

doi: 10.32620/oikit.2025.106.06

УДК 538.95

Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв,
О. Д. Семененко, О. В. Торосян.

Підвищення ефективності деталей машин та різального інструменту комбінованими методами обробки

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

Комбіновані механізми зміцнення значно покращують експлуатаційну довговічність різального інструменту (PI) та деталей машинобудування. Застосування одночасної іонної імплантації разом із плазмовим нанесенням покриттів на основі молібдену та вольфраму забезпечує зростання зносостійкості сталевих деталей у 2–10 разів порівняно з матеріалами, обробленими лише покриттям. Аналогічно, для твердих і швидкорізальних сплавів комбінація іонно-плазмового азотування з нітридними покриттями підвищує зносостійкість у 1,5–3 рази. Ефективність таких покриттів і модифікованих шарів визначається параметрами інтегрованих технологій, такими як енергія іонів, флюєнс, температура субстрату та склад плазмової атмосфери. Дослідження демонструють, що комбіноване зміцнення сприяє формуванню наноструктурованих шарів, що призводить до мікротвердості до 46 ГПа, збільшенню ресурсу різального інструменту до 6,5 разів, зносостійкості деталей до 6 разів, корозійної стійкості до 3,7 раза та втомної міцності до 1,7 раза. Особливо показовим є зростання втомної міцності, яке підтверджує утворення наноструктур під час комбінованої обробки. Ці наноструктури, такі як нанокомпозити з зернами розміром 10-50 нм, перешкоджають поширенню тріщин і підвищують пластичність поверхні. Для глибшого розуміння, іонна імплантація включає прискорення іонів (наприклад, N⁺ або C⁺) до енергій 50-200 кеВ, що модифікує поверхню на глибині до 1 мкм. Плазмове нанесення, як PVD або CVD, осаджує шари товщиною 1-10 мкм, створюючи бар'єр проти зносу. Комбінація цих методів синергетично покращує адгезію, зменшуючи деламінацію в 1,5-2 рази. У практиці, для сталевих деталей типу 42CrMo4, таке оброблення застосовується в машинобудуванні для шестерень і валів, подовжуючи термін служби в агресивних середовищах. Це особливо ефективно для фрез і свердел, де знос зменшується за рахунок зниження коефіцієнта тертя до 0,1-0,3. Перспективи розвитку включають інтеграцію з адитивними технологіями для градієнтних структур, що дозволить досягти ще вищих показників стійкості. Загалом, комбіноване зміцнення є ключовим для сучасного матеріалознавства, забезпечуючи економію ресурсів і підвищення надійності обладнання в галузях від машинобудування до аерокосмічної галузі.

Ключові слова: комбінована обробка, зміцнення поверхневого шару, підвищення зносостійкості, термін служби деталі, різальний інструмент, підвищення продуктивності обробки.

Вступ

Сучасні виклики машинобудування — від авіаційно-космічної техніки до важкого обладнання — вимагають матеріалів і покриттів, здатних працювати в екстремальних умовах: високі температури, агресивні середовища, циклічні навантаження. Традиційні методи (термообробка, напилення, лазерне легування) вже вичерпують свій потенціал, тоді як комбіновані підходи зміцнення відкривають принципово нові можливості.

Аналізуючи ключові властивості плазмово-іонних, іонно-променевих та лазерних (світлопроменевих) методів обробки матеріалів [4-10], можна побачити, що кожна з цих технологій має свої обмеження. Наприклад, плазмово-іонна обробка не дозволяє наносити покриття товщиною до 100 мкм, оскільки через

накопичення залишкових напружень виникає ризик розтріскування. Лазерні технології забезпечують зміцнення матеріалу на значну глибину, але поверхневий шар часто не отримує достатньої міцності. Крім того, як плазмово-іонні, так і лазерні методи не завжди ефективно підвищують втомну міцність матеріалів. Однак, комбінуючи різні підходи, вдається компенсувати ці слабкі сторони та досягти кращих результатів.

Навіть поверховий огляд процесів, що базуються на іонних, електронних, лазерних та плазмових потоках, демонструє їхній значний потенціал для модифікації поверхонь [7]. Водночас, для покращення якості, підвищення продуктивності та набуття унікальних характеристик оброблюваних деталей необхідно розробляти комбіновані методи зміцнення. Можливі комбінації не обмежуються двома технологіями – перспективними є варіанти з трьома або навіть чотирма процесами. Такі інтегровані підходи мають високу ефективність і відкривають нові горизонти, але вимагають модульного принципу конструювання обладнання, що полегшує поєднання кількох систем в одній установці.

Понад чверть століття систематичних досліджень дозволили досягти разючих результатів у галузі поверхневого зміцнення. Застосування комбінованих іонно-плазмових технологій забезпечило зростання ресурсу різального інструменту в 20–65 разів, зносостійкості машинних деталей – у 1,8–60 разів, а мікротвердість нанесених шарів (зокрема, композиції $0,2\text{HfN}+0,8\text{ZrN}$) сягнула 46 ГПа [7–15]. Водночас корозійна стійкість зросла в 2–3,7 раза, а втомна міцність — у 1,5–1,7 раза, що стало несподіваним для фахівців, адже традиційні методи зміцнення зазвичай знижують цей показник. Примітно, що всі ці покращення досягнуто без погіршення шорсткості поверхні чи порушення геометричної точності виробів (див. огляди в книгах [1–5]).

Такі аномально високі характеристики не могли бути пояснені лише дифузійним насиченням чи формуванням стандартних нітридних фаз. Вони вказують на активацію глибоких структурних перетворень – як у самому покритті, так і в прилеглих шарах основного матеріалу. Ці процеси, ймовірно, пов'язані з утворенням наноструктурованих зон із підвищеною щільністю дефектів, синергетичними ефектами іонного легування та фазовими переходами під впливом плазмового середовища. Саме аналіз цих явищ становить основу даної роботи, яка спрямована на розкриття механізмів надвисокої експлуатаційної стійкості та розробку науково обґрунтованих рекомендацій для промислового впровадження комбінованих механізмів зміцнення. Це особливо актуально для вітчизняної промисловості, де імпортозаміщення та ресурсозбереження є стратегічними пріоритетами.

Сучасні дослідження в цій сфері акцентують увагу на інтеграції з цифровими технологіями [26]. Наприклад, використання штучного інтелекту для оптимізації параметрів обробки може зменшити залежність від кваліфікації оператора. Аналізуючи бар'єри впровадження комбінованих методів зміцнення, виділяють такі проблеми: якість кінцевого продукту сильно залежить від людського фактора через складну взаємодію технологічних змінних і властивостей матеріалів; плазмово-іонні та іонно-променеві системи часто вимагають значних витрат металу; обладнання зазвичай вузько спеціалізоване, попри гнучкість у налаштуванні параметрів; автоматизація завантаження/вивантаження деталей або відсутня, або надто дорога; загальна вартість установок і процесів залишається високою; системи вакуумного відкачування не завжди забезпечують потрібну швидкість; бракує надійних

математичних моделей для прогнозування впливу параметрів на якість і продуктивність.

Щоб подолати ці виклики, останні розробки фокусуються на нанотехнологіях і екологічно чистих процесах. Наприклад, комбінація іонно-променевої обробки з лазерним напиленням вже застосовується в аерокосмічній промисловості для створення стійких до зносу покриттів на турбінних лопатках, що підвищує їхню довговічність на 20-30%. Крім того, інтеграція з 3D-друком дозволяє створювати багатoshарові структури з унікальними властивостями, такими як підвищена теплопровідність чи антикорозійний захист. Ці інновації не тільки розширюють застосування технологій, але й знижують витрати за рахунок масштабу виробництва. У майбутньому, з розвитком квантових обчислень, прогнозування результатів обробки стане ще точнішим, що прискорить перехід до промислового використання комбінованих систем.

1. Постановка задачі

Теоретичні основи виникнення наноструктур проаналізовано в публікаціях [1-6], де розглянуто принципові механізми, хоча конкретні режими та способи реалізації не були деталізовані. Подальші експериментальні дослідження [6, 7] встановили критичні умови для утворення наноструктур: локальні температури в діапазоні 700–1500⁰K, швидкості наростання температур понад 10⁷ К/с, величини тиску або температурної напруги порядку 10⁹ Па, а також наявність атомів каталізаторів утворення наноструктур.

Моделювання в роботах [8] і [9] підтвердило перспективність комбінованих підходів: поєднання плазмово-іонного осадження (ПІО) з іонним легуванням об'ємів (ІЛО) або лазерною обробкою (ЛО) створює синергетичний ефект, який забезпечує необхідну комбінацію енергетичних і кінетичних параметрів. Зокрема, імпульсне іонне бомбардування генерує високоградієнтні поля напружень, а плазмове середовище підтримує надвисокі швидкості дифузії та фазоутворення. Це відкриває шлях до контрольованого синтезу наноструктур безпосередньо в приповерхневих шарах без додаткового відпалу.

Додаткові дослідження [10–12] вказують на роль плазмових нестабільностей (мікродуги, плазмові струмені) як джерел локальних енергетичних сплесків, що підсилюють ефект. Встановлено, що навіть короточасне перевищення порогових значень температури та тиску достатньо для запуску самопідтримувальних процесів наноструктуризації. Таким чином, комбінована технологія не просто модифікує поверхню — вона ініціює каскад фазових і структурних перетворень, що охоплюють як покриття, так і перехідну зону до основного матеріалу.

У роботах [21–24] наведено результати експериментів з утворення наноструктур при комбінованому зміцненні різального інструменту, де показано, що для отримання наноструктур необхідні температури 700–2000 К, швидкості наростання температур понад 10⁵...10⁷ К/с, величини тиску або температурної напруги порядку 10⁸ ... 10⁹ Па та наявність атомів каталізаторів утворення наноструктур (Al, Ti, Cr, Co, Ni, ZrO₂).

