

Л.А. ЛОПАТА<sup>1</sup>, О.В. ЛОПАТА<sup>1</sup>, І.П. РИБАК<sup>2</sup>, А.Є. СОЛОВИХ<sup>3</sup>, С.Є. КАТЕРИНИЧ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут проблем міцності імені Г.С. Писаренка, Київ, Україна

<sup>2</sup>Національний транспортний Університет, Київ, Україна

<sup>3</sup>Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

## ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ СТВОРЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ

Розглянуто методи усунення недоліків у розробці покриттів – метод створення багатошарових покриттів і створення покриттів змінного складу за товщиною покриття. Визначено, що обидва методи значно здорожчують технологію отримання покриття та знижують надійність отримання покриття високої якості, оскільки пошкодження в одному з шарів призводить до зниження якості покриття. Запропоновано усунення недоліків покриттів шляхом використання багатошарових, багатофункціональних покриттів і інтегрованих технологій. В умовах дефіциту дорогих легуючих матеріалів, що входять до складу сталей, що вимагають високого комплексу властивостей міцності, перспективним є використання інтегрованих технологій поверхневого зміцнення. В інтегруванні технологій переважає емпірично-інтуїтивний підхід. Вирішальним фактором у виборі первинних технологій є інтегрувати їх у єдиний технологічний цикл. Із різноманіття варіантів поєднання первинних технологій створення покриттів впливає, що найбільше потребують підвищення властивостей наймасовіші технології покриттів, що застосовуються в машинобудуванні, насамперед – газотермічне напilenня. Головні недоліки напилених покриттів – низька міцність зчеплення та висока пористість. Покращують ці властивості лазерною обробкою, електронно-променевим зміцненням, ультразвуковою обробкою, оплавленням та хіміко-термічною обробкою. Підвищують триботехнічні характеристики композиційних електролітичних покриттів лазерною обробкою, ультразвуковою обробкою, іонним азотуванням. Знаходять застосування інтегровані технології у комбінації лазерного легування та хіміко-термічної обробки. Проведені дослідження дозволили довести доцільність використання інтегрованих технологій створення зносостійких покриттів з високою міцністю і довговічністю.

**Ключові слова:** гібридний композит, розтяг, деформація, руйнування, випробування.

**Вступ.** Характерною особливістю технологій поверхневого зміцнення є те, що не завжди є можливість отримати одночасно підвищення всіх властивостей деталі (зносостійкості, міцності, корозійної стійкості) для всіх режимів експлуатації. Матеріал покриття нанесений різними способами має різні експлуатаційні властивості.

Широкому впровадженню покриттів перешкоджає їхня недостатня зносостійкість, міцність і довговічність. Сьогодні думка про недостатню зносостійкість та міцності покриттів в екстремальних умовах експлуатації визнана як у вітчизняній, так і зарубіжній літературі [1].

Особливі вимоги пред'являють до покриттів, що працюють під великими навантаженнями в умовах зношування. Зношування покриття різко зростає після певного навантаження. Аналіз залежності швидкості зношування від навантаження показує, що при деякому критичному навантаженні у всіх матеріалів існує перехід від низької швидкості (слабкий знос) до високої

швидкості (сильний знос) [2]. Тому суттєво усунути чи зменшити ці недоліки є природним прагненням. Використання інтегрованих технології створення покриттів дозволить підвищити їх зносостійкість та міцність.

**Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем.** У практиці зміцнювальних захисних покриттів склалася думка про позитивний ефект залишкових напружень стиску в покритті, що дозволяє знизити їх крихкість. Однак встановлено, що високі залишкові напруження стиску на поверхні деталі (наприклад, при цементації) сприяють руйнуванню і відшаруванню цементованого шару при контактній втомі [3]. Підвищення міцності покриттів шляхом підвищення їх адгезійної міцності з поверхнею, що зміцнюється, не завжди дозволяє отримати позитивний результат, але і знижує міцність і пластичність основного матеріалу (матеріалу деталі) [4].

Для усунення зазначених недоліків в даний час у розробці матеріалів для покриттів використовують два методи:

1) створення багатошарових покриттів. Кожен шар у багатошаровому покритті виконує власну функцію та забезпечує плавний перехід фізико-механічних властивостей покриття від поверхні до основи;

2) створення багатокомпонентних шарів змінного складу за товщиною покриття.

Обидва методи значно здорожують технологію отримання покриття та знижують надійність отримання покриття високої якості, оскільки пошкодження в одному з шарів призводить до зниження якості покриття.

У спробах усунення недоліків покриттів спостерігаються дві основні тенденції:

- нанесення багатошарових, багатофункціональних покриттів;
- розвиток інтегрованих багатоопераційних технологій [1].

Кожна технологія поверхневого зміцнення має свою нішу оптимальних умов використання, включаючи навіть технологічні традиції, що склалися на конкретному підприємстві. Нині ще не склалася методологія синтезу багатоопераційних технологій. В інтегруванні технологій переважає емпірично-інтуїтивний підхід. Вирішальним фактором у виборі первинних технологій і технологій, що завершають технологічний ланцюжок, є наявність на підприємстві окремих видів обладнання та можливість інтегрувати їх у єдиний технологічний цикл.

Відзначають суттєве підвищення зносостійкості матеріалів, що модифікуються, поєднанням методів іонної, електронно-променевої та лазерної обробки [1. 3]. В умовах дефіциту дорогих легуючих матеріалів, що входять до складу сталей, що вимагають високого комплексу властивостей міцності, перспективними є інтегровані технології поверхневого зміцнення маловуглецевих сталей.

