

*Ю. М. КУХТЕНКОВ, Ю. Г. ПАЩЕНКО, М. А. ТКАЧУК, С. О. НАЗАРЕНКО***АНАЛІЗ ТА УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХОНЬ ГІДРАВЛІЧНИХ МАШИН**

В гідравлічних машинах при зростанні потужності висуваються на перший план проблеми дослідження міцності елементів їх конструкцій при дії навантажень. На конструкції гідравлічних машин впливають їх поверхні, площа контакту та робоче середовище. Розглядаються новітні технології обробки поверхонь, до яких відносяться інженерні технології, які поділяються на технології модифікації поверхні конструкцій та технології зміни форми поверхні. Більшість деталей гідравлічних машин працюють при високих навантаженнях в умовах різноманітних видів впливу, при яких максимальна напруга виникає у поверхневих шарах металу, де зосереджені основні концентратори. Завдяки розробці більш досконалих матеріалів та технологій зміцнення поверхонь можна при збереженні досить високої пластичності, в'язкості та тріщиностійкості покращити якість, надійність та довговічність гідравлічних машин. Розглянуті методи утворення поверхневих технологічних шарів конструкцій гідравлічних машин, які загалом поділяються на такі групи: механічні, гальванічні, фізичні, термічні, термомеханічні, хіміко-термічні. Формування покриттів на поверхні конструкцій складають технології зміцнення, такі як напильовання зносостійких з'єднань і осадження твердих опадів з парів: лазерне напильовання, детонаційне напильовання, катодно-іонне бомбардування, плазмове напильовання порошкових матеріалів, пряме електронно-променеве випаровування, електродугове напильовання. Нові конструкції машин використовують методи нанесення багат шарових, багат функціональних покриттів. У цих варіантах комбінованих (гібридних) технологій критерієм вибору є порівняння витрат на відновлення конструкцій гідравлічних машин. Розглянуті практичні методи поверхневого зміцнення конструкцій, що використовуються на виробництві гідромашин у АТ «Українські енергетичні машини». Впровадження новітніх технологій зміцнення поверхонь у виробництво гідравлічних машин потребують вкладення значних додаткових коштів, тому у кожному випадку їх впровадження потрібні обґрунтовані економічні розрахунки.

Ключові слова: гідравлічна машина, гідротурбіна, поверхня конструкції, технологія покриття, ультразвукове зміцнення поверхні, методи SNC, термічне зміцнення, комплексне іонно-плазмове зміцнення, кавітація.

*Yu. KUKHTENKOV, Yu. PASCHENKO, M. TKACHUK, S. NAZARENKO***ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF TECHNOLOGIES FOR STRENGTHENING SURFACE OF HYDRAULIC MACHINES**

In hydraulic machines, with increasing power, the problems of studying the strength of their structural elements under load are brought to the fore. The structures of hydraulic machines are influenced by their surfaces, contact area, and working environment. The latest surface treatment technologies are considered, which include engineering technologies, which are divided into technologies for modifying the surface of structures and technologies for changing the shape of the surface. Most parts of hydraulic machines operate at high loads under conditions of various types of influence, in which the maximum stress occurs in the surface layers of the metal, where the main concentrators are concentrated. Thanks to the development of more advanced materials and technologies for strengthening surfaces, it is possible to improve the quality, reliability, and durability of hydraulic machines while maintaining sufficiently high plasticity, toughness, and crack resistance. Methods for forming surface technological layers of hydraulic machine structures are discussed, which are generally divided into the following groups: mechanical, galvanic, physical, thermal, thermomechanical, and chemical-thermal. The formation of coatings on the surface of structures consists of strengthening technologies, such as spraying of wear-resistant compounds and deposition of solid precipitates from vapors: laser spraying, detonation spraying, cathode-ion bombardment, plasma spraying of powder materials, direct electron-beam evaporation, electric arc welding. New machine designs use methods of applying multilayer, multifunctional coatings. In these variants of combined (hybrid) technologies, the selection criterion is a comparison of the costs of restoring the structures of hydraulic machines. Practical methods of surface strengthening of structures used in the production of hydraulic machines at JSC "Ukrenergomashyn" are considered. The introduction of the latest surface finishing technologies into the production of hydraulic machines requires significant additional investment, therefore, in each case of their implementation, justified economic calculations are required.

Keywords: hydraulic machine, hydroturbine, structural surface, coating technology, ultrasonic surface hardening, SNC methods, thermal hardening, complex ion-plasma hardening, cavitation.

Вступ. Основні проблемні аспекти технологій зміцнення поверхонь сучасних гідравлічних машин. Інтенсифікація режимів функціонування сучасних гідравлічних машин при зростанні потужності висуває на перший план проблеми дослідження міцності елементів їх конструкцій при дії навантажень. На діяльність конструкцій гідравлічних машин впливають їх поверхні, площа контакту та робоче середовище, що висвітлено у ряді праць [1–7]. Галузь дослідження, відома як наука про поверхні, розроблена для повного розуміння характеристик поверхні та їхнього впливу на роботу різноманітних машин, що створює засади для обґрунтування передових технічних рішень [1; 6; 7].

