіз композиційних електролітичних нікелевих покриттів, осаджених: при постійному струмі ( $j = 300 \text{ А/м}^2$ ) а –  $n(\text{УДА}) = 2 \text{ г/л}$  без перемішування водного розчину електроліту; б –  $n(\text{УДА}) = 15 \text{ г/л}$  з перемішуванням водного розчину електроліту; при лазерно-стимульованому режимі: в –  $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ ,  $E = -1,06 \text{ В}$ ,  $n(\text{УДА}) = 15 \text{ г/л}$

Необхідно зауважити, що в результаті більш однорідного розподілу вуглецю по поверхні зразків, електроосаджених при катодній густині струму  $300 \text{ А/м}^2$  з додаванням УДА концентрацією  $15 \text{ г/л}$  із застосуванням механічного перемішування водного розчину електроліту в процесі електроосадження, приводить до більш постійного по поверхні зразків значення мікротвердості покриття, про що свідчать результати залежності мікротвердості при скануванні поверхні композиційних нікелевих електролітичних покриттів з кроком  $2 \text{ мм}$  (рис. 7, крива 2). При лазерно-стимульованому режимі електроосадження спостерігається локальне підвищення мікротвердості плівок нікелю (рис. 7, крива 1), що пояснюється збільшенням вмісту наноалмазу в покритті (табл. 1).

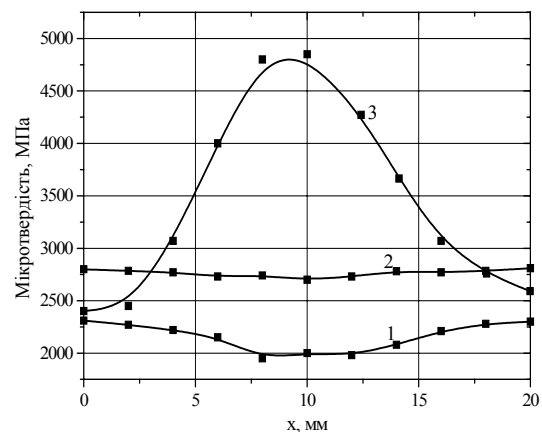


Рис. 7. Залежності мікротвердості композиційних нікелевих електролітичних покриттів, осаджених: при постійному струмі  $j = 300 \text{ А/м}^2$ ,  $n(\text{УДА}) = 15 \text{ г/л}$ : 1 – без перемішування розчину; 2 – з перемішуванням розчину; при лазерно-стимульованому режимі: 3 –  $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$ ,  $E = -1,06 \text{ В}$ ,  $n(\text{УДА}) = 15 \text{ г/л}$

Збільшення вмісту УДА в плівках нікелю сприяє підвищенню зносостійкості покриттів (табл. 2). Покриття нікелю, електроосаджені зі стандартного сульфатного електроліту без додавання УДА, за 5 годин зносу на машині зі зворотно-поступальним рухом зразків в умовах сухого тертя об сталь 45 за ДСТУ 1050-74 при навантаженні  $177 \text{ г}$  втрачає  $10 \%$  своєї маси, при додаванні в розчин електроліту УДА концентрацією  $2 \text{ г/л}$  –  $6 \dots 8 \%$ , концентрацією  $15 \text{ г/л}$  –  $3 \dots 5 \%$ , а покриття, отримані при ЛСЕО, –  $1 \dots 2 \%$ .

Таблиця 2

**Залежність зносу поверхні композиційних електродіодних нікелевих покриттів від режимів осадження і концентрації УДА у водному розчині електроліту при навантаженні 177 г**

	Режим осадження			Серед. знос, мг/год
	$j$ , А/м <sup>2</sup>	Механічне перемішування	$n$ (УДА), г/л	
Пост. струм	300	–	2	1,8
	300	+	15	1,0
ЛСЕО	300–700	–		0,4

Таким чином, дослідження нікелевих покриттів, модифікованих ультрадисперсними алмазами, показали залежність структури й механічних властивостей КЕП, а також якісного й кількісного розподілу співосажденного наноалмазу від способу електроосадження.

#### Наукова новизна та практична значимість

Встановлено вплив лазерного випромінювання на процес співосадження УДА, що підвищує мікротвердість і зносостійкість електродіодних нікелевих покриттів.

Лазерно-стимульоване електроосадження композиційних електродіодних нікелевих покриттів є ефективним методом локального підвищення зносостійкості металевих покриттів, що забезпечує довговічність збереження експлуатаційних (функціональних) властивостей поверхні.