**Метою роботи** – виявити переваги та недоліки різних поєднань первинних технологій, а також перспективу їх розвитку.

**Результати досліджень та їх аналіз.** Із різноманіття варіантів поєднання первинних технологій створення покриттів впливає, що найбільше потребують підвищення властивостей наймасовіші технології покриттів, що застосовуються в машинобудуванні, насамперед – газотермічне напилення. Головні недоліки напилених покриттів – низька міцність зчеплення та висока пористість.

Покращують ці властивості лазерною обробкою, електронно-променевим зміцненням, оплавленням та хіміко-термічною обробкою. Найбільш численними є дослідження лазерного зміцнення газотермічних покриттів [5-17]. Завдяки оптимізації параметрів лазерної обробки напилених електродугових покриттів отримують дрібнокристалічну безпористу структуру з рівномірним розподілом хімічних елементів. Цим суттєво підвищується зносостійкість електродугових покриттів в умовах граничного тертя та абразивного зношування [5, 9, 17]. Досягають підвищення адгезійної та когезійної міцності напиленого покриття при його наноструктуруванні [8, 9]. Лазерна обробка газотермічних покриттів підвищує їх стійкість до високотемпературної газової корозії та корозії у розплаві  $V_2O_5+Na_2SO_4$  [10, 11].

Показано переваги та можливості підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин із газотермічними покриттями, насамперед триботехнічних характеристик. Проаналізовано область використання лазерної обробки для поліпшення властивостей напилених покриттів шляхом:

- розширення діапазонів розчинення легуючих компонентів; утворення необхідних фаз, у тому числі метастабільних;
- ущільнення та аморфізації покриттів незначної товщини (< 50 мкм) при забезпеченні найменшого термічного впливу на поверхню деталі, що зміцнюється (основу) [12].

Розроблено дослідно-теоретичну модель, яка дозволяє оптимізувати параметри лазерного випромінювання по максимальному значенню критерія якості оплавлення газотермічних покриттів. Показано альтернативний вплив енерговкладу на триботехнічні характеристики покриттів [13]. З метою зниження енергетичних витрат використовують спосіб легування поверхні спільною обробкою лазерним променем та плазмою [14].

Лазерне оплавлення напилених покриттів збільшує мікротвердість у 10 разів [15, 16], зносостійкість більш ніж у 2 рази [17].

Оплавлення газотермічних покриттів здійснюють струмами високої частоти [14], високошвидкісним імпульсно-плазмовим струменем [17, 18], у вакуумних пічах [19-21]. Істотний ефект багаторазового підвищення мікротвердості та зносостійкості забезпечує електронно-променева обробка напилених покриттів [18]. Аналіз структури показав, що середній розмір зерен у покритті зменшується від сотень мкм до сотень нанометрів, а мікротвердість збільшується у 5 разів. Межа витривалості підвищується на 60-80%, а міцність зчеплення – у 2,5...3,5 разів після електронно-променевої обробки.

Для підвищення триботехнічних характеристик напилених покриттів використовують ультразвукову обробку, зокрема одночасно з плазмовим напиленням [6]. Ефективним є застосування хіміко-термічної обробки після напилення. Після борування зносостійкість напилених покриттів із сталі Св-08 при сухому терті підвищилася у 100 разів. Підвищилася також адгезійна міцність напилених покриттів. Іонне азотування деталей із напиленими покриттями зі сталей 40X13 та X18N10T забезпечувало мікротвердість покриттів від 6,5 до 15 ГПа у поверхневому шарі товщиною від 5 до 40 мкм. Зносостійкість напилених покриттів зі сталей 40X13 та X18N10T збільшилася у 8 раз після іонного азотування [20].

Одна з найпоширеніших технологій у машинобудуванні – електрохімічне нанесення покриттів має такий суттєвий недолік як низька адгезійна міцність. Підвищують триботехнічні характеристики композиційних електролітичних

покриттів лазерною обробкою, ультразвуковою обробкою [22], іонним азотуванням [23, 24]. При ультразвуковій обробці розмір зерен у покритті залежить від інтенсивності обробки, змінюючись від 45 НМ до 24 НМ [22]. Іонне азотування підвищує зносостійкість при абразивному зношуванні за рахунок перетворення електроосажденного хрому на нітрид  $\text{Cr}_2\text{N}$  [24]. Визначено механізм впливу термообробки на зміцнення електроосажденного Fe-B-покриття, що забезпечує підвищення зносостійкості. Технологія відновлення зношених деталей електролітичним залізненням з наступною нітроцементацією забезпечує високі експлуатаційні характеристики системи «деталь-покриття» - міцність зчеплення, зносостійкість, міцність втоми. Ефективне сульфоціанування електроосажденного Fe-B-покриття, що забезпечує підвищення зносостійкості та зниження коефіцієнта тертя.

Знаходять застосування інтегровані технології у комбінації лазерного легування та хіміко-термічної обробки. Ця комбінація дозволяє отримувати високу твердість (до 20 ГПа) за рахунок утворення зміцнювальних дисперсних фаз, що призводить до збільшення зносостійкості в 1,5-3 рази, порівняно з азотованою сталлю Ст. 38Х2МЮА [25, 26]. Азотований шар, попередньо легований хромом і ванадієм, має твердість 16-18 ГПа. Лазерне легування алюмінієм забезпечує розвинену полігонізовану структуру, яка прискорює дифузію азоту і зпбезпечує твердість 21 ГПа [25].

Роботи [27-29] показали, що попередня дискретна лазерна обробка робить істотний внесок у процес подальшого газового азотування. При цьому якісний та кількісний характер змін в азотованому шарі визначається заздалегідь сформованим структурно-фазовим станом. Підвищена розчинність азоту в кристалічній решітці сталі при обробці її поверхні лазерним променем є наслідком утворення високої щільності рухомих дислокацій, а також сильного диспергування вихідної структури зерен. При цьому процес насичення поверхні азотом прискорюється в 17 разів протягом першої години. У порівнянні з технологіями газового азотування або дискретно-лазерної обробки зносостійкість при інтегрованій технології підвищилася в 2,5 рази [29].