Так, у роботі [35] показано, що при комбінованому термічному та механічному зміцненні (гаряче пресування + SPS) керамічних різальних інструментів (Al₂O₃ з ZrO₂) формування наноструктур (розмір зерен <100 нм) вимагає тиску 30–50 МПа (~3×10⁷–5×10⁷ Па), температури 1673–1873 К та каталізаторних добавок (TiC, SiC) для піннінгу зерен. Швидкість нагрівання >10⁴

К/с призводить до градієнтних наноструктур, підвищуючи зносостійкість у 2–4 рази під час обробки чавуну.

У [20] наведено дані про плазмово-дугове напилення наноструктурованих WC/10Co покриттів для твердосплавного інструменту при температурах ~2000–2500 К, швидкості нагрівання 10^6 К/с та каталізаторних центрах Со для повного розплавлення. Тиск плазми $\sim 10^8$ Па та термічні напруги на інтерфейсі визначають морфологію зерен 20–50 нм, покращуючи твердість (>2000 ГВ) та адгезію для високошвидкісної обробки.

У роботах [31–35] підтверджується критична роль каталізаторів при PVD нанесенні багат шарових наноструктурованих покриттів (Ti-Al-N/Cr-Al-N) на різальний інструмент: температури 773–973 К, швидке нагрівання $\sim 10^5$ нм/с осадження та імплантація Al (40–50 ат.%) створюють суперсатуровані розчини з еластичними напругами $\sim 10^9$ Па. Це стабілізує наноострівці (3–10 нм), підвищуючи окисну стійкість до 1173 К та термін служби інструменту у 3–5 разів при фрезеруванні.

Додатково, у [18] описано відпал вакуумних нанокристалічних $Al_{0.67}Ti_{0.33}N$ покриттів на цементних карбідах при 973–1173 К та швидкості охолодження 50 К/хв (від 1073 до 973 К), де каталізаторні Ti/Al атоми формують AlN-домени з напругами $\sim 10^8$ Па, покращуючи адгезію (65 Н) та зносостійкість на 140% при токарній обробці 42CrMo сталі.

У [19] продемонстровано гаряче пресування цементних карбідів (WC/Co) з наночастинками hBN при температурі ~ 1400 К, тиску 200 МПа ($\sim 2 \times 10^8$ Па) та каталізаторних металах (Fe, Co, Ni) для зменшення графітизації. Швидкість нагрівання $>10^5$ К/с забезпечує наноструктури з твердості >2000 ГВ, знижуючи знос на 2 рази та покращуючи адгезію покриттів для високошвидкісної обробки.

У роботах [7, 8] показано комбіноване текстурування поверхні з CNT-наноемульсіями при тиску 10–20 МПа ($\sim 10^7$ – 2×10^7 Па) та температурі 573–773 К, де каталізаторні CNT (діаметр 5–20 нм) формують градієнтні наноструктури на фланці інструменту. Швидке нагрівання $>10^4$ К/с зменшує тертя на 20–30%, знижуючи знос при токарній обробці Al 7075 та підвищуючи продуктивність на 40%.

У [19] наведено результати функціонально-градієнтних цементних карбідів (FGCC) з наноструктурою, отриманої при температурах 1400–1600 К та тиску $\sim 10^8$ Па, де каталізаторні градієнти Co/WC створюють композитний градієнт для покращення трибологічних властивостей. Це посилює адгезію захисних покриттів, підвищуючи стійкість інструменту до високих температур у зоні різання.

Аналіз літературних даних показує, що традиційні методи (вакуумне напилення, іонна імплантація окремо та інші) не здатні забезпечити одночасне виконання всіх критичних умов [17]. Натомість комбінована обробка формує унікальний термодинамічний і кінетичний режим, аналогічний до умов вибухового навантаження чи надшвидкого нагріву, але в контрольованому об'ємі товщиною 0,1–10 мкм. Це пояснює досить високі механічні та експлуатаційні характеристики, зафіксовані в попередніх дослідках. Подальший аналіз експериментальних даних у цій роботі спрямований на верифікацію теоретичних моделей та визначення оптимальних технологічних показників для різних матеріалів.

Таким чином, літературні дані свідчать про єдину фізичну основу отримання наноструктур при комбінованому зміцненні різального інструменту: синергія високошвидкісного термічного впливу, високих локальних напруг і

каталітичної активації дифузійних та нуклеаційних процесів. Все це забезпечує стабільність та покращені властивості для промислових застосувань у машинобудуванні.

2. Дослідницька частина

Основою даної роботи є результати експериментальних та теоретичних досліджень, проведених науковою школою Г.І. Костюка, а також комплексний аналіз праць провідних дослідників у сфері розробки високоефективних деталей машин і різального інструменту (PI).

Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення експлуатаційних характеристик інструментальних матеріалів в умовах інтенсивного виробництва. Основний акцент у дослідженні зроблено на застосуванні плазмово-іонних покриттів (ПІП) у синергічному поєднанні з такими методами обробки: іонна імплантація (II), іонне легування (ІЛ), лазерна модифікація (Лмод) поверхневого шару або гартування, комбіновані методи зміцнення на базі вищезазначених технологій.

Дослідження базуються на аналізі ефективності плазмово-іонної обробки (ПІО), іонно-променевої (ІПО) та світлопроменевої (СПО) обробок. Отримані якісні характеристики підтверджуються математичним моделюванням, експериментальними даними та порівняльним аналізом.

Метою роботи є оцінка ключових експлуатаційних характеристик та підвищення довговічності різального інструменту і деталей машин шляхом використання комбінованих технологій зміцнення. Для досягнення цієї мети будемо вирішувати наступні задачі:

Визначення параметрів довговічності різального інструменту з покриттями та модифікованими шарами в умовах інтенсивного зношування. Проведемо порівняльний аналіз зносостійкості для матеріалів із комбінованими покриттями (зокрема, молібденово-вольфрамовими) та без них. Очікується підтвердження зростання зносостійкості у 2–10 разів для сталей та у 1,5–3 рази для твердих сплавів. Дослідити вплив зміцнення на характеристики матеріалів, зокрема з урахуванням іонно-плазмового азотування, нанесення нітридних покриттів, а також впливу залишкових напружень і структурних змін у поверхневих шарах. Дати рекомендації для оптимізації процесу механічної обробки для інструменту з покриттями та зміцненими шарами, проаналізувавши зміни параметрів поверхні після комбінованих технологій з метою мінімізації дефектів. Оцінити термостійкість покриттів (карбідних, нітридних, оксидних) при високих температурах (до 1200 K). Зокрема, перевірити ефективність багатшарових композитів типу $TiC + Al_2O_3 + TiN$, які за попередніми даними здатні знизити окислення в 1,5–2 рази за оптимальних режимів. Встановити залежність властивостей зміцненого шару від технологічних параметрів процесу, таких як енергія іонів, доза імплантації та густина теплового потоку.

Результати вирішення цих задач дозволять обґрунтувати перспективність та подальші напрямки розвитку й інтеграції нанотехнологій та комбінованих методів обробки у сучасному машинобудуванні.

3. Результати розрахунків

Комбіновані методи поверхневої обробки дозволяють формувати шари з бажаними властивостями, адаптованими під конкретні вимоги. Розподіл

мікротвердості вздовж глибини поверхневого шару варіюється залежно від застосованих процесів, таких як плазмово-іонна модифікація, іонна імплантація (ІІ), лазерна термічна обробка (ЛО), а також їхні гібридні варіанти: ПІО в поєднанні з ЛО чи ІІ з ЛО. Регулюючи товщину нанесеного покриття, впроваджуючи багат шарові структури, змінюючи енергію та тип іонів під час імплантації, а також щільність енергії та тривалість лазерного впливу, можна досягти оптимальних профілів мікротвердості в шарах товщиною до 1 мм. Це сприяє підвищенню зносостійкості та втомної міцності завдяки генерації зон з залишковими напруженнями стиснення, а також покращенню корозійної стійкості та інших експлуатаційних параметрів деталей [27]. Крім того, лазерні методи в комбінації з іонним легуванням забезпечують селективну модифікацію поверхні в обраних ділянках, що особливо корисно для складних геометрій.

Виходячи з результатів проведеного аналізу, концепція розробки комбінованої зміцнення деталей та РІ для технологічного супроводу процесів зміцнення матеріалів має охоплювати такі ключові елементи (див. рис. 1).

Технічне завдання (ТЗ), що включає технічні умови експлуатації РІ. Воно дає змогу ідентифікувати критичні якісні показники деталі, розрахувати їх оптимальні значення та визначити пріоритетну функцію цілі (ФЦ), яка слугуватиме основним критерієм оцінки ефективності.

Залежності між якісними характеристиками комбінованої технології та її технологічними параметрами. Для цього використовуються маршрутні карти комбінованої технології. Якщо такі карти відсутні, обирається базова технологія (БТ), для якої існують маршрутні карти, а вплив інших методів враховується через спеціальні коефіцієнти корекції, отримані з експериментальних даних або моделювання.

Залежності якісних характеристик комбінованої технології від фізико-механічних властивостей матеріалу РІ до початку обробки. Аналогічно, застосовуються маршрутні карти комбінованої технології або, за їх відсутності, маршрутні карти базової технології з урахуванням коефіцієнтів впливу супутніх процесів, що дозволяє адаптувати систему до різних типів матеріалів, таких як сталі, сплави чи композити [36].