#### Висновки

Згідно з результатами мікрорентген-спектрального аналізу та досліджень механічних властивостей композиційних електродіодних нікелевих покриттів застосування лазерного випромінювання в процесі електроосадження забезпечує суттєве підвищення експлуатаційних (функціональних) властивостей поверхні. Так, введення УДА в розчин електроліту при лазерно-стимульованому режимі електроосадження привело до отримання покриттів з більшою концентрацією УДА у 2,7 разу. Збільшення вмісту вуглецю (наноалмазу) в по-

критті, отриманому при лазерно-стимульованому режимі, привело до формування дрібнокристалічних більш щільноупакованих покриттів, що визначило підвищення механічних характеристик КЕП: мікротвердість зросла у 1,7 разу, знос зменшився у 1,6 разу.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Буркат, Г. К. Ультрадисперсные алмазы в гальванотехнике / Г. К. Буркат, В. Ю. Долматов // Физика твердого тела. – 2004. – № 4. – С. 685–692.
2. Долматов, В. Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза как основа нового класса композиционных металл-алмазных гальванических покрытий / В. Ю. Долматов, Г. К. Буркат // Сверхтвердые материалы. – 2000. – № 1. – С. 84–95.
3. Долматов, В. Ю. Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза / В. Ю. Долматов. – СПб : Изд-во СПбГПУ, 2003. – 344 с.
4. Дудкина, В. В. Адгезионная прочность никелевых и цинковых покрытий с медной основой, электроосажденных в условиях внешней стимуляции лазерным излучением / В. В. Дудкина // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту ім. акад. В. Лазаряна. – 2013. – № 2 (44). – С. 83–90.
5. Дудкина, В. В. Локальное лазерно-стимулированное электроосаждение никеля / В. В. Дудкина, В. А. Заблудовский // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2010. – Вип. 31. – С. 262–265.
6. Дудкіна, В. В. Вплив лазерного випромінювання на процес електроосадження плівок нікелю / В. В. Дудкіна, В. О. Заблудовський, Е. П. Штапенко // Фізика і хімія твердого тіла. – 2011. – № 2. – С. 332–336.
7. Заблудовский, В. А. Скорости образования и роста поверхностных зародышей при лазерно-стимулированной электрокристаллизации никелевых покрытий / В. А. Заблудовский, В. В. Дудкина // Металлофизика и новейшие технологии. – 2010. – № 6. – С. 757–763.
8. Заблудовский, В. А. Структура и свойства никелевых пленок электроосажденных при лазерно-стимулированном потенциостатическом режиме / В. А. Заблудовский, В. В. Дудкина // Металлофизика и новейшие технологии. – 2012. – № 1. – С. 77–86.
9. Заблудовський, В. О. Вплив лазерного випромінювання на кінетику процесу електрокристалізації плівок нікелю і цинку / В. О. Заблудовський, В. В. Дудкіна // Фізика і хімія твердого тіла. – 2013. – № 4. – С. 898–902.

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

10. Исследование свойств хром-алмазных покрытий на основе детонационных наноалмазов различных производителей / Г. К. Буркат, В. Ю. Долматов, Е. Osawa, Е. А. Орлова // Сверхтвердые материалы. – 2010. – № 2. – С. 43–59.
11. Эшкин, А. Давление лазерного излучения / А. Эшкин // Успехи физ. наук. – 1973. – Т. 110, вып. 1. – С. 101–116.
12. Chiganova, G. A. Effect of nanodiamond modification on the characteristics of diamond-containing nickel coatings / G. A. Chiganova, L. E. Mordvinova // Inorganic materials. – 2011. – Vol. 47, № 7. – P. 717–721.
13. Codeposition mechanism of nanodiamond with electrolessly plated nickel films / Matsubara Hiroshi, Abe Yoshihiro, Chiba Yoshiyuki et al. // Electrochimica Acta. – 2007. – № 52 (9). – P. 3047–3052.
14. Effects of nano-diamond particles on the structure and tribological property of Ni-matrix nanocomposite coatings / Wang Liping, Yan Gao, Xue Qunji et al. // Materials Science and Engineering: A. – 2005. – Vol. 390, iss. 1–2. – P. 313–318.
15. Preparation and Investigation of Ni-Diamond Composite Coatings by Electrodeposition / He Xiangzhu, Wang Yongxiu, Sun Xin et al. // Nanoscience and Nanotechnologies Letters. – 2012. – Vol. 4, № 1. – P. 48–52.
16. Preparation of composite electrochemical nickel-diamond and iron-diamond coatings in the presence of detonation synthesis nanodiamonds / G. K. Burkat, T. Fujimura, V. Yu. Dolmatov et al. // Diamond and related materials. – 2005. – Vol. 14, № 8. – P. 1761–1764.