Комбінація лазерної обробки з іонним азотуванням суттєво підвищує процес насичення азотом сталей, глибину зміцненої зони та підвищує зносостійкість [30], забезпечує підвищенням твердості порівняно з іонним азотуванням [31].

Електроіскрове легування, як і лазерні технології, стосується способів, що використовують висококонцентровані енергетичні джерела. Тому ефективна також комбінація електроіскрового легування з наступним іонним азотуванням [32, 33]. Цим суттєво збільшується глибина шарів підвищеної твердості. А ось комбінація лазерної та електроіскрової обробки забезпечує вкрай незначний ефект [34].

Слід зазначити явище інверсії, коли зміна послідовності операцій зміцнення призводить до результатів, що відрізняються. Звичайно, оптимальний вибір операцій та їх послідовність визначається підвищенням комплексу механічних властивостей: твердості, зносостійкості, а також шорсткості поверхні та точності розмірів деталі. Попередню хіміко-термічну обробку доцільно використовувати для підготовки поверхні під електроіскрове легування. Фінішне електроіскрове легування цементованих та азотованих поверхонь забезпечує підвищення твердості та зносостійкості. Різна послідовність електроіскрового легування та азотування дозволяє керувати розподілом мікротвердості в легованому шарі, а

саме - положенням максимуму мікротвердості в приповерхневому шарі [35]. Відзначають інверсію у комбінації лазерної обробки та іонного азотування [31]. Лазерна обробка азотованого шару забезпечує щільніший оксинітридний шар під поверхню, а також збільшення глибини азотованого шару [36]. У наноструктурованому поверхневому шарі після шліфування азотований шар вдвічі товщий, ніж на крупнозернистій поверхні в тих же умовах азотування, що пояснюють прискоренням дифузії азоту вздовж між зернами у наноструктурному залізі [37, 38]. Фінішна дробоструменева обробка азотованого шару підвищує зносостійкість і межу витривалості зубчастих передач.

Найсуттєвіший зміцнюючий ефект забезпечує електроконтактне припикання (ЕКП) газотермічних покриттів [39]. На рис.1 наведено залежність адгезійної міцності  $\tau_a$  нікелевого покриття на сталі ст.3.

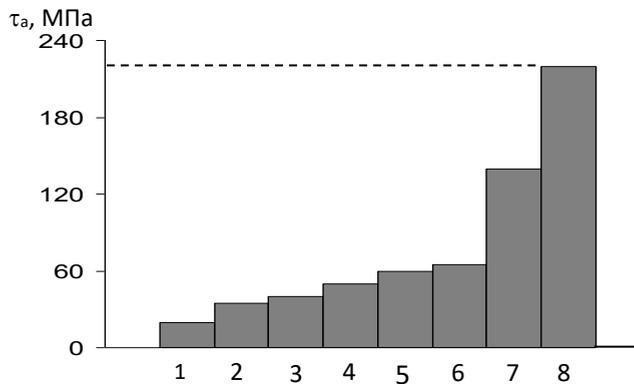


Рис.1. Залежність адгезійної міцності  $\tau_a$  від способу нанесення Ні-покриття на сталь ст.3:

- 1 – електродугова металізація; 2 – газополуменеве напилення;
- 3 – плазмове напилення; 4 – електролітичне осадження;
- 5 – детонаційне напилення; 6 – електроіскрове легування;
- 7 – електронно-променева конденсація,
- 8 – газополуменеве напилення + електроконтактне припикання.

Перевага комбінованої обробки (позиція 8) полягає більш ніж у 6-кратному підвищенні  $\tau_a$  порівняно з газополуменевим напиленням (позиція 2). Очевидною є також доцільність комбінацій технологій позицій 1 - 5 з технологією електроконтактного припикання.

На рис. 2 наведена залежність когезійної міцності  $\sigma_k$  від товщини покриття для варіанту газополуменевого напилення (крива 1) та інтегрованої технології газополуменевого напилення з електроконтактним припиканням. Залежність адгезійної міцності  $\tau_a$  від товщини покриття для газополуменевого напилення та комбінації газополуменевого напилення з електроконтактним припиканням наведена на рис. 3.

Застосування інтегрованої технології газотермічного напилення та електроконтактного припикання має ряд переваг:

- знижуються вимоги до механічних властивостей та пористості напиленого шару. Напилення упри цьому виконує функцію допоміжної операції;
- усі газотермічні покриття вимагають фінішну механічну обробку.

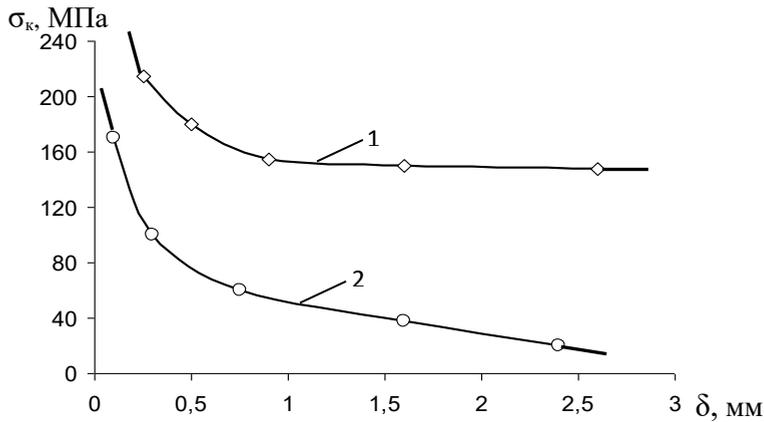


Рис. 2 Когезійна міцність  $\sigma_k$ : 1 – газополуменеве напилення (ГТН), 2 – газополуменеве напилення + електроконтактне прип'якання (ГТН + ЕКП)