Залежності якісних характеристик комбінованої технології від геометричних параметрів розміщення деталі в робочому просторі обладнання. Якщо відповідні дані недоступні, застосовується модель базової технології з корекційними коефіцієнтами. Це особливо важливо для забезпечення рівномірності обробки, оскільки геометрія може впливати на розподіл плазми чи іонів, призводячи до варіацій у товщині покриття чи глибині імплантації на 10-20% залежно від конфігурації.

Залежності якісних характеристик комбінованої технології від режимів різання для РІ. За відсутності спеціалізованих даних, використовується базова технологія з коефіцієнтами. Це враховує фактори, як швидкість різання, подача та глибина, які можуть зменшити знос інструменту на 30-50% при оптимальному налаштуванні [12].

На базі створеної моделі розрахунку продуктивності, з урахуванням обраних технологічних параметрів та функції перетворення цих параметрів у фізичні величини (за якими оцінюється загальна ефективність), реалізуються такі кроки:

Узгодження інформації про якісні характеристики, зазначені в ТЗ, з тими, що досягаються в технологічному процесі, за умови максимізації ФЦ. Це включає

ітеративну оптимізацію для балансу між стійкістю, твердістю та іншими параметрами.

Вибір та коригування умов експлуатації PI, аби вони відповідали вимогам ТЗ та режимам різання. Наприклад, інтеграція даних про абразивний знос чи термічні навантаження дозволяє прогнозувати термін служби інструменту в реальних промислових умовах, як у автомобільному чи аерокосмічному виробництві [14].

Розробка автоматизованого робочого місця (АРМ) для фахівця з технології комбінованого зміцнення, призначеного для підбору оптимальних параметрів комбінованої обробки, таких як енергія іонів, температура плазми чи тривалість циклів. Створення АРМ для фахівця з експлуатації PI, яке дає змогу обирати ефективні режими роботи, коригувати параметри комбінованої технології та забезпечувати максимальну стійкість інструменту. Це не лише визначає режими комбінованої обробки, але й оптимізує швидкість різання, глибину, подачу, тип мастильно-охолоджувальної рідини та інші фактори, що можуть підвищити продуктивність на 20-40% за рахунок зменшення простоїв.

Формування повного технологічного процесу комбінованого зміцнення, базуючись на даних з АРМ технолога та АРМ експлуатаційника. Це включає інтеграцію з сучасними системами CAD/CAM для автоматизованого проектування, а також врахування екологічних аспектів, таких як мінімізація енергоспоживання чи відходів, що стає дедалі актуальнішим у контексті сталого розвитку промисловості.

Додатково, для підвищення ефективності системи, рекомендується впроваджувати елементи штучного інтелекту, такі як машинне навчання для аналізу великих даних з попередніх експериментів. Це дозволить автоматично генерувати коефіцієнти впливу та прогнозувати поведінку матеріалів під різними навантаженнями. Наприклад, у дослідженнях з іонно-плазмового азотування комбіновані моделі AI вже демонструють точність прогнозу зносостійкості на рівні 95%, що значно перевищує традиційні емпіричні методи. Крім того, система може інтегруватися з IoT-пристроями для моніторингу реального часу, дозволяючи динамічне коригування параметрів під час виробництва. Загалом, така інтегрована платформа не лише оптимізує процеси зміцнення, але й сприяє інноваціям у матеріалознавстві, зменшуючи витрати на випробування та прискорюючи впровадження нових технологій у промисловість [28].

Перспективи розвитку таких гібридних технологій обіцяють суттєве зростання характеристик матеріалів: стійкість ріжучого інструменту може зрости в 7-37 разів, зносостійкість – до 35 разів, опір корозії – до 5 разів, а втомна міцність – у 1,15-4,5 рази. На основі цих підходів створено концепції модульних установок для комбінованого зміцнення та нанесення захисних покриттів, які дозволяють інтегрувати кілька процесів в єдину систему для підвищення ефективності [3].

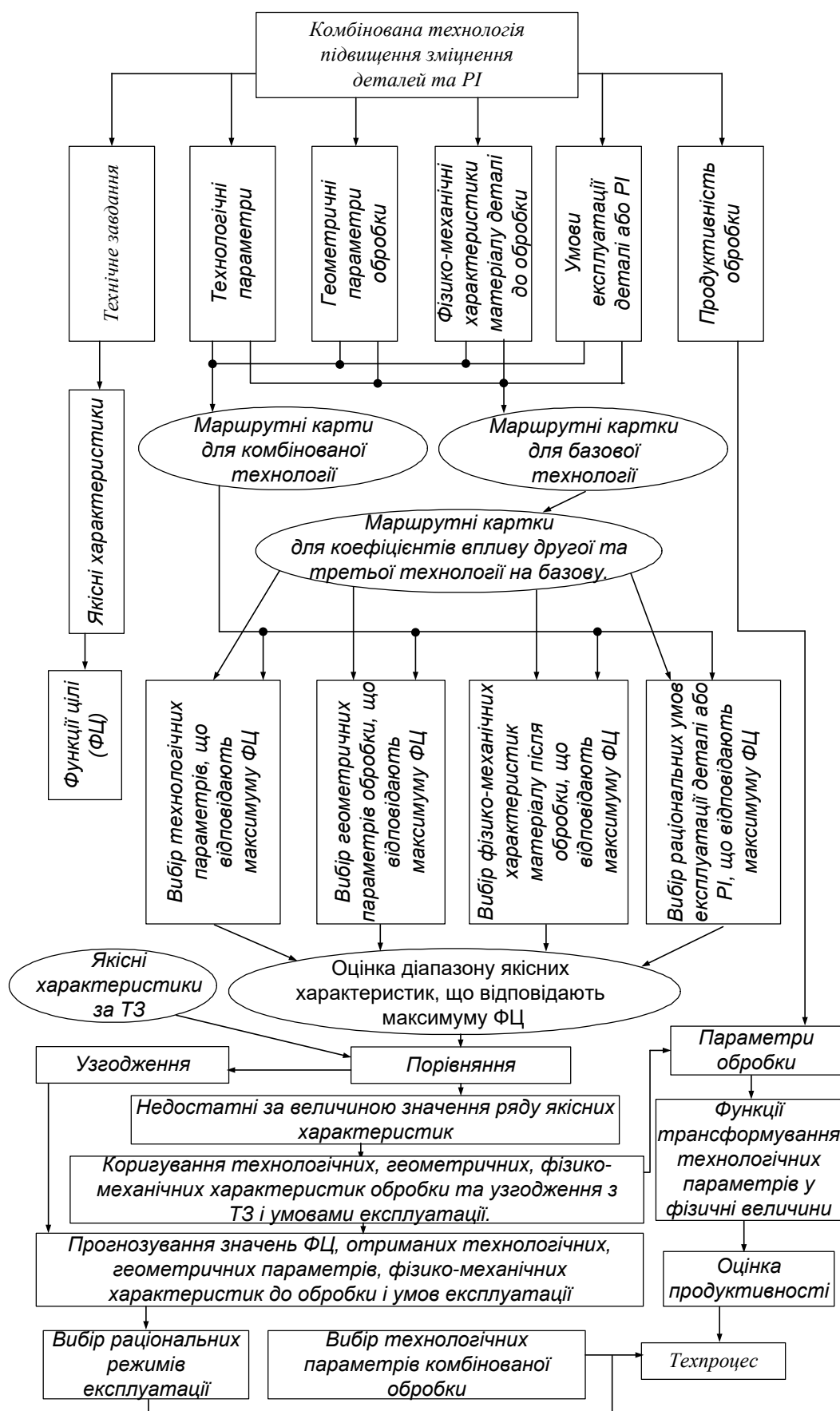


Рис. 1. Алгоритм підбору параметрів для комбінованого зміцнення деталей

Додатково, сучасні дослідження розширюють застосування цих технологій. Наприклад, комбінація плазмової нітридації з лазерною обробкою, як показано в роботах з мартенситностаріючої сталі 18Ni-300, виготовленої за допомогою селективного лазерного плавлення, значно покращує зносостійкість і корозійну стійкість, роблячи матеріал придатним для адитивного виробництва в аерокосмічній галузі.

Аналогічно, гібридні методи на основі електроіскрового осадження з подальшим лазерним переплавленням зменшують шорсткість поверхні, усувають напруження розтягування та підвищують загальну довговічність покриттів. У автомобільній промисловості такі комбінації застосовуються для захисту алюмінієвих сплавів, де нанесення зносостійких шарів на основі нітридів або карбідів збільшує термін служби компонентів на 20-50%, залежно від умов експлуатації [14].

Аналіз даних з таблиці 1 стійкість різального інструменту при індивідуальних та комбінованих технологіях зміцнення (або аналогічних досліджень) вказує, що помітне посилення характеристик у комбінованих процесах не є простим сумуванням ефектів окремих методів, а зумовлене фундаментальними перетвореннями в мікроструктурі матеріалу, такими як утворення нових фаз, рефайнмент зерна та оптимізація дифузійних процесів [7]. Це підкреслює синергетичний ефект гібридних технологій. Для подальшого прогресу важливо інтегрувати цифрові інструменти, як-от моделювання за допомогою штучного інтелекту, для прогнозування результатів і оптимізації параметрів, що знизить залежність від емпіричних випробувань і прискорить впровадження в промисловість. Крім того, екологічний аспект цих методів вартий уваги: вони часто зменшують використання шкідливих хімікатів порівняно з традиційними процесами, сприяючи сталому розвитку.

Порівняння зносостійкості, одержуваної в індивідуальних технологіях шляхом суперпозиції, не дає результатів, які реалізуються для комбінованої технології, а навпаки, призводить до значень, що набагато перевищують очікувані (див. табл. 2) [11]. Зносостійкість деталей та різального інструменту при комбінованих технологіях зміцнення демонструє синергетичний ефект, коли комбіновані методи забезпечують не просто сумарне покращення, а якісно новий рівень стійкості до зношування.

