

УДК 629.735.018.4:620.178.16(045)

**В.В. Щепетов**, д-р техн. наук  
**А.Г. Довгаль**  
**Л.В. Бурдюженко**

## ЕЛЕКТРОІСКРОВЕ ЛЕГУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

Інститут транспортних технологій НАУ, e-mail: itt@nau.ua

*Проведено системний аналіз існуючих методів поверхневого зміцнення та порівняння їх особливостей з електроіскровим легуванням. Доведено перспективність застосування електроіскрового легування. Виявлено позитивний вплив електроіскрового легування на зносостійкість деталей авіаційної техніки*

### Постановка завдання

Кількість способів поверхневого зміцнення весь час збільшується, що певним чином ускладнює умови роботи конструкторів і технологів.

Різноманітність деталей і конструкційних матеріалів, складу покриттів і засобів для їх нанесення, а також вимог до умов експлуатації обумовлює необхідність проведення дослідних пошуків оптимальних рішень для проєктованих систем тертя.

Відсутність ідентичних умов, методик порівняльної оцінки експлуатаційних якостей покриттів, визначення ресурсомісткості та вартості обладнання не дозволяє вважати оптимальними деякі конструктивні рішення, що визначають вибір матеріалів, способів і режимів поверхневого зміцнення.

Нові стандарти й економічні умови значно підвищують вимоги до економічних та екологічних параметрів технологічних процесів поверхневого зміцнення.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Найрозповсюдженим способом зміцнення поверхневого шару деталей натеper є хіміко-термічна обробка (ХТО), яка дозволяє змінювати хімічний і фазовий склад поверхневого шару та градієнт властивостей деталей у напрямку від поверхні до серцевини. Це досягається за рахунок дифузійного насичення поверхневого шару яким-небудь елементом, що знаходиться в атомарному стані і здатний розчиняється в металі оброблюваної деталі.

Хіміко-термічна обробка забезпечує підвищення зносостійкості деталей через збільшення твердості поверхневого шару. Виникнення в поверхневому шарі великих залишкових напружень стиску сприяє підвищенню міцності від утомленості.

Деякі види ХТО дозволяють підвищити стійкість проти корозії як при нормальних, так і при високих температурах.

Найбільшого застосовування набули методи насичення поверхневих шарів ХТО:

- азотування;
- борування;
- ціанування;
- дифузійна металізація (хромування, алітування);
- цементація.

Але методи ХТО мають ряд недоліків, що стримують їх широке поширення, а саме:

- методи ХТО потребують дуже високих температур і тривалої обробки;
- майже всі види дифузійного насичення потребують подальшої фінішної обробки;
- умовою якісного зміцненого шару є потреба в ретельній підготовці поверхні;
- усі методи ХТО призводять до забруднення великої кількості води;
- методи ХТО потребують енергетичних та матеріальних витрат у 80–100 разів більше, ніж електроіскрове легування (ЕІЛ) [1].

Одним із прогресивних методів поверхневого зміцнення деталей і особливо відновлення їх первісних розмірів – це газотермічне напилювання (плазмове, детонаційне і газоплазмове).

Характерною особливістю цього метода є одночасний вплив на розпилений метал високотемпературного джерела теплоти і кінетичної енергії газового струменя. При цьому температура поверхні оброблюваної деталі не перевищує 300°C.

Невелике нагрівання і незначна деформація основи в процесі нанесення газотермічних покриттів, можливість нанесення їх тільки на задані ділянки деталі визначають високу технологічність цього методу напилювання для підвищення зносостійкості.

Технологія плазмового напилення дозволяє наносити покриття майже з усіх відомих тугоплавких матеріалів.

Плазмові покриття з молібдену, вольфраму, оксидів деяких тугоплавких з'єднань, інтерметалідів дозволяє вирішувати ряд важливих технічних завдань: підвищувати стійкість металургійного устаткування, інструменту. Мікротвердість

газоплазмового покриття становить 300-500 кг/мм<sup>2</sup>, що в 1,5 і 2 рази нижче від аналогічних покриттів, нанесених методом електроіскрового легування.