В. А. ЗАБЛУДОВСКИЙ<sup>1</sup>, В. В. ДУДКИНА<sup>1\*</sup>, Э. Ф. ШТАПЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Каф. «Физика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 23, +38 (056) 373 15 86, эл. почта shtapenko@rambler.ru

<sup>1\*</sup>Каф. «Физика», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепропетровск, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 23, +38 (056) 373 15 86, эл. почта dudkina2@ukr.net

## ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ

**Цель.** Исследование влияния лазерного излучения на структуру и механические свойства электроосажденных композиционных никелевых покрытий, содержащих ультрадисперсные алмазы. **Методика.** Электроосаждение пленок никеля проводили из стандартного раствора с добавкой ультрадисперсных алмазов (УДА) на лазерно-электролитической установке, построенной на базе газоразрядного CO<sub>2</sub>-лазера. Механические испытания покрытий на износостойкость выполнялись на машине с возвратно-поступательным движением образцов в условиях сухого трения о сталь. Спектральный микроанализ элементного состава границы раздела пленка–подложка выполнялся на растровом электронном микроскопе РЕММА-102-02. **Результаты.** Исследование никелевых покрытий, модифицированных ультрадисперсными алмазами и электроосажденных в условиях внешней стимуляции лазерным излучением, показали зависимость структуры и механических свойств композиционных электролитических покрытий, а также качественного и количественного распределения соосажденного наноалмаза от способа электроосаждения. **Научная новизна.** Установлено влияние лазерного излучения на процесс соосаждения УДА, что повышает микротвердость и износостойкость электролитических никелевых покрытий. **Практическая значимость.** Лазерно-стимулированное электроосаждение композиционных электролитических никелевых покрытий является эффективным методом локального повышения износостойкости металлических покрытий, который обеспечивает долговечность сохранения эксплуатационных (функциональных) свойств поверхности.

**Ключевые слова:** композиционные электролитические покрытия; ультрадисперсные алмазы; лазерное излучение; структура; механические свойства

V. A. ZABLUDOVSKIY<sup>1</sup>, V. V. DUDKINA<sup>1\*</sup>, E. Ph. SHTAPENKO<sup>1</sup><sup>1</sup>Dep. «Physics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 23, +38 (056) 373 15 86, e-mail shtapenko@rambler.ru<sup>1\*</sup>Dep. «Physics», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipropetrovsk, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 23, +38 (056) 373 15 86, e-mail dudkina2@ukr.net

## THE INVESTIGATION OF INFLUENCE OF LASER RADIATION ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE ELECTROLYTIC NICKEL COATING

**Purpose.** Investigation of laser radiation effect on the structure and mechanical properties of electrodeposited nickel composite coatings containing ultrafine diamonds. **Methodology.** Electrodeposition of nickel films was carried out with the addition of a standard solution of ultrafine diamonds (UFD) on laser-electrolytic installation, built on the basis of the gas-discharge CO<sub>2</sub> laser. Mechanical testing the durability of coatings were performed on a machine with reciprocating samples in conditions of dry friction against steel. The spectral microanalysis of the elemental composition of the film - substrate was performed on REMMA-102-02. **Findings.** Research of nickel coatings and modified ultrafine diamond electrodeposited under external stimulation laser demonstrated the dependence of the structure and mechanical properties of composite electrolytic coating (CEC), and the qualitative and quantitative distribution of nanodiamond coprecipitated from an electrodeposition method. **Originality.** The effect of laser light on the process of co-precipitation of the UFD, which increases the micro-hardness and wear resistance of electrolytic nickel coatings was determined. **Practical value.** The test method of laser-stimulated composite electrolytic nickel electrodeposition coating is an effective method of local increase in wear resistance of metal coatings, which provides durability save performance (functional) properties of the surface.

*Keywords:* electrolytic composite coating; ultrafine diamonds; laser radiation; structure; mechanical properties