Операцію електроконтактного прип'якання напиленого покриття можна поєднати з фінішною обробкою пластичним поверхневим деформуванням (ППД) до необхідних розмірів деталі та чистоти поверхні;

- можливість замінити високолеговані дефіцитні порошки більш дешевими для інтегрованої технології (газотермічного напилення (ГТН), електроконтактного прип'якання (ЕКП) і поверхневого пластичного деформування (ППД)) та фінішною технологією іонного азотування (ІА) для досягнення необхідної твердості та зносостійкості покриття;

- можливість заміни традиційного наплавлення (з її тріщинами та необхідністю фінішої механічної обробки) на інтегровану технологію газотермічного напилення, електроконтактного прип'якання та поверхневого пластичного деформування (ГТН+ЕКП+ППД) при використанні дешевих порошків та фінішої операції. Ця можливість забезпечує перевагу покриттів при газотермічному напиленні та електроконтактному прип'яканні (ГТН+ЕКП) товщиною  $h > 3$  мм (рис. 1) з високою адгезійною міцністю  $\tau_a$  та низьким рівнем залишкових порушень.

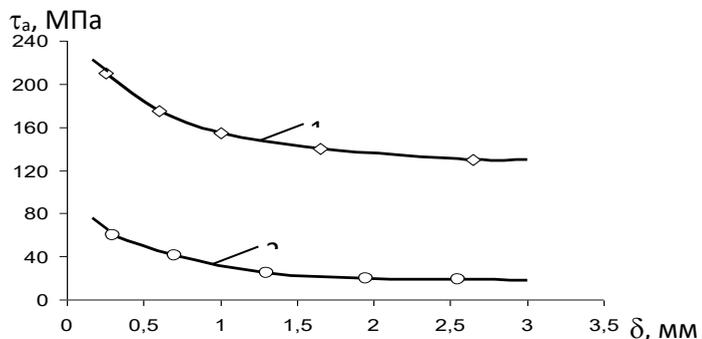


Рис.3 Адгезійна міцність  $\tau_a$  1 – газотермічне напилення (ГТН); 2 – ГТН + електроконтактне прип'якання.

У комбінаціях технологій електроіскрової, лазерної та електронно-променевої обробки з іонним азотуванням спостерігається ефект неадитивності. Попередня обробка цими первинними технологіями суттєво збільшує азотованість сталей, глибину зміцненого шару та забезпечує багаторазове підвищення твердості та зносостійкості порівняно з іонним азотуванням.

З інтегрованих технологій найбільший ефект по несучій здатності забезпечують дуплексні покриття, що поєднують попереднє глибоке іонне азотування і зовнішній тонкий шар надтвердого вакуум-плазмового покриття. Подібна інтегрована технологія забезпечила 10-кратне підвищення довговічності голчастих клапанів запорної арматури, яка виконана зі сталі 12X18H10T, що експлуатуються в умовах високих контактних тисків та агресивних технологічних розплавів.

У всіх варіантах інтегрованих технологій критерієм вибора є порівняння витрат і підвищення комплексу механічних властивостей зміцнених деталей.

### Висновки

1. Для підвищення якості деталей із покриттями все ширше застосовують багатоопераційні технології.

2. В даний час ще не склалася методологія та теорія синтезу багатоопераційних технологій. В інтегруванні технологій переважає емпірично-інтуїтивний підхід. Вирішальними факторами у виборі первинних технологій та технологій, що завершають технологічний ланцюжок, є наявність на підприємствах окремих видів обладнання та можливість інтегрувати їх у єдиний технологічний цикл.

3. Основний недолік інтегрованих технологій – це їх складність, так як для їх реалізації потрібно різнопланове устаткування. Крім того, порушення технології на одному з етапів інтегрованої технології призводить до отримання неякісного покриття.

4. Показана ефективність інтегрованої технології газотермічного напилення та електродоконтного припікання.

### Список літератури

1. Покрyтия и их использование в технике // В кн. «Прочность материалов и конструкций», пред. В.Т. Троценко – 2-е изд. К.: Академперіодика, 2006. С.981-1074.

2. Ляшенко Б.А., Мовшович А.Я., Долматов А.И. Упрочняющие покрытия дискретной структуры. *Технологические системы*. 2001. №4(10). С.17-25.

3. Новиков Н.В., Бидный А.А., Ляшенко Б.А. и др. Методы упрочнения поверхностей машиностроительных деталей. К.: ИСМ АН УССР, 1989. 112 с.

4. Ляшенко Б.А., Цыгулев О.В., Кузнецов П.Б. Необходимо ли всегда повышать адгезионную прочность защитных покрытий. *Проблемы прочности*. 1987. № 5. С.70-74.

5. Похмурська Г.В., Довгунік В.М., Студент М.М. Зносостійкість лазерно модифікованих електродугових поривів з порошкового дроту ФМІ-2. *ФХММ*. 2003. 39, № 4. С.61-64.

6. Panin V.E., Klimenov V.A., Bezboroda V.P. et al. Forming the structure and phase composition of coatings by plasma spraying and influence of powerful ultrasound and laser radiation on them. *Adv. Mater. and Process.*: 2<sup>nd</sup> Sino-Rus Symp., Xi'an (Oct. 8-13, 1993, Xi'an). 1994. С.479-483.

7. Longa Yrene, Shinya Masanobu, Takemoto Mikio. Coatings of aluminide intermetallic compounds on steel utilizing a hybrid technique of spraying and IR-laser fusion. *Mater. and*

*Manuf. Processes*. 1994. 9, № 3. С.495-505.

8. Longa Y., Takemoto M. Laser processing of high-chromium nickel-chromium coatings deposited by various thermal spraying methods. *Corrosion (USA)*. 1994. 50, № 11. С.827-837.