Технологія поверхонь відноситься до інженерних технологій, які поділяються на технологію модифікації поверхні конструкцій та технологію зміни форми поверхні. Технологія поверхні конструкцій перетворилася на комплексну дисципліну, що охоплює матеріалознавство, трибологію, фізику,

хімію, і вона широко використовується в областях захисту від корозії, стійкості до зношування, ремонту та зміцнення, що дозволяє ефективно підвищити безпеку та надійність інженерного обладнання під час експлуатації [7]. Переваги та недоліки технологій модифікації поверхні та зміни форми поверхні гідравлічних машин показано на рис. 1.

Інженерія поверхні конструкцій є науковим напрямком, що займається розробкою методів обробки поверхневих шарів і нанесення покриттів із заданими властивостями, дослідженням їх структури та експлуатаційних властивостей. Ця діяльність за визначенням є дуже мультидисциплінарною (рис. 2).

Ефективне використання інженерії поверхні конструкцій гідравлічних машин вимагає інтегрованої стратегії на етапі проектування, яка передбачає співпрацю між інженерами поверхні та проєктувальниками. Багатодисциплінарна галузь інженерії поверхні спрямована на покращення експлуатаційної придатності інженерних конструкцій

шляхом налаштування їхніх поверхневих характеристик [1]. Довідник ASM (американське матеріалознавче науково-технічне товариство), загально визнаний як стандартне інформаційне видання з матеріалознавства, визначає інженерію поверхні як «обробку поверхні та приповерхневих ділянок матеріалу, щоб дозволити поверхні виконувати функції, які відрізняються від функцій, які вимагаються від об'єму матеріалу».

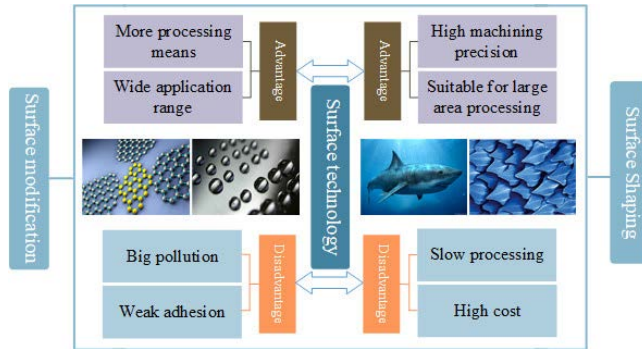


Рис. 1. Переваги та недоліки технології поверхонь для гідравлічного інженерного обладнання [7]

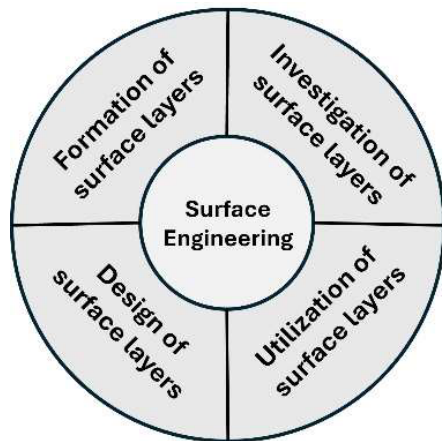


Рис. 2. Важливі області інженерії поверхні [6]

Зміцнення поверхонь гідравлічних машин.

Більшість деталей гідравлічних машин працюють при високих навантаженнях в умовах різноманітних видів впливу, при яких максимальна напруга виникає у поверхневих шарах металу, де зосереджені основні концентратори. Завдяки розробці більш досконалих матеріалів та технологій зміцнення поверхонь можна при збереженні досить високої пластичності, в'язкості та тріщиностійкості покращити якість, надійність та довговічність гідравлічних машин [1–7]. У більшості випадків перед початком експлуатації гідравлічних машин створюються на виробі в результаті формування поверхневі технологічні шари конструкцій.

Широкий вибір методів і матеріалів доступний для різноманітних застосувань покриттів із загальною метою захисту елементів або конструкцій гідравлічних машин, що піддаються механічним або хімічним пошкодженням [1; 6; 7]. Перевагою цієї захисної функції є зниження витрат на виробництво, оскільки виготовлення нових деталей не потрібне.

Доступні матеріали покриття конструкцій

включають тверді та жорсткі металеві сплави, кераміку, біоскло, полімери та технічні пластикові матеріали, що дає розмаїту свободу вибору методів для тривалого захисту гідравлічних машин. На сьогоднішній день представлені та досліджені численні процеси, такі як фізичне/хімічне осадження, мікродугове окислення, термічне напилення та електроосадження та ін. У статті [8] ці методи покриття класифікуються та порівнюються.