Поряд з цим газотермічні методи мають такі недоліки:

- покриття недостатньо щільні (пористість становить 6–12 %) і недостатньо міцно з'єднані з основою (міцність зчеплення на відрив досягає 15–40 МПа);

- перед нанесенням покриття – обов'язкова підготовка поверхні;

- ручний спосіб нанесення на повітрі характеризується шумом, що перевищує 120 дБ, пилом із дрібних частинок напилюваного матеріалу в навколишньому середовищі, ультрафіолетовим випромінюванням від плазмового потоку, що негативно впливає на оператора;

- окиснювання розплавлених частинок порошку в повітряному середовищі негативно впливає на властивості покриттів;

- обов'язкова обробка покриття після його нанесення.

Крім того, до обслуговування газотермічних установок допускаються лише кваліфіковані фахівці [1; 2].

Одне з перших місць у підвищенні зносостійкості деталей машин і механізмів займає електролітичний метод, яким створюються зносостійкі, антифрикційні, корозійностійкі, ерозійно стійкі покриття, застосовувані для зміцнення деталей.

Для ремонту деталей авіаційної техніки застосовують різні види гальванічних покриттів. Найпоширенішого застосування набули:

- хромування;
- нікелювання;
- цинкування;
- кадмування.

Особливе місце займає електролітичне хромування, призначене для заповнення розмірів зношених деталей, а також для підвищення їх зносостійкості. При цьому товщина покриттів може досягати до 0,3 мм.

Електролітичний хром має високу твердість і зносостійкість, не змінює своїх властивостей при підвищеній температурі і стійкий проти корозії. Електролітичне хромування забезпечує мікротвердість HV 1000–1100 МПа.

Гальванічні покриття з Cr – Ni сплавів з домішками Si й V при твердості 30–65 HRC мають зносостійкість у 20 разів вище, ніж сталь такої самої твердості. Істотно підвищують зносостійкість електролітичних покриттів домішки оксидів, карбідів, боридів.

Однак електролітичний метод має ряд недоліків:

- незважаючи на високу адгезійну міцність, товсті хромові покриття через підвищену крихкість схильні до відшарування при вигині;

- композиційні електролітичні покриття при великих швидкостях відшаровуються вже при напруженні  $P = 0,5$  МПа;

- перед нанесенням покриття обов'язкова підготовка поверхні і його фінішна обробка;

- велика витрата води, її забруднення і токсичність;

- витрата електроенергії, що перевищує електроіскрове легування більш ніж у 120–150 разів;

- гальванічні покриття знижують міцність від утомленості деталей, втрати міцності досягають 45 % від вихідного значення [2].

Розповсюджений метод поверхневого зміцнення деталей – лазерна обробка, що дозволяє створювати на їх робочих поверхнях структури, що мають оптимальні експлуатаційні властивості.

Великі швидкості нагрівання й охолодження ( $10^3$ – $10^4$  °C/c), високі температури (до 1500°C і більше), мінімальний час релаксації металу (близько  $10^{-11}$  с), великі значення питомого навантаження енергії сприяють виникненню великих градієнтів температури, а отже, і теплових потоків, що викликають утворення метастабільних структур.

Енергія, що припадає на одну частинку в лазерному промені, у 10–100 разів перевищує енергію переходу атома з кристалічного в газоподібний стан (40–900 Дж/моль).

Процес лазерного зміцнення має ряд особливостей, що вигідно відрізняють його від інших методів зміцнення:

- можливість одержання на поверхні матеріалу шару із заданими властивостями через введення легувальних елементів;

- локальність процесу зміцнення;

- можливість зміни властивостей у важкодоступних місцях;

- безконтактність способу;

- відсутність короблення у разі лазерної обробки;

- одержання заданої шорсткості поверхні;

- корозійна стійкість поверхневих шарів;

- автоматизація процесу обробки;

- висока культура виробництва.

Недоліками цього способу поверхневого зміцнення є:

- зменшення глибини зміцнення при малих швидкостях променя внаслідок дії плазми, що екранізує;

- устаткування для лазерної термообробки в 100 разів дорожче від устаткування для електроіскрового легування;

– потреба у підвищенні технічної культури обслуговуючого персоналу;

– необхідність дуже ретельного контролю параметрів обробки [3].

Для зміцнення деталей також одержало поширення іонне азотування (ІА). Порівняно з іншими видами ІА забезпечує значно більшу глибину зміцненого шару. Широко використовуються покриття товщиною 155–270 мкм.

Іонне азотування підвищує міцність від утомленості загартованих випалених сталей на 20–40 % і знижує чутливість до концентрації напруг, підвищуючи на 60–70 % міцність від утомленості для зразків з надрізами. Іонне азотування забезпечує можливість знизити температуру відпуску, що підвищує механічні властивості серцевини.