9. Толочко Н.А., Аршинов К.И., Семашко В.М. и др. Лазерное модифицирование покрытий NiCrFe-50%Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> *Матер., технол., инструм.* 2001 6, № 2. С.60-63.

10. Подчерняева И.А. Лазерное оплавление газотермических покрытий на основе кортинита. *Технол. и орган. пр-ва*. 1992. № 2. С.42-43.

11. Глебова М.А., Корнев А.Б., Глебов В.В. и др. Повышение качества газотермических покрытий при термической обработке токами высокой частоты и лазерным лучом. *Свароч. пр-во*. 2004. №6. С.43-46.

12. Becker R., Sepold G. Nachbehandlung von Spritzschichten durch Hochleistungslaser. *Metalloberfläche*. 1987. 41, № 7. С. 329-332.

13. Анциферов В.Н., Шмаков А.М., Ившина Н.Н. Лазерная обработка плазменнонапыленных на порошковую сталь покрытий. *Порошк. Металлургия*. 1992. №10. С. 25-28.

14. Pat. 6229111 USA, B23K 9/04. Method for laser / plasma surface alloying. Оpubл. 08.05.2001.

15. Hannotiau M., Leunen J., Sleurs J. et al. Upgrading of plasma sprayed coatings by laser treatment to corrosion resistance and hot isostatic pressing for wear resistance. *Plasma Surface Eng.:* Pap. 1<sup>st</sup> Int. Conf., Garmisch-Partenkirchen (19-23 Sept., 1988, Oberursel). 1989. Vol.1. С. 387-394.

16. Kunlin Wang, Zhirui Tian, Chongbin Yang et al. Повышение износостойкости сплавов Al-Si лазерной переплавкой. *Jinshu rechuli = Heat Treat. Metals*. 1994. №10. С. 35.

17. Liang G., Li C., Su J. et al. Микроструктура плазменного покрытия на алюминиевом сплаве после лазерной обработки. *Chin. J. Nonferrous Metals*. 1998. 8, № 1. С. 28

18. Погребняк А.Д., Кравченко Ю.А., Василюк В.В. и др. Структура и свойства порошкового покрытия на основе Ni после оплавления поверхности концентрированными потоками энергии. *ФизХОМ*. 2005. №1. С. 35-41.

19. Simunovic K., Franz M., Maric G. Investigation and estimation of residual stress in flame sprayed and fused NiCrBSi coatings. *Metallurgija*. Zagreb. 2008. 47, №2. С. 93-97.

20. Jie X., Mao Z. Структура и свойства напыленного плазмой покрытия NiCrBSi, переплавленного в печи. *Jinshu rechuli = Heat Treat. Metals*. 1996. №8. С. 15-17.

21. Белоцерковский М.А., Кукареко В.А., Азизов Р.О. Получение износостойких покрытий активированным газотермическим напылением с последующим модифицированием. *Вопр. материаловед.* 2004. №2. С.77-87.

22. Yang Y., Shen Y., Chen J. et al. Покрытие из нанокристаллического никеля, полученное методом пульсирующего электроосаждения, совмещенного с ультразвуковой активацией. *Jinshu xuebao = Acta met. sin.* 2007. 43, №8. С. 883-888.

23. Rie K.-T., Methe E., Bulak A. Plasmanitrieren und – nitrocarburierten von galvanisch abgeschiedenen rißarmen chromschichten und Hartchrom. *Galvanotechnik*. 1995. 86, №7. С. 2225-2229.

24. Dasgupta A., Kuppusami P., Vijayalakshmi M. et al. Pulsed plasma nitriding of large components and coupons of chrome plated SS316LN stainless steel. *J. Mater. Sci*. 2007. 42, №20. С. 8447-8453.

25. Пат. № 31198 України, С23С 8/02. Спосіб комбінованої лазеро-хіміко-термічної обробки сталевих виробів. Оpubл. 25.03.2008, Бюл. № 6.

26. Корнієнко А.О., Яхья М.С., Ішук Н.В. та ін. Формування покриттів триботехнічного призначення комбінованою лазеро-хіміко-термічною обробкою. *Пробл. Тертя та зношування: Наук.-техн.* 36. К.: НАУ, 2008. Вип. 49. Т.2. С. 61-65.