Механічні елементи та конструкції гідравлічних машин розроблені для певних застосувань. Перш ніж виготовляти ці деталі, необхідно виконати ряд значних обмежень щодо вибору матеріалів. Ці обмеження включають матеріали корпусу, механічні властивості (наприклад, стиснення, текучість, втома, вигин і повзучість), бажану функціональність (наприклад, властивості тертя, гідрофобність, зносостійкість), термічні властивості, електропровідність, динамічне навантаження (наприклад, вібрація) і стійкість до корозії. Крім того, слід враховувати інші параметри, такі як доступність, вартість матеріалів, безпека та токсичність цих матеріалів [8].

Сучасні технології зміцнення поверхонь гідравлічних машин. Методи утворення поверхневих технологічних шарів конструкцій гідравлічних машин загалом поділяються на такі групи: механічні, гальванічні, фізичні, термічні, термомеханічні, хіміко-термічні [1; 7–21]. Прикладом зміни хімічного складу поверхневого технологічного шару для зміцнення концентрованими потоками енергії є електроіскрове легування.

Формування покриттів на поверхні конструкцій складають технології зміцнення, такі як напилювання зносостійких з'єднань і осадження твердих опадів з парів: лазерне напилювання, детонаційне напилювання, катодно-іонне бомбардування, плазмове напилювання порошкових матеріалів, пряме електронно-променеве випаровування, електродугове наплавлення. Одними з найбільш розповсюджених електродних матеріалів для автоматичного і напівавтоматичного електродугового наплавлення деталей машин є порошкові дроти для зміцнення деталей машин, розроблені спеціалістами Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України.

При зміні структури поверхневого шару конструкцій машин використовують наступні види обробки: наплавлення легуванням металом – газовим полум'ям, плазмою, електричною дугою, пучком іонів, електроконтактним способом, лазерним променем; механічні методи обробки – вібраційно-ударна, фрикційно-зміцнюча, гідроабразивна, зміцнення вибухом; електрофізичні методи обробки – електромеханічна, ультразвукова, електрогідроімпульсна; фізико-термічні методи обробки – лазерна, іонно-променева, електронно-променева обробка, плазмове гартування, поверхнєве загартування киснево-ацетиленовим полум'ям [7–21].

Хоча кожен із цих процесів має переваги, завжди є недоліки, які обмежують їх застосування. Однак існує багато рішень для подолання недоліків методів кожного процесу нанесення покриттів конструкцій гідравлічних машин шляхом використання переваг

багатометодного нанесення покриття.

Комплексні багатоопераційні технології нанесення покриттів. Характерною особливістю технологій нанесення покриттів є те, що не вдається отримати одночасне підвищення усіх властивостей конструкцій машин для всіх режимів експлуатації. Навіть один і той же матеріал покриття, але нанесений різними способами, показує розбіжні експлуатаційні властивості.

Для усунення цього недоліку при проектуванні конструкцій машин використовують метод нанесення багатошарових, багатофункціональних покриттів. За даними Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона в США і Західній Європі комплексні (інтегровані, комбіновані) багатоопераційні технології нанесення покриттів отримали назву «гібридні процеси» зміцнення [13–15].

У всіх варіантах комбінованих (гібридних) технологій критерієм вибору є порівняння витрат на відновлення конструкцій гідравлічних машин. Кожна технологія поверхневого зміцнення (відновлення) має свою нішу оптимальних умов використання. Вирішальним фактором у виборі методів нанесення багатофункціональних покриттів у комбінованому процесі відновлення конструкцій гідравлічних машин є наявність на підприємстві самостійних видів устаткування і можливість інтегрувати їх в єдиний технологічний цикл [13–15].

Методи створення сплавів з наноструктурованою поверхнею. Сплави чорних металів, зокрема сталі, утворюють спеціалізований клас металевих матеріалів, які широко використовуються в машинобудуванні. Незважаючи на свої позитивні механічні властивості, сталі не захищені від деградації, викликані зносом.

У цьому контексті технології поверхневої нанокристалізації (SNC) створили окрему нішу, уможлиблюючи наноструктурування поверхневого шару (з розміром зерна < 100 нм). Цей процес покращує загальні механічні властивості до рівня, бажаного для стійкості до зношування, зберігаючи при цьому хімічний склад.

У огляді [18] представлено комплексний аналіз методів SNC, які використовуються для обробки поверхні чорних сплавів, і їх вплив на функцію зношування. Існуюча література виділяє ефективність різних методів SNC для підвищення зносостійкості сплавів чорних металів, позиціонуючи SNC як перспективний інструмент для продовження терміну служби матеріалів у практичних застосуваннях [19; 20].

Класифікація методів SNC, що застосовуються для модифікації сплавів чорних металів, представлена на рис. 3. Важливо підкреслити, що, незважаючи на дослідження [20], яке демонструє здійснимість непрямих методів, здатних модифікувати поверхню без прямого контакту між поверхнею сплаву та наконечником інструменту, наприклад, кавітаційне оброблення поверхонь нержавіючої сталі, рис. 3 представляє, що досі використовувалися лише прямі технології для створення нанокристалічних поверхневих шарів на сплавах чорних металів.