Іонна імплантація дозволяє зміцнювати поверхню при більш низьких температурах процесу. Ефект зміцнення з'являється при легуванні іонами хрому й нікелю на глибину до 25 нм. Іонна імплантація на швидкорізальних сталях забезпечує мікротвердість HV 1800–2400 МПа.

Іонне азотування сталі дозволяє підвищити її зносостійкість у 60 разів, а іонна імплантація ітрію на деталі паливних насосів підвищує зносостійкість порівняно з гальванічним хромом у сотні разів. Але застосування цього методу обмежують:

- обов'язкова попередня підготовка поверхні;
- велика вартість устаткування;
- необхідність навчання персоналу [4].

**Мета** статті – запропонувати оптимальний екологічно чистий метод для зміцнення деталей авіаційної техніки, виготовлених з алюмінієвих сплавів, що має низьку температуру процесу, формує зносостійку поверхневу структуру.

### Електроіскрове легування

Ефективним методом поверхневого зміцнення деталей авіаційної техніки, виготовлених зі звичайних конструкційних матеріалів є ЕІЛ, яке дозволяє одержувати покриття, міцно зчеплене з матеріалом основи з високими експлуатаційними характеристиками.

Процес ЕІЛ заснований на переважному руйнуванні (ерозії) матеріалу анода при іскровому розряді.

Основні закономірності та явища, що визначають процеси ЕІЛ, залежать від матеріалу легувального електрода й режимів обробки.

Поверхневий шар деталі зміцнюється не тільки за рахунок осадження матеріалу анода, але й у результаті взаємодії цього матеріалу з основою й утворення твердих розчинів, хімічних з'єднань, оксидів, нітридів.

Ефект зміцнення при ЕІЛ збільшується ще і тому, що відбувається імпульсний вплив температур

і тисків, що призводить до здрібнювання структури й утворення нових фаз [5].

Як електроди (анооди) знаходять застосування легкоплавкі метали, полі-, монокристали перехідних металів IV–VI груп, їх з'єднання з бором, вуглецем, азотом, а також стандартні тверді сплави.

Глибина і твердість зміцненого шару залежать від потужності режиму зміцнення.

Зносостійкість і міцність від утомленості деталей машин, зміцнюваних електроіскровим легуванням значною мірою залежать від режимів зміцнення і матеріалу зміцнюваного електрода.

Електроіскрове зміцнення робочих поверхонь валків прокатних станів гарячої прокатки, лопаток крильчаток дробоструминних апаратів, букс для роликівих підшипників, ножів землечерпалок підвищує їх зносостійкість у два-три рази, а електроіскрове зміцнення ферохромовим електродом лопаток турбін значно збільшує їх корозійну стійкість.

Порівняно з зазначеними методами поверхневого зміцнення ЕІЛ має такі переваги (див. таблицю):

- висока міцність зчеплення нанесеного матеріалу з матеріалом основи (за рахунок механічного перемішування і взаємного дифузійного проникнення легувальних матеріалів у шар, що формується);
- деталь не нагрівається в процесі легування, що не приводить до зміни її фізико-механічних властивостей і геометрії;
- енергоємність процесу в 100 разів менша, ніж плазмового напилювання;
- можливість місцевого зміцнення окремих ділянок деталі без розбирання всього агрегату;
- споживана потужність установок 0,5–3,5 кВт;
- екологічно чистий, сухий і простий технологічний процес;
- малогабаритне і транспортабельне устаткування;
- фінішна обробка покриттів дискретної структури методами поверхнево-пластичного деформування без зняття стружки;
- можливість відновлення зношених деталей по епюрі зносу диференціальними дискретними покриттями перемінної суцільності;
- оброблювані поверхні не потребують попередньої підготовки [6].

Метод ЕІЛ дотепер не одержав достатнього поширення, але він дуже перспективний для нанесення покриттів, що мають високу стійкість в умовах тертя ковзання, кочення в присутності абразиву в широкому інтервалі температур, високу емісійну здатність, а також для ремонтної практики.