### REFERENCES

1. Burkat G.K., Dolmatov V.Yu. Ultradispersnyye almazy v galvanotekhnike [The ultra-dispersed diamonds in electroplating]. *Fizika tverdogo tela – Solid State Physics*, 2004, vol. 46, no. 4, pp. 685-692.
2. Dolmatov V.Yu., Burkat G.K. Ultradispersnyye almazy detonatsionnogo sinteza kak osnova novogo klassa kompozitsionnykh metal-almaznykh galvanicheskikh pokrytiy [The ultra-dispersed diamonds of detonation synthesis as a basis for a new class of composite metal diamond plating coatings]. *Sverkhtverdyye materialy – Superhard materials*, 2000, no. 1, pp.84-95.
3. Dolmatov V.Yu. *Ultradispersnyye almazy detonatsionnogo sinteza* [The ultra-dispersed diamonds of detonation synthesis]. Saint Petersburg, SPBGPU Publ., 2003. 344 p.
4. Dudkina V.V. Adgezionnaya prochnost nikelovykh i tsinkovykh pokrytiy s mednoy osnovoy, elektroosazhdennykh v usloviyakh vneshney stimulyatsii lazernym izlucheniym [Adhesive strength nickel and zinc coatings with copper base electrodeposited under external stimulation by laser radiation]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana – Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 2013, no. 2 (44), pp. 83-90.
5. Dudkina V.V., Zabludovskiy V.A. Lokalnoye lazerno-stimulirovannoye elektroosazhdeniye nikelya [Local laser-stimulated electrodeposition of nickel]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2010, issue 31, pp. 262-265.
6. Dudkina V.V., Zabludovskiy V.O., Shtapenko E.P. Vplyv lazernoho vyrominiuvannia na protses elektroosazhdeniia plivok nikeliu [The effect of laser radiation on the process of electrodeposition of nickel films]. *Fizyka i khimiia tverdogo tila – Physics and Chemistry of Solids*, 2011, vol. 12, no. 2, pp. 332-336.
7. Zabludovskiy V.O., Dudkina V.V. Skorosti obrazovaniya i rosta poverkhnostnykh zarodyshey pri lazerno-stimulirovannoy elektrokristallizatsii nikelovykh pokrytiy [Formation and growth rate of surface nucleation in laser-stimulated electrocrystallisation nickel coatings]. *Metallofizika i noveyskiye tekhnologii – Physics of Metals and the Advanced Technologies*, 2010, vol. 32, no. 6, pp. 757-763.
8. Zabludovskiy V.O., Dudkina V.V. Struktura i svoystva nikelovykh plenok elektroosazhdennykh pri lazerno-stimulirovannom potentsiostaticheskom rezhime [The structure and properties of electrodeposited nickel films



## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- in laser-stimulated potentiostatic mode]. *Metallofizika i noveyshiye tekhnologii – Physics of Metals and the Advanced Technologies*, 2012, vol. 34, no. 1, pp. 77-86.
9. Zabludovskiy V.O., Dudkina V.V. Vplyv lazernoho vyprominiuvannya na kinetyku protsesu elektrokrystalizatsii plivok nikeliu i tsynku [The effect of laser radiation on the kinetics of the process electrocrystallisation films of nickel and zinc]. *Fizyka i khimiia tverdoho tila – Physics and Chemistry of Solids*, 2013, vol. 13, no. 4, pp. 898-902.
  10. Burkat G.K., Dolmatov V.Yu., Osawa E., Orlova E.A. Issledovaniye svoystv khrom-almaznykh pokrytiy na osnove detonatsionnykh nanoalmazov razlichnykh proizvoditeley [Investigation of properties of chromium-diamond coatings based on detonation nanodiamonds of different manufacturers]. *Sverkhtverdyye materialy – Superhard materials*, 2010, no. 2, pp. 43-59.
  11. Eshkin A. Davleniye lazernogo izlucheniya [Pressure laser]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Advances of Physical Sciences*, 1973, vol. 110, issue 1, pp. 101-116.
  12. Chiganova G.A., Mordvinova L.E. Effect of nanodiamond modification on the characteristics of diamond containing nickel coatings. *Inorganic materials*, 2011, vol. 47, no. 7, pp. 717-721.
  13. Matsubara Hiroshi, Abe Yoshihiro, Chiba Yoshiyuki, Nishiyama Hiroshi, Saito Nobuo, Hodouchi Kazunori, Inoue Yasunobu. *Electrochimica Acta*, 2007, no. 52 (9), pp. 3047-3052.
  14. Wanga Liping, Gao Yan, Xue Qunji, Liu Huiwen, Xu Tao. Effects of nano-diamond particles on the structure and tribological property of Ni-matrix nanocomposite coatings. *Materials Science and Engineering: A*, 2005, vol. 390, issue 1–2, pp. 313-318.
  15. He Xiangzhu, Wang Yongxiu, Sun Xin, Huang Liyong. Preparation and Investigation of Ni-Diamond Composite Coatings by Electrodeposition. *Nanoscience and Nanotechnologies Letters*, 2012, vol. 4, no. 1, pp. 48-52.
  16. Burkat G.K., Fujimura T., Dolmatov V.Yu., Orlova E.A., Veretennikova M.V. Preparation of composite electrochemical nickel–diamond and iron–diamond coatings in the presence of detonation synthesis nanodiamonds. *Diamond and related materials*, 2005, vol. 14, no. 8, pp. 1761-1764.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. І. О. Вакуленком (Україна); д.фіз.-мат.н., проф. В. В. Клименком (Україна)

Надійшла до редколегії 20.08.2013

Прийнята до друку 06.09.2013