27. Пат. 19551 Україна, С23С 8/02. Спосіб комбінованої лазерно-хіміко-термічної обробки матеріалів / М.В. Кіндрачук, Н.В. Іщук, В.М. Писаренко та ін. Опубл. 15.12.06. Бюл. №12.
28. Пат. 25412 Україна, С23С 8/02. Спосіб отримання зносостійких дискретних азотованих шарів / Кіндрачук М.В., Іщук Н.В., Писаренко В.М. та ін. Опубл. 10.08.07, Бюл. № 12.
29. Кіндрачук М.В., Яхья М.С., Корнієнко А.О. та ін. Визначення параметрів дискретної структури покриттів триботехнічного призначення. *Пробл. тертя та зношування: Наук.-техн. зб. К.: НАУ. 2008. Вип. 50. С.5-15.*
30. Bell T., Bloyce A. Nitriding laser treated titanium bearing low alloy steels. "*Heat Treat.*: 84: Proc. Int. Conf., (London, 2-4 May, 1984). London. 1984. 36/1-36/7.
31. Bergmann H.W., Müller D., Amon M. et al. Kombination des Laser-strahlhärtens mit einer Kurzzeitrierbehandlung. *Harter. – Techn. Mitt.* 1993. 48, № 4. С. 238-247.
32. Тарельник В. Іонне азотування квазібагатошарових електроерозійних покриттів. *Машинознавство.* 1999. №6. С. 31-33.
33. Тарельник В.Б., Марцинковский В.С. Упрочнение и ремонт ответственных деталей машин методом электроэрозионного легирования. *Тяж. машиностр.* 2005. №2. С.28-32.
34. Вайс Е., Радек Н. Эксплуатационные свойства покрытий типа Cu-Mo и Cu-Ti, модифицированных лазерным лучом. *Пробл. тертя та зношування: Наук.-техн. зб. К.: НАУ, 2008. Вип. 49. Т.2. С.104-111.*
35. Храновская Е.Н. Массоперенос, структурные и фазовые изменения в железе и меди при их легировании в условиях температурных градиентов. Автореф. ... канд. техн. наук, ИМФ им. Г.В. Курдюмова НАН Украины, Киев. 2008. 20 с.
36. Luo Hong, Liu Jiajun, Liu Fen et al. Влияние лазерного упрочнения за счет фазового превращения на ионно-азотированный слой. *Chin. J. Lasers. A.* 1995. 22, №4. С. 313-316.
37. Tong W.P., Liu C.Z., Wang W. et al. Gaseous nitriding of iron with a nanostructured surface layer. *Scr. mater.* 2007. 57, №6. С.533-536.
38. Lin Yimin, Lu Jian, Wang Liping et al. Surface nanocrystallization by surface mechanical attrition treatment and its effect on structure and properties of plasma nitrided AISI 321 stainless steel. *Acta mater.* 2006. 54, №20. С. 5599-5605.
39. Jie X., Mao Z. Структура и свойства напыленного плазмой покрытия NiCrBSi, переплавленного в печи. *Jinshu rechuli = Heat Treat. Metals.* 1996. №8. С. 15-17.

Стаття надійшла до редакції 23.11.2025.

**Лопата Лариса Анатоліївна** – канд. техн. наук, доцент, науковий співробітник відділу міцності матеріалів і елементів конструкцій в термосилових полях і газових потоках Інституту проблем міцності імені Г.С. Писаренко НАН України, вул. Садово-ботанічна, 2, м. Київ, Україна, 01014, тел.: +380500602734. [E-mail: beryuza@ukr.net](mailto:beryuza@ukr.net) <https://orcid.org/0000-0002-2438-1333>

**Лопата Олександр Віталійович** – доктор філософії, старший науковий співробітник відділу міцності матеріалів і елементів конструкцій в термосилових полях і газових потоках Інституту проблем міцності імені Г.С. Писаренко НАН України, вул. Садово-ботанічна, 2, м. Київ, Україна, 01014, тел.: +380632217604. [E-mail: lopata-sasha@ukr.net;](mailto:lopata-sasha@ukr.net) <https://orcid.org/0000-0001-5266-6486>

**Рибак Ілля Петрович** - доктор філософії, доцент кафедри виробництва, ремонту та матеріалознавства Національного транспортного університету, вул. Михайла Омеляновича-Павленка, 1, Київ, Україна, 01010. тел. 097-214-78-31. [E-mail: ilya.0003@ukr.net](mailto:ilya.0003@ukr.net) <https://orcid.org/0000-0002-2071-5754>

**Солових Андрій Євгенович** - канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного університету, пр.

---

Університетський, 9, м. Кропивницький, Україна, 25006, тел.: +38 0522 390 4 33, E-mail: [andreisolvuh@gmail.com](mailto:andreisolvuh@gmail.com) <https://orcid.org/0000-0003-2019-0609>

**Катеринич Станіслав Євгенович** - канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного університету, проспект. Університетський, 9, м. Кропивницький, Україна, 25006, тел.: +38 0522 390 4 33, E-mail: [katerinichs@ukr.net](mailto:katerinichs@ukr.net) <https://orcid.org/0000-0003-2019-0609>

**Lopata Larisa** - candidate of technical sciences, associate professor, senior researcher of the department of strength of materials and structural elements in thermoforce fields and gas flows, G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of National Academy of Sciences of Ukraine, 2, Salovo-botanical Street, Kyiv, Ukraine, 01014, E-mail: [beryuza@ukr.net](mailto:beryuza@ukr.net), ORCID: [0000-0002-2053-9252](https://orcid.org/0000-0002-2053-9252)

**Oleksandr Lopata** - Ph.D in Technical Sciences, associate professor, senior researcher of the department of strength of materials and structural elements in thermoforce fields and gas flows, G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of National Academy of Sciences of Ukraine, 2, Salovo-botanical Street, Kyiv, Ukraine, 01014, E-mail: [lopata-sasha@ukr.net](mailto:lopata-sasha@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0001-5266-6486>.

**Ілля Рыбак** – Doctor of Philosophy, Associate Professor of the Department National Transport University, Omelianovicha-Pavlenka st., 1, Kyiv, Ukraine, 01010. Kyiv, Ukraine, тел. 097-214-78-31. E-mail: [ilya.0003@ukr.net](mailto:ilya.0003@ukr.net) <https://orcid.org/0000-0002-2071-5754>

**Andrey Solovykh** - candidate of technical sciences, dotsent of the department of operation and repair of machines, Central Ukrainian National Technical University. 9, University Ave., Kropyvnytskyi, Ukraine, 25006. E-mail: [andreisolvuh@gmail.com](mailto:andreisolvuh@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5780-3582>

**Stanislav Katerinich** - candidate of technical sciences, dotsent of the department of operation and repair of machines, Central Ukrainian National Technical University. 9, University Ave., Kropyvnytskyi, Ukraine, 25006. E-mail: [katerinichs@ukr.net](mailto:katerinichs@ukr.net) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-30520747>