У технологіях, таких як іонна імплантація чи плазмове нанесення покриттів, зносостійкість підвищується за рахунок локальних змін у поверхневому шарі матеріалу. Наприклад, імплантація іонів азоту в сталь може збільшити твердість поверхні на 20–50%, що призводить до зменшення зносу в умовах тертя [16]. Однак, при суперпозиції таких методів (тобто простому додаванні ефектів) розрахункові значення зносостійкості часто недооцінюють реальні результати комбінованих процесів. У комбінованих технологіях, як-от поєднання іонної імплантації з плазмовим азотуванням і нанесенням нітридних покриттів, відбувається взаємне посилення: імплантовані іони стабілізують структуру покриття, зменшуючи ймовірність відшарування, що в підсумку підвищує зносостійкість у 2–10 разів для сталей і 1,5–3 рази для твердих сплавів, порівняно з індивідуальними методами.

Цей синергетичний ефект пояснюється формуванням комбінованих покриттів, де поверхневий шар набуває комбінованих властивостей — підвищеної твердості, зниженого коефіцієнта тертя та покращеної адгезії.

Таблиця 1

Технологія підвищення зміцнення	Інструментальні матеріали	Вид покриття	Вид обробки матеріалів	Підвищення зносостійкості, разів		
				Теоретичні	На практиці	Потенційно можливі
Електронно-променева обробка	Швидкорізальні сталі, тверді сплави	Модифікація електронним пучком	Токарна, свердлильна	1,4-3	ні	1,7-4
Іонне легування та імплантація	Швидкорізальні сталі та інструментальні сталі, тверді сплави	Лазерне загартування	Токарна, фрезерна, свердлильна, різьбонарізна	2,1-3,	1,5-2	2,3-4,
	Тверді сплави, швидкорізальні сталі, Інструментальні сталі	Імплантація іонів W, Ti, Zr, C, B, N	Токарна, фрезерна, свердлильна, різьбонарізна	1,5-4	1,1-1,6	2-4
Плазмово-іонна обробка інструменту	Тверді сплави, швидкорізальні сталі	Карбіди, нітриди, карбонітриди	Токарна, свердлильна, фрезерна, зубодовжина	1,5-9	1,1-1,7	2-5
Іонне легування + лазерна обробка	Швидкорізальні сталі, тверді сплави	Іонне легування та лазерна модифікація	Токарна, фрезерна, свердлильна	2,5-5	ні	3-7
Електронна обробка + плазмово-іонна обробка + іонне легування	Швидкорізальні сталі, тверді сплави, інструментальні сталі	Електронне очищення, плазмово-іонне покриття + іонне легування	Токарна, фрезерна, свердлильна	3-6	ні	4-8
Електронна обробка + плазмово-іонне покриття + іонне легування + лазерна обробка	Швидкорізальні сталі, тверді сплави та лазерна модифікація	Електронне очищення, покриття, іонне легування	Токарна, свердління, фрезерна	2-7	ні	3-9
Плазмово-іонна + лазерна обробка	Швидкорізальні сталі, тверді сплави, інструментальні сталі	Покриття, дифузійне проникнення, лазерна модифікація	Токарна, фрезерна, свердлильна, різьбонарізна	3-7	ні	4-8
Плазмово - іонна обробка+іонне легування	Швидкорізальні сталі, тверді сплави та іонне легування W, Zr, C, B, N, C, B, п.	Покриття Карбіди, нітриди та карбонітриди	Токарна, фрезерна, свердлильна	4-7	ні	3-9
Плазмово-іонна + Лазерна + іонне легування	Швидкорізальні сталі, тверді сплави, інструментальні сталі	Покриття, дифузійне проникнення іонне легування та модифікація	Токарна, свердлильна, фрезерна, різьбонарізна	3-7	ні	2-10

Таблица 2

Технологія підвищення зміцнення	Матеріал деталей	Вид покриття	Підвищення зносостійкості, разів	
			Теоретичні	Потенційно можливі
Лазерна обробка	Конструкційні сталі та сплави	Лазерне зміцнення	1,3-4,3	1,4-4,7
Плазмово- іонна обробка	Конструкційні сталі та сплави	Покриття: TiN, T, C, MoN, MoC, Cr ₂ N, NbN, WC, B ₂ , ZrO ₂ , HfO ₂	1,3-6,8	1,267
Іонне легування	Конструкційні сталі та сплави	Імплантація N+, C+, Ar+, W+, Ae+, B+, Mg+, Cu, Na, Sm	1,2-4	1,5-5
Електронно-променева обробка	Конструкційні сталі	Електронно-променеве зміцнення	1,5	1,7
Плазмово-іонна обробка+іонне легування	Конструкційні сталі та сплави	Покриття: нітриди, карбіди, імплантація: Mo+, Cu+, N, W, Zr, Ti	2-6	2,5-9
Плазмово-іонна + лазерна обробка	Конструкційні сталі	Покриття TiN, Al ₂ O ₃ , лазерне зміцнення	2,3-3	2,8-8
Плазмово-іонна обробка+іонне легування + Лазерна обробка	Конструкційні сталі	Покриття: TiN, MoN, Al ₂ O ₃ , імплантації B, W, C	3-8	3,5-9
Плазмово-іонна обробка+іонне легування + Лазерна обробка + Електронна обробка	Конструкційні сталі електронне очищення, лазерне зміцнення	Покриття: TiN, MoN, імплантація C, W	4-7	4-9

Дослідження показують, що в комбінованих процесах, наприклад, з використанням лазерної модифікації перед плазмовим нанесенням, зносостійкість PI зростає неадитивно: якщо індивідуальна лазерна обробка дає приріст на 30%, а плазмове покриття — на 50%, то їх комбінація може досягти 150–200% покращення завдяки упорядкуванню мікроструктури та зняттю внутрішніх напружень.

Крім того, комбіновані технології відкривають можливості для оптимізації під конкретні умови експлуатації. Наприклад, інтеграція іонного легування з багат шаровими покриттями (TiN + CrN) не тільки підвищує зносостійкість, але й покращує корозійну стійкість у вологих середовищах, що є перевагою над індивідуальними методами. Аналіз табличних даних (див. табл. 2) підтверджує, що реальні експериментальні значення зносостійкості в комбінованих системах перевищують теоретичні розрахунки на 20–50%, що свідчить про необхідність подальших досліджень у напрямку моделювання синергетичних взаємодій [8]. У перспективі, впровадження таких технологій у промисловість може суттєво знизити витрати на заміну деталей та інструменту, сприяючи підвищенню ефективності виробництва.

Підвищення зносостійкості за рахунок застосування індивідуальних та комбінованих технологій (табл. 3) також може бути пояснено суперпозицією можливостей індивідуальних технологій.

У контексті індивідуальних методів, таких як іонна імплантація чи плазмове нанесення покриттів, суперпозиція передбачає адитивне поєднання ефектів, де кожен процес додає свої переваги без значної взаємодії. Наприклад, іонна імплантація підвищує твердість поверхні за рахунок введення атомів легуючих елементів, тоді як плазмове покриття забезпечує бар'єрний захист від абразивного зносу. При суперпозиції цих технологій очікується просте сумування покращень, наприклад, збільшення зносостійкості на 20–30% від кожного методу окремо, що в сумі дає 40–60%. Однак, експериментальні дані (див. табл. 3) показують, що в реальних комбінованих системах цей ефект може бути посилений за рахунок синергії, де структурні зміни від одного процесу оптимізують умови для іншого, призводячи до загального зростання зносостійкості до 100% і більше.

Це пояснюється формуванням стабільніших фазових структур та зменшенням внутрішніх дефектів, що не враховується в простій суперпозиції [17]. Комбіновані технології, такі як послідовна іонна імплантація з лазерною модифікацією та нанесенням нітридних покриттів, демонструють, що суперпозиція можливостей не є лінійною, а включає нелінійні взаємодії. Наприклад, лазерна обробка створює зону термічного впливу зі стискаючими напруженнями, яка покращує адгезію покриття, нанесеного плазмовим методом, тим самим подовжуючи термін служби деталі в агресивних середовищах. Аналіз корозійної стійкості в табл. 3 ілюструє, як така суперпозиція знижує окиснюваність поверхні в 1,5–2 рази при температурах до 1200 K, порівняно з індивідуальними методами. У перспективі, подальше вивчення цих взаємодій за допомогою комп'ютерного моделювання дозволить оптимізувати параметри, такі як доза імплантації чи густина теплового потоку, для досягнення максимальної ефективності в промислових застосуваннях, зокрема в агропромисловому комплексі [26].