Прямі стохастичні підходи включають елементи,

що впливають на поверхню сплаву нерівномірним чином, що призводить до випадкових модифікацій поверхні. З іншого боку, прямі детерміновані методи використовують наконечники інструментів, які деформують поверхневий шар адекватним і регульованим чином.

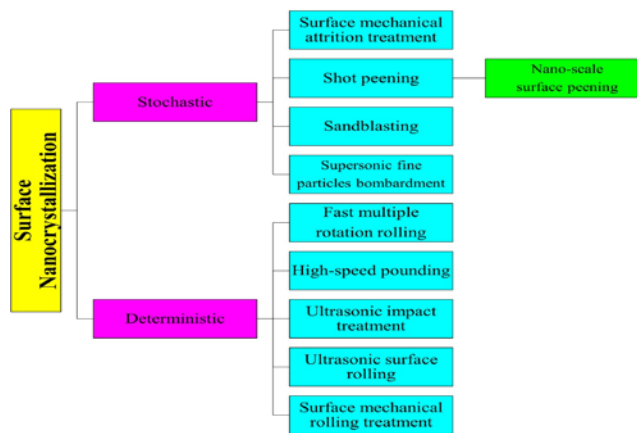


Рис. 3. Класифікація методів створення сплавів з наноструктурованою поверхнею [18]

У статті [18] представлено дослідження впливу поверхневої нанокристалізаційної обробки на зношуваність сплавів чорних металів. Воно продемонструвало, як технології SNC можуть створити нанокристалічний поверхневий шар товщиною приблизно 150 мкм із розміром зерен менше 40 нм. Було виявлено, що шорсткість поверхні сплавів, оброблених SNC, змінюється залежно від застосованого методу.

Важливо, що всі сплави, оброблені SNC, показали значно покращену зносостійкість порівняно з їх необробленими аналогами, що підкреслює суттєву роль SNC у підвищенні зносостійкості матеріалів на основі Fe. Підвищена твердість у результаті обробки SNC та утворення трибошару поверхні значно сприяє покращенню зносостійкості цих сплавів.

Технології термічного зміцнення поверхні конструкцій. Стискаючі залишкові напруження в поверхневому шарі матеріалу збільшують втомну міцність деталей. Традиційно стискаючі залишкові напруження створюються поверхневою пластичною деформацією за допомогою дробоструминної, віброабразивної або ультразвукової обробки, а також алмазним вигладжуванням. В останні роки за козлом для створення стискаючих залишкових напружень у поверхневому шарі матеріалу все більшого поширення набуває ударна лазерна обробка або скорочено лазерний удар [21].

Ефективно зміцнити конструкційні матеріали з високою міцністю та/або низькою пластичністю складно з двох причин. По-перше, для подальшого зміцнення високоміцних матеріалів потрібні більш агресивні умови обробки, такі як довший час та більш високий тиск, які наближаються до меж звичайних методів поверхневого зміцнення. По-друге, такі агресивні умови обробки збільшують ймовірність порушення цілісності поверхні, а підповерхневі тріщини для високоміцних матеріалів часто мають відносно низьку пластичність.

Технології термічного зміцнення поверхні конструкцій призвели до збільшення дослідницьких зусиль і промислових застосувань, з акцентуванням на створенні металевих матеріалів з високим зміцненням, високою міцністю та/або поганою здатністю до деформації. У роботі [21] розглядається розробка поширених методів термічного зміцнення поверхні конструкцій, включаючи теплове дробоструминне оброблення, теплове лазерне ударне оброблення та термічне ультразвукове зміцнення поверхні.

У порівнянні зі звичайними методами поверхневого зміцнення, методи термічного зміцнення поверхні з оптимальними температурами обробки можуть додатково підвищити поверхневу та підповерхневу твердість, товщину шару зміцнення, довговічність і зносостійкість механічних компонентів. Покращення пов'язані з унікальними мікроструктурами, створеними завдяки синергічним ефектам теплової енергії та пластичної деформації з високою швидкістю деформації.

Теплова енергія може розм'якшити матеріали, дозволяючи пластичній деформації створити більшу величину та глибшу область нагартівки [21]. Термомеханічна обробка також може викликати динамічну преципітацію в металевих сплавах, що призводить до дискретного зміцнення та підвищеної стабільності дислокацій і залишкової напружки стиснення.

Технології поверхневого зміцнення, такі як дробоструминна обробка деформацією (SP), поверхнева механічна обробка тертям (SMAT), лазерне ударне зміцнення (LSP) і ультразвукове зміцнення поверхні регулярно використовуються для поліпшення механічних властивостей компонентів конструкцій, включаючи поверхневу твердість, довговічність і зносостійкість. Такі покращення реалізуються завдяки пластичній деформації з високою швидкістю деформації, спричиненій інтенсивними ударами, що застосовуються до поверхонь, які створюють дислокації високої щільності, подрібнені зерна, а також залишкову напругу стиснення (CRS) на поверхні та під поверхнею. На рис. 4 представлені схеми загальних методів поверхневого зміцнення конструкцій машин та агрегатів.