---

*L. LOPATA, O. LOPATA, I. RYBAK, A. SOLOVYKH, S. KATERINICH*

### INTEGRATED TECHNOLOGIES CREATION OF WEAR-RESISTANT COATINGS

The study investigates the behavior of interlayer hybrid polymer composite materials (HPC) based on carbon and glass fabric under static tension, considering the specific features of their deformation. Hybrid composites based on carbon and glass fabric with different layer stacking schemes by vacuum forming are studied. The results show that the deformation of HPC under tension in the longitudinal direction is complex and is accompanied by the occurrence of various processes that dominate at certain stages of elongation of the studied sample under load. Deformation diagrams for HPC samples were obtained, revealing a nonlinear deformation response in the strain range of 0.25–0.8%. This nonlinearity is attributed to increasing stress concentrations in the polymer matrix, intensified plastic deformation, matrix cracking, interfacial delamination, and load transfer to the reinforcing fibers. Two points of rupture of the samples during uniaxial tension were determined: the first rupture is caused by brittle fracture of carbon fibers, the second rupture is associated with the destruction of glass fibers by the pulling mechanism. The formation of an 8-layer HPC with two outer layers based on structural roving glass fabric and two layers of unidirectional carbon fabric parallel to the applied load and four inner layers of satin weave glass fabric provides a maximum tensile strength of 660.7 MPa (first rupture), a tensile strength of 275.5 MPa (second rupture) with a maximum relative elongation of the composite of 1.88%. The results of the research are relevant in the development of interlayer HPCs by combining carbon and glass fibers in order to achieve high strength of the HPC through carbon fiber and improved energy absorption processes due to plastic deformation of glass fibers in the structure of the hybrid composite.

**Keywords:** coating, integrated technologies, wear resistance, durability

#### References

1. Pokrytyia y ykh yspolzovanye v tekhnike // V kn. «Prochnost materialov y konstruksyi», p/red. V.T.Troshchenko – 2-e yzd. K.: Akademperryodyka, 2006. S.981-1074.
2. Liashenko B.A., Movshovych A.Ia., Dolmatov A.Y. Uprochniaiushchye pokrytyia dyskretnoi struktury. Tekhnologicheskyye systemy. 2001. №4(10). S.17-25.
3. Novykov N.V., Будный А.А., Liashenko B.A. y dr. Metody uprochneniya poverkhnostei mashynostroytelnykh detalei. K.: YSM AN USSR, 1989. 112 s.
4. Liashenko B.A., Tsyhulev O.V., Kuznetsov P.B. Neobkhodymo ly vsehda povyshat adhezyonnuiu prochnost zashchytnykh pokrytyi. Problemy prochnosti. 1987. № 5. S.70-74.
5. Pokhmurska H.V., Dovhunyuk V.M., Student M.M. Znosostiikist lazerno modyfikovanykh elektroduhovyykh poryviv z poroshkovoho drotu FMI-2. FKHM. 2003. 39, № 4. S.61-64.
6. Panin V.E., Klimenov V.A., Bezboroda V.P. et al. Forming the structure and phase composition of coatings by plasma spraying and influence of powerful ultrasound and laser radiation on them. Adv. Mater. and Process.: 2nd Sino-Rus Symp., Xian (Oct. 8-13, 1993, Xian). 1994. C.479-483.
7. Longa Yrene, Shinya Masanobu, Takemoto Mikio. Coatings of aluminide intermetallic compounds on steel utilizing a hybrid technique of spraying and IR-laser fusion. Mater. and Manuf. Processes. 1994. 9, № 3. S.495-505.
8. Longa Y., Takemoto M. Laser processing of high-chromium nickel-chromium coatings deposited by various thermal spraying methods. Corrosion (USA). 1994. 50, № 11. S.827-837.
9. Tolochko N.A., Arshynov K.Y., Semashko V.M. y dr. Lazerno modyfytsyrovanye pokrytyi NiCrFe-50%Cr3C2 Mater., tekhnol., ynstrum. 2001 6, № 2. S.60-63.

10. Podcherniaeva Y.A. Lazernoe oplavlenye hazotermicheskykh pokrytyi na osnove kortynyta. Tekhnol. y orhan. pr-va. 1992. № 2. S.42-43.

11. Hlebova M.A., Kornev A.B., Hlebov V.V. y dr. Povyshenye kachestva hazotermicheskykh pokrytyi pry termicheskoj obrabotke tokamy vysokoi chastyoty y lazernym luchom. Svaroch. pr-vo. 2004. №6. S.43-46.

12. Becker R., Sepold G. Nachbehandlung von Spritzschichten durh Hochleistungslaser. Metalloberfläche. 1987. 41, № 7. S. 329-332.

13. Antsyferov V.N., Shmakov A.M., Yvshyna N.N. Lazernaia obrabotka plazmennonapylennykh na poroshkovuiu stal pokrytyi. Poroshk. Metallurhyia. 1992. №10. S. 25-28.

14. Pat. 6229111 USA, B23K 9/04. Method for laser / plasma surface alloying. Opubl. 08.05.2001.

15. Hannotiau M., Leunen J., Sleurs J. et al. Upgrading of plasma sprayed coatings by laser treatment to corrosion resistance and hot isostatic pressing for wear resistance. Plasma Surface Eng.: Pap. 1st Int. Conf., Garmisch-Partenkirchen (19-23 Sept., 1988, Oberursel). 1989. Vol.1. C. 387-394.

16. Kunlin Wang, Zhirui Tian, Chongbin Yang et al. Povyshenye yznosostoikosty splavov Al-Si lazernoi pereplavkoi. Jinshu rechuli = Heat Treat. Metals. 1994. №10. S. 3-5.

17. Liang G., Li C., Su J. et al. Mykrostruktura plazmennoho pokrytyia na aliumynyevom splave posle lazernoi obrabotky. Chin. J. Nonferrous Metals. 1998. 8, № 1. S. 28

18. Pohrebniak A.D., Kravchenko Yu.A., Vasyliuk V.V. y dr. Struktura y svoistva poroshkovoho pokrytyia na osnove Ni posle oplavlenyia poverkhnosty kontsentryrovannymy potokamy enerhyi. FyKhOM. 2005. №1. S. 35-41.