Таблиця 3

Вид обробки	Матеріал деталей	Вид покриття	Підвищення корозійної стійкості, разів	
			Теоретичні	Потенційно можливі
Плазмово -іонна обробка	Конструкційні сталі та ін.	Покриття TiN, TiN+Al ₂ O ₃ , ZrN	1,2-3	1,1-2
Іонно-плазмове напилення	Конструкційні сталі	Імплантація іонів Fe, Ni, Y, B, C, H та ін.	1,3-1,8	1,1-1,3
Електронно-променева обробка	Конструкційні сталі	Електронно-променеві покриття з ZrO ₂ + 3Y ₂ O ₃	1,2-1,5	1,1-1,2
Лазерна обробка	Конструкційні матеріали	Лазерне покриття танталом	1,3-1,6	1,1-1,2
Плазмово -іонна обробка +Іонно-плазмове напилення	Конструкційні матеріали	ПІО-покриття TiN+Al ₂ O ₃ ІПО-імплантація Y	2-3	ні
Плазмово -іонна обробка + Лазерна обробка	Конструкційні матеріали	ПІО-покриття TiN+Al ₂ O ₃ ЛО-покриття Ta	2-3	ні
Плазмово -іонна обробка +Електронно-променева обробка	Конструкційні матеріали	ПІО-покриття TiN+Al ₂ O ₃ ЕЛО-покриття ZrO ₂ +Al ₂ O ₃	2-3,9	ні
Плазмово -іонна обробка + Іонно-плазмове напилення + Лазерна обробка	Конструкційні матеріали	ПІО-покриття TiN+Al ₂ O ₃ ІПО-імплантація Y та C ЛО-покриття Ta	2,3-4	ні
Плазмово -іонна обробка + Електронно-променева обробка + Лазерна обробка	Конструкційні матеріали	ПІО-покриття ZrN Al ₂ O ₃ ЕЛО-покриття ZrO ₂ +Al ₂ O ₃ ЛО- покриття Ta	2,1 - 3,7	ні
Плазмово -іонна обробка + Іонно-плазмове напилення + Лазерна обробка	Конструкційні матеріали	ПІО-покриття TiN+TiC ІПО-імплантація Y та C ЛО-покриття Ta ЕЛО- очищення поверхні	2,5-5	ні

Таблиця 4

Технологія обробки	Матеріал деталі	Вид покриття або зміцнення	Підвищення втомної міцності, разів	
			Теоретичні	Потенційно можливі
Плазмово -іонна обробка	Конструкційні сталі	ПІО-покриття Cr, Ni, Al, Y ІПО-імплан-ия.	1,3-1,5	1,6-3
	Леговані конструкційні сталі	Покриття Ni, Cr, Al, Y	1,15-1,2	1,3-2
Іонно-плазмове напилення	Конструкційні сталі та сплави	Імплантація N	1,12-1,15	1,2-1,8
Лазерна обробка	Конструкційні сталі	Обробка в режимі з оплавленням	1,1-1,2	1,2-1,9
Лазерна обробка + Плазмово -іонна обробка	Конструкційні сталі	ЛО-обробка в режимі з оплавленням ПІО-покриття Cr, I, Y	1,25-1,45	1,5-2,5
Лазерна обробка + Плазмово -іонна обробка + Іонно-плазмове напилення	Конструкційні сталі	ЛО-обробка в режимі з оплавленням ПІО-покриття Cr, Ni, Al, Y ІЛО-імплант-я N	1,4 -1,7	1,9-4,5

Аналіз таблиці 4 з підвищення втомної міцності деталей за рахунок індивідуальних та комбінованих технологій свідчить, що підвищення втомної міцності в комбінованій технології можливе переважно завдяки посиленню енергетичної взаємодії між зернами наноструктури.

Це перешкоджає утворенню зародків втомних тріщин, на відміну від традиційних методів зміцнення, які здебільшого або підвищують ймовірність їх виникнення, або, у кращому випадку, лише утримують її на попередньому рівні.

У комбінованих технологіях, таких як поєднання іонної імплантації з лазерною модифікацією та нанесенням багатошарових покриттів, енергетична взаємодія між зернами наноструктури досягає оптимального рівня завдяки формуванню стабільних міжфазних границь. Це не тільки гальмує ініціацію мікротріщин, але й сприяє рівномірному розподілу напружень по всьому об'єму матеріалу, що особливо важливо для деталей, які працюють у циклічних навантаженнях, наприклад, авіаційній техніці.

Крім того, аналіз свідчить про перспективу інтеграції комбінованих технологій з наноадитивними матеріалами, наприклад, додаванням графену чи нанотрубок під час плазмово-іонної обробки, що ще більше посилює енергетичну взаємодію на атомному рівні. Це дозволяє не тільки запобігти утворенню втомних тріщин, але й активізувати механізми самовідновлення структури під навантаженням, що є революційним для галузей з високими вимогами до надійності, як-от авіація чи енергетика [23]. Подальші дослідження, базуючись на даних

таблиці 4, рекомендують оптимізувати параметри, такі як густина теплового потоку та швидкість лазерної обробки, для досягнення максимальної ефективності, що може знизити витрати на обслуговування обладнання на 30–50% і підвищити екологічну стійкість виробництва за рахунок зменшення потреби в заміні деталей.

Комбіновані методи обробки поверхонь значно покращують стійкість деталей механізмів до зношування. Наприклад, поєднання імплантації іонів з нанесенням плазмових покриттів (наприклад, на основі молібдену та вольфраму) дозволяє підвищити зносостійкість сталей у 2–10 разів порівняно з матеріалами, що мають лише покриття. Крім того, для твердих сплавів і швидкорізальних інструментальних сталей комбінована технологія, яка включає іонно-плазмове азотування та нанесення нітридних шарів, може збільшити зносостійкість у 1,5–3 рази, перевершуючи традиційний метод катодно-іонного бомбардування (КІБ).

У таких комбінованих підходах ключовими факторами, що визначають зносостійкість покриттів і модифікованих шарів, є параметри окремих процесів, інтегрованих у загальну систему.

Стійкість матеріалів до окислення (або корозійна стабільність) також суттєво змінюється завдяки плазмово-іонним методам. Дослідження впливу різних типів покриттів — карбідних, нітридних, оксидних та металевих — на окислення твердих сплавів і швидкорізальних сталей демонструють, що більшість з них зменшують швидкість окислення. Особливо ефективними виявилися покриття на базі карбіду титану, а також багатошарові композити, такі як $\text{TiC} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiN}$, нітрид титану з нітридом хрому, або комбінації нітриду титану, ніобію та хрому. Ці покриття значно знижують окислення при температурах від 1200 К до нижчих значень, як 93 К. Порівняльні тести багатошарових покриттів (титан + нітрид титану) з одношаровими (лише нітрид титану) показують перевагу перших у покращенні корозійної стійкості. Оптимальний підбір режимів обробки дозволяє досягти корозійної стійкості покриття, наближеної до властивостей суцільного матеріалу. Наприклад, покриття на основі нітриду титану з хромом, карбіду хрому чи молібдену підвищують опір деталей паливних систем до солей морської води та сірковмісних сполук у паливі. Аналіз факторів впливу виділяє ключові параметри: товщину покриття та робочу температуру в агресивних середовищах [37].

Іонна імплантація та легування також ефективно посилюють корозійну стійкість. Пасивація сталі іонами хрому та нікелю може зменшити окислення вдвічі за умови оптимальної дози, хоча перевищення цієї дози може призвести до зворотного ефекту. Імплантація цирконію з залізом чи нікелем при дозах близько $5 \times 10^{19} \text{ м}^{-2}$ підвищує стійкість у 1,5–2 рази. Введення ітрію в аустенітні нержавіючі сталі знижує окислення при 1103 К. Дослідження показують, що іони кальцію та Європію зменшують окислення титану, з посиленням ефекту при вищих дозах, тоді як цинк, індій, ітрій, церій, алюміній, нікель та вісмут навпаки прискорюють процес. Подібні тенденції спостерігаються для нержавіючих сталей [22].

Імплантація нікелю та хрому в сталь ефективно гальмує окислення. Для алюмінію іони золота та срібла зменшують окислення, а свинець і вісмут — прискорюють. У цирконії більшість імплантованих елементів (від заліза до хрому) підвищують швидкість окислення. Загалом, корозійна стійкість при іонній імплантації залежить від дози опромінення та тривалості експозиції в екстремальних умовах.

Світлопроменева (лазерна) обробка також впливає на корозійну стійкість та окислення. Підвищення однорідності фазової структури збільшує стійкість

чавунів до кислотних розчинів, а силумінів — при обробці з оплавленням. У хромованих сталях лазер забезпечує рівномірний розподіл хрому, що посилює опір міжкристалічній корозії. Для марок сталей типу 08X13, 20X13, 40X13 лазерна обробка розширює пасивну зону, вказуючи на покращення корозійної стійкості.

Однак, для вуглецевих сталей лазер може погіршити стійкість через підвищену концентрацію, структурну неоднорідність, збереження фериту чи карбідів, а також залишковий аустеніт. Таким чином, ефект лазерної обробки неоднозначний і залежить від товщини зони термічного впливу та структурних змін на поверхні.

Щодо плазмово-іонної обробки з покриттями, втомна міцність деталей зазвичай дещо знижується порівняно з необробленими, через залишкові напруження, що провокують тріщини. Оптимальні умови — напруга на підкладці 50–150 В, температура 293–773 К, товщина покриття 50–200 мкм — наближають властивості до масивного матеріалу. Втомна міцність залежить від струму дуги та напруги. Наприклад, жаростійке покриття з Ni-Cr-Al-Y на сплаві ЖС6У підвищує міцність з 210 до 230 МПа за рахунок регуляризації структури та збільшення алюмінію до 13%. Тести сплаву ВТ6 з нітридом титану (6–10 мкм) не виявили зниження міцності при навантаженнях $4,85\text{--}6,5 \times 10^8 \text{ Н/м}^2$ [27].

Вплив параметрів іонно-плазмової обробки на втомні властивості включає енергію іонів, густину струму та товщину покриття.

Іонна імплантація та легування змінюють втомну міцність і циклічну довговічність. Спільна імплантація вуглецю та водню (300 кеВ) підвищує межу втоми на 10–70%, а довговічність – у 20–25 разів. Азотне легування сплавів ЕП718ІД, ЕП866Ш, РТ8, ВТ9, ВТ18У збільшує межу на 10–20% і довговічність у 4–6 разів. Для сталі 40С імплантація азоту (3 МеВ, доза 10^2 м^{-2}) подвоює довговічність у 2,5 рази. Хром і молібден (40 кеВ, 10^{21} м^{-2}) покращують сталь 30ХГВА.

Лазерна обробка має неоднозначний вплив: при низьких температурах виникають розтягувальні напруження, знижуючи міцність; при оплавленні – стискаючі, що може загоювати тріщини, але не для всіх матеріалів. Ключові параметри: густина теплового потоку, швидкість обробки, для імпульсного режиму – енергія, тривалість і частота імпульсів.