Лазерне ударне зміцнення, нова та ефективна технологія зміцнення поверхні, використовує високочастотні імпульсні лазери для впливу на поверхню конструкцій з високою піковою щільністю потужності протягом десятків наносекунд. Поглинаючий шар на поверхні конструкцій поглинає лазерну енергію, викликаючи вибухову газифікацію та випаровування, створюючи плазму високого тиску, яка генерує ударні хвилі високого тиску, що діють на поверхню металу, утворюючи щільну та стабільну дислокаційну структуру в поверхневому шарі матеріалу та вводючи достатньо великий шар залишкових напружень, тим самим значно покращуючи властивості стійкості матеріалу до втоми та корозії.

Методи поверхневого зміцнення конструкцій SP і SMAT використовують кульки, виготовлені з металу, скла або кераміки, для бомбардування компонента,

утворення ямок на поверхні та викликання локальної пластичної деформації та ударних хвиль у матеріалі, як показано на рис. 4, а. Метод поверхневого зміцнення конструкцій LSP використовує короточасні лазерні імпульси високої щільності енергії для створення швидко розширюваної плазми шляхом абляції шару на поверхні компонента. Плазма, що розширюється, обмежена між поверхнею та прозорим утримуючим шаром, створює ударну хвилю, викликаючи пластичну деформацію в металі, як показано на рис. 4, b.

Ультразвукове зміцнення поверхні за допомогою фіксованого наконечника або кульки, що переміщується, використовує електромеханічний перетворювач для генерації ультразвукових коливань для впливу на поверхню, як показано на рис. 4, c. Пристрої, засновані на цьому принципі роботи, включають ультразвукову ударну обробку (UIT), ультразвукову обробку поверхні прокаткою (USRP) і ультразвукову модифікацію поверхні нанокристалів (UNSM).

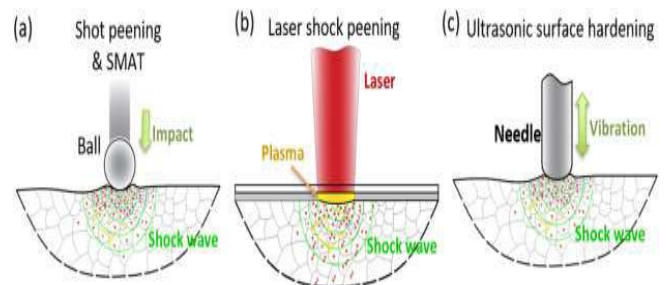


Рис. 4. Схеми трьох типів методів зміцнення поверхні: а – SP і SMAT; b – LSP; c – ультразвукове зміцнення поверхні [21]

Термічна обробка та дробоструминне зміцнення після механічної обробки можуть не тільки усунути залишкові розтягуючі напруження, що виникають, але й мінімізувати негативний вплив небажаних мікроструктур, що утворюються під час процесу виробництва, що дозволяє покращити втомну довговічність та міцність. Шар залишкових стискаючих напружень від лазерного ударного зміцнення в 4–5 разів більший, ніж у звичайного дробоструминного зміцнення.

Методи поверхневого зміцнення конструкцій, що використовуються на виробництві у АТ «Українські енергетичні машини» (раніше АТ «Турбоатом», Харків). З метою забезпечення терміну експлуатації гідротурбінного обладнання як під час гарантійного періоду – 24 місяці так і під час терміну експлуатації агрегату – 200 тис. годин АТ «Українські енергетичні машини» сьогодні використовує наступні методи поверхневого зміцнення конструкцій:

1. Для деталей гідротурбін з метою зменшення впливу кавітації на елементи проточної частини використовуються сталі з високим вмістом хрому (від 12 % до 18 %), або наплавка поверхонь, які необхідно захистити від корозії і від абразивного впливу електродами, що містять близько 25 % хрому.

2. Зміцнення поверхневого шару сталі з низьким вмістом вуглецю здійснюється шляхом цементації – насичення поверхневого шару сталі (сталь 3, сталь 20 та ін.) з наступним загартуванням та нормалізацією.

Товщина загартованого слою від 0,5 мм до 2 мм в залежності від умов експлуатації. Температура експлуатації деталей до 250°C.

3. Азотування сталі – вид хіміко-термічної обробки, котрий полягає у насиченні азотом поверхневого шару виробів із легованої сталі або чавуну. Температура експлуатації деталей до 500°C.

4. Комплексне іонно-плазмове зміцнення:

- Очищення виробу у вакуумній камері – газовий розряд що горить в атмосфері аргону.

- Азотування сталеві основи – газовий розряд, що горить в атмосфері азоту.

- Нанесення захисних зносостійких покриттів – нанесення на зміцнений (азотований) шар нітриду титана (TiN) або нітриду молибдену (MoN).