19. Simunovic K., Franz M., Maric G. Investigation and estimation of residual stress in flame sprayed and fused NiCrBSi coatings. Metalurgija. Zagreb. 2008. 47, №2. S. 93-97.

20. Jie X., Mao Z. Struktura y svoistva napylennoho plazmoi pokrytyia NiCrBSi, pereplavlennoho v pechy. Jinshu rechuli = Heat Treat. Metals. 1996. №8. S. 15-17.

21. Belotserkovskiy M.A., Kukareko V.A., Azyzov R.O. Poluchenye yznosostoikykh pokrytyi aktyvyrovannym hazotermicheskyim napylenyem s posleduiushchym modifytsirovanyem. Vopr. materialoved. 2004. №2. S.77-87.

22. Yang Y., Shen Y., Chen J. et al. Pokrytye yz nanokrystallicheskohe nykelia, poluchennoe metodom pulsyruyushcheho elektrosazhdenyia, sovmeshchennoho s ultrazvukovoi aktyvatsyei. Jinshu xuebao = Acta met. sin. 2007. 43, №8. S. 883-888.

23. Rie K.-T., Methe E., Bulak A. Plasmanitrieren und – nitrocarburierten von galvanisch abgeschiedenen rißarmen chromschichten und Hartchrom. Galvanotechnik. 1995. 86, №7. S. 2225-2229.

24. Dasgupta A., Kuppusami P., Vijayalakshmi M. et al. Pulsed plasma nitriding of large components and coupons of chrome plated SS316LN stainless steel. J. Mater. Sci. 2007. 42, №20. S. 8447-8453.

25. Pat. № 31198 Ukrainy, S23S 8/02. Sposib kombinovanoi lazero-khimiko-termichnoi obrobky stalevykh vyrobiv. Opubl. 25.03.2008, Biul. № 6.

26. Korniienko A.O., Yakhia M.S., Ishchuk N.V. ta in. Formuvannia pokryttiv trybotekhnichnoho pryznachennia kombinovanoi lazero-khimiko-termichnoi obrobkoiu. Probl. Tertia ta znoshuvannia: Nauk.-tekhn. Zb. K.: NAU, 2008. Vyp. 49. T.2. S. 61-65.

27. Pat. 19551 Ukraina, S23S 8/02. Sposib kombinovanoi lazerno-khimiko-termichnoi obrobky materialiv / M.V. Kindrachuk, N.V. Ishchuk, V.M. Pysarenko ta in. Opubl. 15.12.06. Biul. №12.

28. Pat. 25412 Ukraina, S23S 8/02. Sposib otrymannia znosostiikykh dyskretnykh azotovanykh shariv / Kindrachuk M.V., Ishchuk N.V., Pysarenko V.M. ta in. Opubl. 10.08.07, Biul. № 12.

29. Kindrachuk M.V., Yakhia M.S., Korniienko A.O. ta in. Vyznachennia parametriv dyskretnoi struktury pokryttiv trybotekhnichnoho pryznachennia. Probl. tertia ta znoshuvannia: Nauk.-tekhn. zb. K.: NAU. 2008. Vyp. 50. S.5-15.

30. Bell T., Bloyce A. Nitriding laser treated titanium bearing low alloy steels. "Haet. Treat.: 84: Proc. Int. Conf., (London, 2-4 May, 1984). London. 1984. 36/1-36/7.

31. Bergmann H.W., Müller D., Amon M. et al. Kombination des Laser-strahlhärtens mit einer Kurzzeiterbebehandlung. Harter. – Techn. Mitt. 1993. 48, № 4. S. 238-247.

32. Tarelnyk V. Ionne azotuvannia kvazibahatosharovykh elektroeroziinykh pokryttiv. Mashynoznavstvo. 1999. №6. S. 31-33.

33. Tarelnyk V.B., Martsynkovskiy V.S. Uprochnenye y remont otvetstvennykh detalei mashyn metodom elektroerozyonnoho lehyrovannia. Tiazh. mashynostr. 2005. №2. S.28-32.

34. Vais E., Radek N. Эксплуатационные свойства покрытия типа Cu-Mo y Cu-Ti, модифицированных лазерным лучом. Probl. tertia ta znoshuvannia: Nauk.-tekhn. zb. K.: NAU, 2008. Vyp. 49. T.2. S.104-111.

35. Khranovskaia E.N. Massoperenos, strukturnye y fazovye yzmeneniya v zheleze y medy pry ykh lehyrovanny v usloviakh temperaturnykh hradyentov. Avtoref. ... kand. tekhn. nauk, YMF ym. H.V. Kurdiymova NAN Украйны, Kyev. 2008. 20 s.

36. Luo Hong, Liu Jiajun, Liu Fen et al. Vlyianye lazernoho uprochneniya za schet fazovoho prevrashcheniya na yonno-azotyrovannyy sloi. Chin. J. Lasers. A. 1995. 22, №4. S. 313-316.

37. Tong W.P., Liu C.Z., Wang W. et al. Gaseous nitriding of iron with a nanostructured surface layer. Scr. mater. 2007. 57, №6. S.533-536.

38. Lin Yimin, Lu Jian, Wang Liping et al. Surface nanocrystallization by surface mechanical attrition treatment and its effect on structure and properties of plasma nitrided AISI 321 stainless steel. Acta mater. 2006. 54, №20. S. 5599-5605.

39. Jie X., Mao Z. Struktura y svoistva napylennoho plazmoi pokrytyia NiCrBSi, pereplavlennoho v pechy. Jinshu rechuli = Heat Treat. Metals. 1996. №8. S. 15-17.