## Характеристика методів відновлення та зміцнення поверхонь деталей

Метод	Товщина відновленого та зміцненого шару, мкм	Температура нанесення покриття, °С	Тривалість процесу обробки, продуктивність	Потреба в попередній та фінішній обробці	Екологічна чистота процесу	Економічні затрати на реалізацію методу
Електроіскрове легування	15...1000	30...42	0,25...12 см <sup>2</sup> /хв.	Немає	Екологічно чистий процес	0,45...1,35 грн/год
Хіміко-термічна обробка: цементация; нітроцементация; борування; азотування; твердофазове борування;	900...1000 50...750 75...750 90...100 100...180	920...950 550...950 850...880 800...1000 850...950	6...8 год 60 год 2...12 год 3...6 год 6 год	Є	Агресивність розплавів, пари шкідливих речовин, значне використання води, забруднення	У 80...100 разів більше, ніж при ЕІЛ
Газотермічна наплавка: газоплазмові покриття; детонаційні покриття	10...800 8...1000	250...350 50...250	1...10 кг/год 0,1...6 кг/год	Є	Шум (140 Дб)	У 30...40 разів більше, ніж при ЕІЛ
Гальванічні покриття	1,5...300	50...60	1,5...6 год	Є	Екологічно шкідливий процес	У 120...150 разів більше, ніж при ЕІЛ
Лазерна обробка	150...1000	200...250	200 см <sup>2</sup> /хв.	Є	Небезпечний процес	У 90...100 разів більше, ніж при ЕІЛ
Вакuumне осадження: хіміко-термічна обробка в тліючому розряді; іонна імплантация	150...270 0,05...150	300...860 до 150	0,1...36 год 6 год	Є	Екологічно шкідливі процеси	У 90...100 разів більше, ніж при ЕІЛ
Наплавка	5000	1120...1200	0,2...10 см <sup>2</sup> /хв	Є	Екологічно шкідливий процес	У 15...20 разів більше, ніж при ЕІЛ

Тепер ЕІЛ можна використовувати для збільшення надійності та довговічності деталей машин і механізмів, апаратів і приладів, легування робочих поверхонь інструмента для збільшення його зносостійкості, розмірного відновлення деталей.

### Висновки

За деякими ознаками ЕІЛ можна розглядати як сучасну альтернативу традиційним технологіям поверхневого зміцнення. Тенденція розвитку ЕІЛ передбачає заміну дорогих тугоплавких компонентів новими, більш дешевими, але ефективними композиціями з матеріалів ресурсної бази України, що робить його досить привабливим для дослідження та застосування у виробництві для зміцнення та відновлення зношених деталей авіаційної техніки.

### Список літератури

1. *Методы упрочнения поверхностей машиностроительных деталей* / Новиков Н.В., Бидный А.А., Ляшенко Б.А. и др. – К.: Ин-т сверхтвёрдых материалов, 1989. – 112 с.

2. *Ляшенко Б.А., Клименко С.А.* Тенденция развития упрочняющей поверхностной обработкой и положение в Украине // Сучасне машинобудування. – 1999. – № 1. – С. 94–104.

3. *Антонюк В.С., Дигам М.С.* Новое в формировании упрочняющих покрытий фрикционных поверхностей // Сучасне машинобудування. – 1999. – № 1. – С. 105–110.

4. *Максимович Г.Г., Шатинский В.Ф., Копілов В.И.* Физико-химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытием. – К.: Наук. думка, 1983. – 264 с.

5. *Верхотуров А.Д., Муха И.М.* Технология электроискрового легирования. – К.: Техніка, 1980. – 187 с.

6. *Самсонов В.Г., Верхотуров А.Д., Говтун Г.Н., Сычев В.С.* Электроискровое легирование поверхностей. – К.: Наук. думка, 1976. – 283 с.

Стаття надійшла до редакції 24.09.03.

В.В. Щепетов, А.Г. Довгаль, Л.В. Бурдюженко

Электроискровое легирование для повышения триботехнических характеристик деталей авиационной техники

Проведены системный анализ существующих методов поверхностного упрочнения и сравнение их особенностей с электроискровым легированием. Доказана перспективность применения электроискрового легирования. Обнаружено положительное влияние электроискрового легирования на износостойкость деталей авиационной техники.

V.V. Shchepetov, A.G. Dovgal, L.V. Burduzhenko

Electro-sparck alloying for raising the tribotechnical features of aircraft technology details

System analysis of existing methods surface hardening and comparison of their particularities with electro-sparck alloying is made. Advantage of using electro-sparck alloying is proved and that is a reason for its investigation. Positive influence electro-sparck alloying on wear resistance is discovered