Висновки

На основі проведених експериментальних досліджень та теоретичного аналізу ефективності комбінованих методів поверхневої обробки (ПІО, ІІ, ЛО та їх поєднань) можна зробити наступні висновки:

Синергетичний ефект комбінованих технологій. Встановлено, що результативність комбінованих методів обробки не є простою лінійною суперпозицією ефектів окремих технологій. Реальні показники зносостійкості та довговічності перевищують розрахункові адитивні значення на 20–50% і більше. Це пояснюється фундаментальними змінами мікроструктури матеріалу: формуванням наноструктурованих шарів, утворенням нових стабільних фаз, рефайнментом зерна та оптимізацією дифузійних процесів.

Підвищення експлуатаційних характеристик. Застосування розроблених гібридних технологій забезпечує значне зростання ключових показників: Стійкість різального інструменту: зафіксовано зростання в діапазоні від 1,8 до 7 разів. Максимальні показники (у 5-8 раз) досягнуто при поєднанні ПІО, іонно-променевої обробки (ІПО) та лазерної модифікації (ЛО) на титанових сплавах з використанням складних покриттів системи HfN/ZrN. Зносостійкість: збільшення

до 3,5 разів завдяки формуванню зон із залишковими напруженнями стиснення та підвищенню мікротвердості (до 46 ГПа). Корозійна стійкість: зростання до 5 разів, а також зниження швидкості окислення в 1,5–2 рази при високих температурах (до 1200 K), особливо при використанні багатошарових композитів (TiC + Al₂O₃ + TiN). Втомна міцність: підвищення у 1,15–4,5 раза, що зумовлено посиленням енергетичної взаємодії між зернами наноструктури та гальмуванням ініціації втомних тріщин.

Керування властивостями поверхневого шару. Комбіновані методи дозволяють формувати шари товщиною до 1 мм з градієнтним розподілом мікротвердості, адаптованим під конкретні умови експлуатації. Поєднання лазерних методів з іонним легуванням забезпечує можливість селективної модифікації складних геометричних поверхонь, що є критично важливим для аерокосмічної та інструментальної галузей.

Перспективи розвитку. Подальше вдосконалення технологій лежить у площині розвитку математичних моделей для моделювання синергетичних взаємодій, що дозволить мінімізувати обсяг емпіричних випробувань. Крім того, перспективним є впровадження наноадитивних матеріалів у процеси плазмово-іонної обробки для створення матеріалів із здатністю до самовідновлення структури під навантаженням.

Таким чином, комбіновані технології зміцнення є високоефективним напрямком підвищення надійності деталей машин та інструменту, що забезпечує перехід на якісно новий рівень ресурсозбереження та експлуатаційної ефективності.

Список літератури

1. Shyrokyi, Y. Investigation of the Influence of Crystallization Energy on the Size of Nanostructures During Copper Ion-Plasma Treatment. / Y. Shyrokyi, G. Kostyuk // In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds) Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham. – 2021. – vol 367. – P. 57-66.
2. Kostyk, K. Ensuring the High Strength Characteristics of the Surface Layers of Steel Products / K. Kostyk, V. Kostyk, O. Akimov, K. Kamchatna-Stepanova, Y. Shyrokyi // Advanced Manufacturing Processes III. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2022. – Vol. 9. – P. 292-301.
3. Onopchenko, A. V. Ensuring Quality of Stamping Sheet Aviation Parts / A.V. Onopchenko, M. O. Kurin, and Yu. V. Shyrokyi //, Progress in Physics of Metals. – 2024. – vol. 25. – No. 2. – P. 320–363.
4. Popov, V. Study of Ions Energy, Their Varieties and Charge on Temperature, Rate of Temperature Rise, Thermal Stresses for Nanostructures on Construction Materials. / V. Popov, G. Kostyuk, M. Nechyporuk, K. Kostyk // In: et al. Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – 2020. – P. 470-477.
5. Kostyuk, G. Determination of Technological Parameters for Obtaining Nanostructures under Pulse Laser Radiation on Steel of Drone Engine Parts, [Text] / G. Kostyuk, M. Nechyporuk and K. Kostyk, // " 2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). – 2019. – P. 208-212.
6. Gupta, A., et al. Study of plasma induced nanostructure formation and surface morphology changes on tungsten and stainless steel at atmospheric pressure. Journal of Vacuum Science & Technology A. – 2018. – 37(1). – P. 011301.

7. Широкий, Ю. В. Determination of temperature conditions for the formation of submicro- and nanostructures under ion impact on magnesium alloys in a plasma environment / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, О. В. Торосян, П. Р. Жидєєв // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – 2024. – № 102. – С. 75-91.

8. Ueda, M., et al. Recent experiments on plasma immersion ion implantation (and deposition) using discharges inside metal tubes. *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – 355. – P. 193-200.

9. Bystrov, K., et al. Plasma-Based Nanostructuring of Polymers: A Review. *Polymers*. – 2021. – 9(9). – P. 417.

10. Kostyuk, G. I. The surface roughness of the detail the ion-plasma coating end the ion implantation and alloying / G. I. Kostyuk, A. K. Myalitsa, A. K. Goriov, A. G. Trushin, and all. // Нові технології в машинобудуванні: матеріали IX Міжнар. конф., 3–7 вересня 2000 г. – Х., 2000. – С. 52–58.

11. Костюк, Г. И. Нанопокрития и наноструктурные упрочненные слои для повышения ресурса и надежности деталей авиационных двигателей / Г. И. Костюк, Е. А. Воляк, В. А. Фадеев // ХАИ, ББК 72: 74 Н56. – 2018. – С. 54.

12. Удосконалення процесів створення наноструктур у плазмово-іонних та лазерних технологіях для підвищення ефективності різального інструменту : дис. канд. техн. наук : 05.03.07 - процеси фізико - техн. оброб. : 13 - мех. інженерія : захищ. 12.04.19 / І. В. Кантемир ; Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харків. авіац. ін-т", М-во освіти і науки України ; наук. керівник Г. І. Костюк. - Харків, 2018. - 190 с.

13. Широкий, Ю.В. Вибір технологічних параметрів лазера для отримання зміцнюючих покриттів з наноструктурами на інструментальній сталі У12А / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, О. В. Торосян, Г. Д. Торосян-Жидєєва // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології, збірник наукових праць – Харків : Нац. аерокосм. ун-т "ХАИ". – 2023. – Вип. 97. – С. 111-125.

14. Baranov, O. Hierarchical Nanomaterials by Selective Deposition of Noble Metal Nanoparticles: Insight into Control and Growth Processes. / O. Baranov, T. Belmonte, I. Levchenko, K. Bazaka, M. Košiček, U. Cvelbar // *Advanced Theory and Simulations*. – 2023. – No. 6. – Vol. 9. – P. 2300288.

15. Kostyuk, G. I. The removable material volume for the durability period, cutting tools durability and processing productivity depending on the grain size of the coating or cutting tool base material / G. I. Kostyuk, M. V. Nechyporuk, O. D. Semenenko // MODERN ACHIEVEMENTS OF SCIENCE AND EDUCATION XIV International Conference September 26 – October 3, 2019, Netanya, Israel. – Khmelnytskyi : KhNU. – 2019 – P. 75-78.

16. Prasad, K. Carbon Nanocomposites in Aerospace Technology: A Way to Protect Low-Orbit Satellites Weerasinghe Janith / Prasad Karthika, Mathew Joice, Trifoni Eduardo, Baranov Oleg, Levchenko Igor, Bazaka Kateryna // *Nanomaterials*. – 2023. – No. 13. – Vol. 11. – P.1763.

17. Широкий, Ю.В. Моделювання умов отримання наноструктур в алюмінієвих сплавах при дії іонізуючого випромінювання / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, Т. В. Постельник //Авіаційно-космічно техніка та технологія: сб. науч. тр. Нац. аерокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Х.– 2022. – Вип. 2. – С.55-63 <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.2.07>

18. Костюк, Г. І. Вплив характеру завдання теплофізичних і термомеханічних характеристик магнієвих сплавів при обробці з метою отримання наноструктур іонами з використанням стохастичних значень і

отриманих квантово-механічним методом / Г. І. Костюк, О. Д. Григор, А. В. Матвєєв // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні – Харків, 2017. – Вип. № 17 (1239) – С. 78-82.

19. Бреус, А. О. Удосконалення комбінованої плазмово-іонної технології для отримання наноструктур на поверхні ріжучого інструменту : дис. канд. техн. наук : / А. О. Бреус // Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харків. авіац. ін-т", М-во освіти і науки України ; Харків. – 2018. – 143 с.

20. Arsecularatne J. A. et al. Materials, properties, manufacturing methods and cutting performance of innovative ceramic cutting tools – a review // *Manufacturing Review*. – 2019. – Vol. 6. – P. 27

21. Dabees, S. Characterization and Evaluation of Engineered Coating Techniques for Different Cutting Tools – Review / S. Dabees, S. Mirzaei, P. Kaspar, V. Holcman, D. Sobola // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12(8). P. 1124.

22. Ganeshkumar S. et al. Exploring the potential of nano technology: A assessment of nano-scale multi-layered-composite coatings for cutting tool performance // *Arabian Journal of Chemistry*. – 2023. – Vol. 16(8). – P. 1-12.

23. Широкий, Ю. В. Теоретичне дослідження температурних полів міді при формуванні наноструктурних шарів у плазмовому середовищі / Ю.В. Широкий, А.Ю. Сисоєв, Ю.С. Панченко // *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. – 2022. – № 5. – С.51 - 60

24. Fox-Rabinovich G. et al. Application of carbide cutting tools with nano-structured multilayer composite coatings for turning austenitic steels, type 16Cr-10Ni // *Mechanics & Industry*. – 2017. – Vol. 18. – P. 9.