Комплексне іонно-плазмове зміцнення зазвичай застосовується для подовження циклу міжремонтного періоду в шарнірних з'єднаннях, особливо коли вони працюють в умовах підвищених температур (450 °C–550 °C).

Висновки. У цілому здійснений аналіз проблем удосконалення технологій зміцнення поверхонь гідравлічних машин дає підстави обґрунтувати такі висновки:

1. Проаналізовано використання інженерії поверхні при створенні конструкцій гідравлічних машин.

2. Досліджено сучасні технології зміцнення поверхонь гідравлічних машин.

3. Проаналізовано основні проблемні аспекти сучасних технологій зміцнення поверхонь гідравлічних машин.

4. Досліджено технології термічного зміцнення поверхні конструкцій.

5. Вивчено методи створення сплавів з наноструктурованою поверхнею.

6. Опрацьовано комплексні багатоопераційні технології нанесення покриттів.

7. Розглянуто приклади використання на практиці методів поверхневого зміцнення деталей гідротурбінного обладнання на виробництві АТ «Українські енергетичні машини».

Загальним висновком є констатація того, що натеper проблема удосконалення технологій зміцнення поверхонь гідравлічних машин та гідроагрегатів ще не має довершеного рішення. Потрібні нові дослідження гідравлічних машин, що створюють засади для обґрунтування передових технічних вирішень. Крім того, впровадження запропонованих новітніх технологій у виробництво гідравлічних машин потребують вкладення значних додаткових коштів, тому у кожному випадку їх впровадження потрібні обґрунтовані економічні розрахунки.

Список літератури

- Mathonsi T., Laubscher R. F. Complementary Machining – Machining Strategy for Surface Modification: A Review. *Science, Engineering and Technology*. 2025. Vol. 5, no. 1. P. 1–25.
- Кухтенков Ю. М., Назаренко С. О. Математичні моделі взаємодії конструкцій з рідиною та розрахунки на міцність і резонанс лопатевих гідромашин. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv : NTU "KhPI". 2023. No. 1. P. 82–86. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.14
- Doujak E., Maly A., Unterluggauer J., Haller F., Maier M., Blasbichler C., Stadler S. Fatigue Strength Analysis of a Prototype Francis Turbine in a Multilevel Lifetime Assessment Procedure Part III: Instrumentation and Prototype Site Measurement. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 16. P. 6072. doi: 10.3390/en16166072
- Bogomolov S. I., Lutsenko S. S., Nazarenko S. A. Application of a superparametric finite shell element to the calculation of turbine blade vibrations. *Strength of Materials*. 1982. Vol. 14, no. 6. P. 796–799.
- Кухтенков Ю. М., Назаренко С. О. Огляд проблеми втомної міцності робочих коліс радіально-осьових гідротурбін. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv : NTU "KhPI". 2024. No. 2. P. 54–61. doi: 10.20998/2411-3441.2024.2.08
- Astakhov V. P. Surface integrity—definition and importance in functional performance. *Surface integrity in machining*. London: Springer, 2010. P. 1–35. doi: 10.1007/978-1-84882-874-2_1
- Xu J., Lu H., Cai L., Liao Y., Lian J. Surface Protection Technology for Metallic Materials in Marine Environments. *Materials*. 2023. Vol. 16, issue 20. P. 6822. doi: 10.3390/ma16206822
- Fotovvati B., Namdari N., Dehghanghadikolaei A. On coating techniques for surface protection: A review. *Journal of Manufacturing and Materials processing*. 2019. Vol. 3, issue 1. P. 28–45. doi: 10.3390/jmmp3010028
- Ibrahim H., Jahadakbar A., Dehghan A., Moghaddam N. S., Amerinatanz A., Elahinia M. In vitro corrosion assessment of additively manufactured porous NiTi structures for bone fixation applications. *Metals*. 2018. Vol. 8, issue 3. P. 164. doi: 10.3390/met8030164
- Mao C., Cai P., Hu Y., Zhong Y., Wei J., Bi Z., Jiang Y., Xiao L., Zhang M. Effect of laser-discrete-quenching on bonding properties of electroplated grinding wheel with AISI 1045 steel substrate and nickel bond. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2021. Vol. 34, issue 6. P. 79–89. doi: 10.1016/j.cja.2020.09.010
- Yu Z., Li C., Chen Z., Li Y., Han X. Sensitivity Analysis of Laser Quenching Parameters of ASTM 1045 of Disk Laser Based on Response Surface Method. *Metals and Materials International*. 2021. Vol. 27. P. 1236–1251. doi: 10.1007/s12540-019-00437-6
- Hung T. P., Tsai H. A., Lin A. D. Investigation of Surface Residual Stress for Medium Carbon Steel Quenched by YAG Laser with Extended Cycloidal Motion. *Metals*. 2022. Vol. 12, issue 11. P. 1903. doi: 10.3390/met12111903
- Красота М. В., Осін Р. А. Огляд методів зміцнення посадочних поверхонь корпусних деталей автотракторної техніки. *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем. Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції (19–21 квітня 2023 р., Кропивницький)*. Кропивницький : ЦНТУ, 2023. С. 12–14.
- Аулін В. В., Лисенко С. В., Кузик О. В., Гриньків А. В., Голуб Д. В. *Трибофізичні основи підвищення надійності мобільної сільськогосподарської та автотранспортної техніки технологіями триботехнічного відновлення: монографія*. Кропивницький : видавництво Лисенко В. Ф., 2016. 303 с.
- Лопата Л. А., Солових А. Є., Катеринич С. Є., Магопєць С. О. Застосування гібридних технологій для відновлення та підвищення строку служби деталей транспортних засобів. *Підвищення надійності і ефективності машин, процесів і систем. Матеріали V міжнародної науково-практичної конференції (19–21 квітня 2023 р., Кропивницький)*. Кропивницький : ЦНТУ, 2023. С. 140–144.
- Vasetskaya L. Analysis and comparison of mechanical and chemical properties of protective coatings obtained at different combinations of "target – substrate". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 2, no. 12 (98). P. 19–27. doi: 10.15587/1729-4061.2019.161292
- Arthur E. K., Azeko S. T. Surface hardening of ferrous materials with cassava (Manihot spp.) waste: A review. *Scientific African*. 2020. Vol. 9. P. e00483. doi: 10.1016/j.sciaf.2020.e00483
- Morshed-Behbahani K., Farhat Z., Nasiri A. Effect of Surface Nanocrystallization on Wear Behavior of Steels: A Review. *Materials*. 2024. Vol. 17, issue 7. P. 1618. doi: 10.3390/ma17071618
- Rakesh N., Rameshkumar K. Activated flux induced Tungsten inert gas welding of Ferrous alloys-A Review. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2272. P. 012020. doi: 10.1088/1742-6596/2272/1/012020
- Morshed-Behbahani K., Zakerin N. A review on the role of surface nanocrystallization in corrosion of stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022. Vol. 19. P. 1120–1147. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.05.094
- Liu J., Ye C., Dong Y. Recent development of thermally assisted