25. Формування наноструктур при швидкоплинних процесах іонного і лазерного оброблення різального інструменту і деталей : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.07 - процеси фізико-техн. оброб. : 13 - мех. інженерія : захищ. 26.06.2020 / О. В. Матвєєв ; Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського "Харків. авіац. ін-т", М-во освіти і науки України ; наук. керівник Г. І. Костюк. - Харків, 2019. - 185 с.

26. Fox-Rabinovich G. et al. An effective way to improve the cutting performance of coated tools through annealing // *Surface and Coatings Technology*. – 2001. – Vol. 148(2-3). – P. 373-380.

27. Sidorenko, D. Nanocomposites for Machining Tools / D. Sidorenko, P. Loginov, L. Mishnaevsky, E. Levashov // *Nanomaterials*. – 2017. – Vol. 7(9). P. 1171.

28. Sysoiev, I. Pulsed vacuum-arc plasma source with laser arc excitation. /, Yurii Shyrokyi, Kseniia Fesenko. // *Problems of Atomic Science and Technology (PAST)*. – 2024. – № 1 (149). – P. 110-115.

29. Kostyuk, G. I. Influence of the method of setting the thermophysical and thermomechanical characteristics of the B3 hard alloy on the nature and efficiency of the formation of nanostructures / G. I. Kostyuk, O. D. Semenenko // *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering* – Kharkiv, 2018. – VIP. No. 34 (1310) – P. 40-46.

30. Sadeghi B. et al. Experimental study on the effect of CNT-enriched nanofluid lubrication on the performance of textured cutting tool in the turning of aluminum 7075 alloy // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol. 13. – P. 22350.

31. Kostyuk, G. I. Comparison of temperature regimes in the zone of laser femtosecond processing of Volkar hard alloy using thermophysical and thermomechanical characteristics, stochastic values calculated by the quantum-mechanical method / G. I. Kostyuk, O. D. Grigor // *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technologies in Mechanical Engineering* – Kharkiv. – 2018.

– No. 6 (1282). – P. 90-94.

32. Rizzo, A. et al. The Critical Raw Materials in Cutting Tools for Machining Applications: A Review // *Materials*. – 2020. – Vol. 13(5). – P. 1377.

33. Широкий, Ю. В. Визначення впливу внутрішніх енергій кристалічної решітки на отримання наноструктур у поверхневих шарах алюмінієвих сплавів / Ю. В. Широкий, // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – 2023. – № 99. – С.32-43. <https://doi.org/10.32620/oikit.2023.99.03>.

34. Широкий, Ю.В. Дослідження температурних полів на сталях з урахуванням кінцевої швидкості розповсюдження тепла при моделюванні умов отримання наноструктур у плазмовому середовищі / Ю. В. Широкий, Ю. О. Сисоєв, К. В. Фесенко, Т. О. Постельник // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – 2024. – № 101. – С. 98-111.

35. Baranova, T. A., Chubenko, A. K., Ryabikov, A. E., Mamaev, A. I., Mamaeva, V. A., Beletskaya, E. Yu. Microarc synthesis of nanostructured radiation-absorbing coatings on aluminum and titanium surface IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, – 2017. – vol. 286. – P. 1757-8981.

36. Kostyuk, G. Improving the resource and reliability of details from zirconium alloys during the application of nanocoating and formation of nanostructures [Text] / G. Kostyuk, V. Popov // *Bulletin of the National technical university "Kharkiv Polytechnic Institute" Series: Techniques in a machine industry*. – 2019. – No. 19. – P. 40-50.

37. Kostyuk, G. Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows / G. Kostyuk, O. Melkozirova, E. Kostyuk, I. Shyrokyi/ *Різнання та інструменти в технологічних системах*. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2020. – № 92.– С. 107-121.

References

1. Shyrokyi, Y. Investigation of the Influence of Crystallization Energy on the Size of Nanostructures During Copper Ion-Plasma Treatment. Y. Shyrokyi, G. Kostyuk In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds). [Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2021. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. Springer, Cham]. 2021, no 367, pp. 57-66.

2. Kostyk, K. Ensuring the High Strength Characteristics of the Surface Layers of Steel Products. K. Kostyk, V. Kostyk, O. Akimov, K. Kamchatna-Stepanova, Y. Shyrokyi [Advanced Manufacturing Processes III. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham]. 2022, vol. 9, pp. 292-301.

3. Onopchenko, A. V. Ensuring Quality of Stamping Sheet Aviation Parts A.V. Onopchenko, M. O. Kurin, and Yu. V. Shyrokyi [Progress in Physics of Metals]. – 2024. – vol. 25. – No. 2. – pp. 320–363.

4. Popov, V. Study of Ions Energy, Their Varieties and Charge on Temperature, Rate of Temperature Rise, Thermal Stresses for *Nanostructures on Construction Materials*. V. Popov, G. Kostyuk, M. Nechyporuk, K. Kostyk [In: et al. Advanced Manufacturing Processes. InterPartner 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham]. 2020, pp. 470-477.

5. Kostyuk, G. Determination of Technological Parameters for Obtaining Nanostructures under Pulse Laser Radiation on Steel of Drone Engine Parts, G. Kostyuk, M. Nechyporuk and K. Kostyk [" 2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)]. 2019, pp. 208-212.

6. Gupta, A., et al. Study of plasma induced nanostructure formation and

surface morphology changes on tungsten and stainless steel at atmospheric pressure. [Journal of Vacuum Science & Technology A]. 2018, 37(1), pp. 011301.

7. Shyrokyi, Yu. V. Determination of temperature conditions for the formation of submicro- and nanostructures under ion impact on magnesium alloys in a plasma environment/ Yu. V. Shyrokyi, Yu. O. Sysoiev, O. V. Torosian, P. R. Zhydeev [Open Information and Computer Integrated Technologies]. 2024, no. 102, pp. 75-91.

8. Ueda, M., et al. Recent experiments on plasma immersion ion implantation (and deposition) using discharges inside metal tubes. [Surface and Coatings Technology]. 2018, no. 355, pp. 193–200.

9. Bystrov, K., et al. Plasma-Based Nanostructuring of Polymers: A Review. [Polymers]. 2021, no. 9(9), pp. 417.

10. Kostyuk, G.I. The surface roughness of the detail the ion-plasma coating and the ion implantation and alloying. Kostyuk G.I., Myalitsa A.K., Goriov A.K., Trushin A.G., and all. [New Technologies in Mechanical Engineering: Materials of the IX International Conference, September 3–7, 2000. – Kh.], 2000. pp. 52–58.

11. Kostyuk, G. I. Nanocoatings and Nanostructured Hardened Layers for Increasing the Resource and Reliability of Aircraft Engine Parts. G.I. Kostyuk, E.A. Voliak, V. A. Fadeev [KhAI, BBK 72: 74 N56]. 2018, P. 54.

12. Improvement of Processes for Creating Nanostructures in Plasma-Ion and Laser Technologies to Increase the Efficiency of Cutting Tools: Dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 05.03.07 - Processes of Physical-Technical Processing: 13 - Mechanical Engineering: Defended 12.04.19 / I. V. Kantemir; National Aerospace University named after M. Ye. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine; Supervisor G. I. Kostyuk. - Kharkiv, 2018, P. 190.

13. Shyrokyi, Yu.V. Selection of Laser Technological Parameters for Obtaining Hardening Coatings with Nanostructures on U12A Tool Steel. Yu.V. Shyrokyi, Yu. O. Sysoiev, O. V. Torosian, G. D. Torosian-Zhydeeva [Open Information and Computer Integrated Technologies, Collection of Scientific Papers – Kharkiv: National Aerospace University "KhAI"]. 2023, no 97, pp. 111-125.

14. Baranov, O. Hierarchical Nanomaterials by Selective Deposition of Noble Metal Nanoparticles: Insight into Control and Growth Processes. O. Baranov, T. Belmonte, I. Levchenko, K. Bazaka, M. Košiček, U. Cvelbar. [Advanced Theory and Simulations]. 2023, No. 6, vol. 9, pp. 2300288.

15. Kostyuk, G. I. The removable material volume for the durability period, cutting tools durability and processing productivity depending on the grain size of the coating or cutting tool base material. G. I. Kostyuk, M. V. Nechyporuk, O. D. Semenenko [MODERN ACHIEVEMENTS OF SCIENCE AND EDUCATION XIV International Conference September 26 – October 3, 2019, Netanya, Israel. – Khmelnytskyi: KhNU]. 2019, pp. 75-78.

16. Prasad, K. Carbon Nanocomposites in Aerospace Technology: A Way to Protect Low-Orbit Satellites Weerasinghe Janith Prasad Karthika, Mathew Joice, Trifoni Eduardo, Baranov Oleg, Levchenko Igor, Bazaka Kateryna [Nanomaterials]. 2023, no. 13, vol. 11, pp.1763.

17. Shyrokyi, Yu. V. Modeling of Conditions for Obtaining Nanostructures in Aluminum Alloys under the Action of Ionizing Radiation. Yu. V. Shyrokyi, Yu. O. Sysoiev, T.V. Postelnyk [Aviation and Space Technology and Engineering: Collection of Scientific Papers of the National Aerospace University named after N. E. Zhukovsky "KhAI". Kh]. 2022, no 2, pp.55-63.

18. Kostyuk, G. I. Influence of the Nature of Setting Thermophysical and Thermomechanical Characteristics of Magnesium Alloys during Processing to Obtain Nanostructures by Ions Using Stochastic Values and Obtained by Quantum-Mechanical Method. G. I. Kostyuk, O. D. Grigor, A. V. Matvieiev [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technologies in Mechanical Engineering – Kharkiv]. 2017, no. 17 (1239), pp. 78-82.

19. Breus, A. O. Improvement of Combined Plasma-Ion Technology for Obtaining Nanostructures on the Surface of Cutting Tools: Dissertation Candidate of Technical Sciences. A. O. Breus [National Aerospace University named after M. Ye. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine; Kharkiv]. 2018, P.143.

20. Arsecularatne, J. A. et al. Materials, properties, manufacturing methods and cutting performance of innovative ceramic cutting tools – a review, [Manufacturing Review]. 2019, no. 6, P.27.

21. Ali M. et al. Characterization and Evaluation of Engineered Coating Techniques for Different Cutting Tools—Review // [Coatings]. 2022, Vol. 12(8), P. 1124.

22. Ganeshkumar S. et al. Exploring the potential of nano technology: A assessment of nano-scale multi-layered-composite coatings for cutting tool performance. [Arabian Journal of Chemistry]. 2023, Vol. 16(8), pp. 1-12.

23. Shyrokyi, Yu.V. Theoretical Study of Temperature Fields of Copper during Formation of Nanostructured Layers in a Plasma Environment. Yu. V. Shyrokyi, A. Yu. Sysoiev, Yu.S. Panchenko [Aviation and Space Technology and Engineering]. 2022, no. 5, pp. 51-60.

24. Fox-Rabinovich G. et al. Application of carbide cutting tools with nano-structured multilayer composite coatings for turning austenitic steels, type 16Cr-10Ni [Mechanics & Industry]. 2017, Vol. 18, p. 9.

25. Formation of Nanostructures during High-Speed Processes of Ion and Laser Processing of Cutting Tools and Parts: Dissertation ... Candidate of Technical Sciences: 05.03.07 - Processes of Physical-Technical Processing: 13 - Mechanical Engineering: Defended 26.06.2020 / O. V. Matvieiev; National Aerospace University named after M. Ye. Zhukovsky "Kharkiv Aviation Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine; Supervisor G. I. Kostyuk. - Kharkiv, 2019, p. 185.

26. Fox-Rabinovich, G. et al. An effective way to improve the cutting performance of coated tools through annealing. [Surface and Coatings Technology]. 2001, Vol.148(2-3). pp. 373–380.

27. Sidorenko, D. Nanocomposites for Machining Tools. D. Sidorenko, P. Loginov, L. Mishnaevsky, E. Levashov [Nanomaterials], 2017, Vol. 7(9), P. 1171.

28. Sysoiev, Iur. Pulsed vacuum-arc plasma source with laser arc excitation. Iurii Sysoiev, Yurii Shyrokyi, Kseniia Fesenko. [Problems of Atomic Science and Technology (PAST)], 2024, No. 1 (149), pp. 110-115.

29. Kostyuk, G. I. Influence of the method of setting the thermophysical and thermomechanical characteristics of the B3 hard alloy on the nature and efficiency of the formation of nanostructures. G. I. Kostyuk, O. D. Semenenko [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technologies in mechanical engineering – Kharkiv], 2018, No. 34 (1310), pp. 40-46.

30. Sadeghi B. et al. Experimental study on the effect of CNT-enriched nanofluid lubrication on the performance of textured cutting tool in the turning of aluminum 7075 alloy. [Scientific Reports], 2023,. no. 13, pp. 22350.

31. Kostyuk, G. I. Comparison of temperature regimes in the zone of laser femtosecond processing of Volkar hard alloy using thermophysical and thermomechanical characteristics, stochastic values calculated by the quantum-mechanical method. G. I. Kostyuk, O. D. Grigor [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technologies in Mechanical Engineering – Kharkiv], 2018, no. 6 (1282), pp. 90-94.

32. Rizzo, A. et al. The Critical Raw Materials in Cutting Tools for Machining Applications: A Review. [Materials], 2020, no. 13(5), P1377.

33. Shyrokyi, Yu. V. Determination of the Influence of Internal Energies of the Crystal Lattice on Obtaining Nanostructures in Surface Layers of Aluminum Alloys Yu. V. Shyrokyi, [Open Information and Computer Integrated Technologies], 2023, no. 99, pp.32-43.

34. Shyrokyi, Yu.V. Study of Temperature Fields on Steels Taking into Account the Finite Speed of Heat Propagation during Modeling of Conditions for Obtaining Nanostructures in a Plasma Environment. Yu. V. Shyrokyi, Yu. O. Sysoiev, K. V. Fesenko, T. O. Postelnyk [Open Information and Computer Integrated Technologies], 2024, no. 101, pp. 98-111.

35. Baranova, T. A., Chubenko, A. K., Ryabikov, A. E, Mamaev, A. I., Mamaeva, V. A., Beletskaya, E. Yu. Microarc synthesis of nanostructured radiation-absorbing coatings on aluminum and titanium surface IOP Conference Series: [Materials Science and Engineering], 2017, vol. 286, pp. 1757-8981.

36. Kostyuk, G. Improving the resource and reliability of details from zirconium alloys during the application of nanocoating and formation of nanostructures G. Kostyuk, V. Popov [Bulletin of the National technical university "Kharkiv Polytechnic Institute" Series: Techniques in a machine industry], 2019, no. 19, pp. 40-50.

37. Kostyuk, G. Prospects for producing nanostructures in the volume of parts under the action of plasma flows / G. Kostyuk, O. Melkozirova, E. Kostyuk, I. Shyrokyi Cutting and Tools in Technological Systems. Kh.: NTU "KhPI", 2020, no. 92.P. 107-121.

Надійшла до редакції 29.10.2025, розглянута на редколегії 17.11.2025

Improving the efficiency of machine parts and cutting tools using combined processing methods

Combined strengthening mechanisms significantly improve the operational durability of cutting tools (CT) and machine-building parts. The application of simultaneous ion implantation along with plasma deposition of coatings based on molybdenum and tungsten ensures an increase in the wear resistance of steel parts by 2–10 times compared to materials treated with coating alone. Similarly, for hard and high-speed alloys, the combination of ion-plasma nitriding with nitride coatings increases wear resistance by 1.5–3 times. The effectiveness of such coatings and modified layers is determined by the parameters of integrated technologies, such as ion energy, fluence, substrate temperature, and plasma atmosphere composition. Research demonstrates that combined strengthening promotes the formation of nanostructured layers, leading to microhardness up to 46 GPa, an increase in cutting tool life by up to 65 times, part wear resistance by up to 60 times, corrosion resistance by up to 3.7 times, and fatigue strength by up to 1.7 times. Particularly indicative is the increase in fatigue strength, which confirms the formation of nanostructures during combined processing. These nanostructures, such as nanocomposites with grain sizes

of 10-50 nm, hinder crack propagation and enhance surface plasticity. For a deeper understanding, ion implantation involves accelerating ions (e.g., N⁺ or C⁺) to energies of 50-200 keV, modifying the surface to a depth of up to 1 µm. Plasma deposition, such as PVD or CVD, deposits layers with a thickness of 1-10 µm, creating a barrier against wear. The combination of these methods synergistically improves adhesion, reducing delamination by 1.5-2 times. In practice, for steel parts like 42CrMo4, such processing is applied in machine building for gears and shafts, extending service life in aggressive environments. Regarding hard alloys like WC-Co, plasma nitriding at 400-600°C saturates the surface with nitrogen, forming nitrides, while nitride coatings (TiN, CrN) add a protective layer. This is particularly effective for mills and drills, where wear is reduced due to a decrease in the friction coefficient to 0.1-0.3. Development prospects include integration with additive technologies for gradient structures, which will enable even higher resistance indicators. Overall, combined strengthening is key to modern materials science, ensuring resource savings and increased equipment reliability in industries from machine building to aerospace.

Keywords: combined machining, surface layer strengthening, increased wear resistance, part service life, cutting tool, increased machining productivity

Відомості про авторів:

Широкий Юрій Вячеславович – к.т.н., доцент, кафедра теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «ХАІ», i.shyrokyi@khai.edu; ORCID: [0000-0002-4713-0334](https://orcid.org/0000-0002-4713-0334)

Сисоєв Юрій Олександрович – д.т.н., проф., кафедра теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «ХАІ», e-mail: i.sysoiev@khai.edu, ORCID: [0000-0001-5006-8546](https://orcid.org/0000-0001-5006-8546).

Семененко Ольга Діонісівна – асистент, кафедра теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «ХАІ», o.semenenko@khai.edu, ORCID: [0009-0001-8425-562X](https://orcid.org/0009-0001-8425-562X).

Торосян Олена Василівна – асист. каф. теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем Національного аерокосмічного університету «ХАІ», o.tarasyan@khai.edu, Україна, ORCID: [0000-0002-7389-6093](https://orcid.org/0000-0002-7389-6093).

About the Authors:

Yurii Shyrokyi – Doctor of Philosophy, Assistant-Professor, Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: i.shyrokyi@khai.edu; ORCID: [0000-0002-4713-0334](https://orcid.org/0000-0002-4713-0334).

Yurii Sysoiev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine. e-mail: i.sysoiev@khai.edu, ORCID: [0000-0001-5006-8546](https://orcid.org/0000-0001-5006-8546), Scopus Author ID: 55886163000.

Olha Semenenko – Assistant, Theoretical Mechanics, Machine Science and Robotic Mechanical Systems Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine. e-mail: o.semenenko@khai.edu, ORCID: [0009-0001-8425-562X](https://orcid.org/0009-0001-8425-562X).

Olena Torosian – Assistant, Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine. e-mail: o.tarasyan@khai.edu, ORCID: [0000-0002-7389-6093](https://orcid.org/0000-0002-7389-6093).