surface hardening techniques: A review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2021. Vol. 2. P. 100006. doi: 10.1016/j.aim.2020.100006

References (transliterated)

- Mathonsi T., Laubscher R. F. Complementary Machining – Machining Strategy for Surface Modification: A Review. *Science, Engineering and Technology*. 2025, vol. 5, no. 1, pp. 1–25.
- Kukhtenkov Yu. M., Nazarenko S. O. Matematychni modeli vzayemodiyi konstruktivnykh i hidromashyn ta rozrakhunkiv na mitsnist' i rezonans lopatevykh hidromashyn [Mathematical models of the interaction of structures with liquid and calculations on the strength and resonance of blade hydraulic machines]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2023, no. 1, pp. 82–86. doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.14
- Doujak E., Maly A., Unterluggauer J., Haller F., Maier M., Blasbichler C., Stadler S. Fatigue Strength Analysis of a Prototype Francis Turbine in a Multilevel Lifetime Assessment Procedure Part III: Instrumentation and Prototype Site Measurement. *Energies*. 2023, vol. 16, no. 16, p. 6072. doi: 10.3390/en16166072
- Bogomolov S. I., Lutsenko S. S., Nazarenko S. A. Application of a superparametric finite shell element to the calculation of turbine blade vibrations. *Strength of Materials*. 1982, vol. 14, no. 6, pp. 796–799.
- Kukhtenkov Yu. M., Nazarenko S. O. Ohlyad problemy vtomnoyi mitsnosti robochykh kolis radial'no-os'ovykh hidroturbin [Review of the problem of fatigue strength of radial-axial hydraulic turbine wheels]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2024, no. 2, pp. 54–61. doi: 10.20998/2411-3441.2024.2.08
- Astakhov V. P. Surface integrity–definition and importance in functional performance. *Surface integrity in machining*. London, Springer Publ., 2010. P. 1–35. doi: 10.1007/978-1-84882-874-2_1
- Xu J., Lu H., Cai L., Liao Y., Lian J. Surface Protection Technology for Metallic Materials in Marine Environments. *Materials*. 2023, vol. 16, issue 20, p. 6822. doi: 10.3390/ma16206822
- Fotovvati B., Namdari N., Dehghanghadikolaei A. On coating techniques for surface protection: A review. *Journal of Manufacturing and Materials processing*. 2019, vol. 3, issue 1, pp. 28–45. doi: 10.3390/jmmp3010028
- Ibrahim H., Jahadakbar A., Dehghan A., Moghaddam N. S., Amerinatanzi A., Elahinia M. In vitro corrosion assessment of additively manufactured porous NiTi structures for bone fixation applications. *Metals*. 2018, vol. 8, issue 3, p. 164. doi: 10.3390/met8030164
- Mao C., Cai P., Hu Y., Zhong Y., Wei J., Bi Z., Jiang Y., Xiao L., Zhang M. Effect of laser-discrete-quenching on bonding properties of electroplated grinding wheel with AISI 1045 steel substrate and nickel bond. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2021, vol. 34, issue 6, pp. 79–89. doi: 10.1016/j.cja.2020.09.010
- Yu Z., Li C., Chen Z., Li Y., Han X. Sensitivity Analysis of Laser Quenching Parameters of ASTM 1045 of Disk Laser Based on Response Surface Method. *Metals and Materials International*. 2021, vol. 27, pp. 1236–1251. doi: 10.1007/s12540-019-00437-6
- Hung T. P., Tsai H. A., Lin A. D. Investigation of Surface Residual Stress for Medium Carbon Steel Quenched by YAG Laser with Extended Cycloidal Motion. *Metals*. 2022, vol. 12, issue 11, p. 1903. doi: 10.3390/met12111903
- Krasota M. V., Osin R. A. Ohlyad metodiv zmitsnennya posadochnykh poverkhon' korpusnykh detaley avtotraktornoyi tekhniki [Review of methods for strengthening the mounting surfaces of body parts for automotive and tractor equipment]. *Pidvyshchennya nadiynosti i efektyvnosti mashyn, protsesiv i system. Materialy V mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi (19–21 kvitnya 2023 r., Kropyvnyts'kyi)* [Improving the reliability and efficiency of machines, processes and systems. Materials of the V Int. Sci.-Pract. Conf. (19–21 April 2023, Kropyvnytskyi)]. Kropyvnytskyi, TsNTU Publ., 2023, pp. 12–14.
- Aulin V. V., Lysenko S. V., Kuzyk O. V., Hryn'kiv A. V., Holub D. V. Trybofizychni osnovy pidvyshchennya nadiynosti mobil'noyi sil'skohospodars'koyi ta avtotransportnoyi tekhniki [Tribophysical foundations for improving the reliability of mobile agricultural and motor transport equipment using tribotechnical restoration technologies: monograph]. Kropyvnytskyi, Lysenko V. F. Publ., 2016. 303 p.
- Lopata L. A., Solovykh A. Ye., Katerynych S. Ye., Mahopets' S. O. Zastosuvannya hibrnydykh tekhnolohiy dlya vidnovlennya ta pidvyshchennya stroku sluzhby detaley transportnykh zasobiv [Application of hybrid technologies for restoration and extension of service life of vehicle parts]. *Pidvyshchennya nadiynosti i efektyvnosti mashyn, protsesiv i system. Materialy V mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi (19–21 kvitnya 2023 r., Kropyvnyts'kyi)* [Improving the reliability and efficiency of machines, processes and systems. Materials of the V Int. Sci.-Pract. Conf. (19–21 April 2023, Kropyvnytskyi)]. Kropyvnytskyi, TsNTU Publ., 2023, pp. 140–144.
- Vasetskaya L. Analysis and comparison of mechanical and chemical properties of protective coatings obtained at different combinations of "target – substrate". *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019, vol. 2, no. 12 (98), pp. 19–27. doi: 10.15587/1729-4061.2019.161292
- Arthur E. K., Azeko S. T. Surface hardening of ferrous materials with cassava (Manihot spp.) waste: A review. *Scientific African*. 2020, vol. 9, p. e00483. doi: 10.1016/j.sciaf.2020.e00483
- Morshed-Behbahani K., Farhat Z., Nasiri A. Effect of Surface Nanocrystallization on Wear Behavior of Steels: A Review. *Materials*. 2024, vol. 17, issue 7, p. 1618. doi: 10.3390/ma17071618
- Rakesh N., Rameshkumar K. Activated flux induced Tungsten inert gas welding of Ferrous alloys-A Review. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022, vol. 2272, p. 012020. doi: 10.1088/1742-6596/2272/1/012020
- Morshed-Behbahani K., Zakerin N. A review on the role of surface nanocrystallization in corrosion of stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022, vol. 19, pp. 1120–1147. doi: 10.1016/j.jmrt.2022.05.094
- Liu J., Ye C., Dong Y. Recent development of thermally assisted surface hardening techniques: A review. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2021, vol. 2, p. 100006. doi: 10.1016/j.aim.2020.100006

Надійшло (received) 30.05.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Кухтенков Юрій Михайлович (Kukhtenkov Yuriy) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Гідравлічні машини ім. Г. Ф. Проскури»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9210-7486>; e-mail: kuhtenkov.um@gmail.com

Пащенко Юрій Григорович (Paschenko Yuriy) – АТ «Українські енергетичні машини», головний технолог; м. Харків, Україна; e-mail: paschenko@ukrenergymachines.com

Ткачук Микола Анатолійович (Tkachuk Mykola) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>; e-mail: tma@tmm-sap.org

Назаренко Сергій Олександрович (Nazarenko Sergiy) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут, науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8213-6590>; e-mail: nazarenkoserzh7@gmail.com