

УДК 621.43:62-192

**М. А. ТКАЧУК, С. О. КРАВЧЕНКО, В. В. ШПАКОВСЬКИЙ, М. Л. БЕЛОВ, О. І. ШЕЙКО,  
В. І. ДЕМИДЕНКО, С. С. Д'ЯЧЕНКО, Е. К. ПОСВЯТЕНКО, В. Г. ГОНЧАРОВ**

## **РОЗВИТОК МЕТОДІВ ЗМІЦНЕННЯ НАЙБІЛЬШ НАВАНТАЖЕНИХ ДЕТАЛЕЙ – ШЛЯХ ДО ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНІЧНИХ І ТАКТИКО-ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАШИН**

У роботі на основі теоретико-множинного підходу запропоновані нові концепції і методи підвищення ресурсу серії двигунів і спеціальної техніки шляхом створення нових технологій зміцнення поверхонь їхніх деталей, а також у вирішенні низки фундаментальних і прикладних завдань. Розроблена концепція узагальненого параметричного моделювання складних механічних систем при нечітких критеріях, аналізу процесів та синтезу нових технологій зміцнення для збільшення ресурсу серії двигунів і агрегатів спеціальної техніки. Науково обґрунтовані матеріали, режими та параметри процесів зміцнення для розроблених методів дискретного зміцнення, корундування та іонного бомбардування зі створенням мікронаноструктур та проектно-технологічні рішення при створенні та ремонті двигунів і агрегатів спеціальної техніки.

**Ключові слова:** технологія зміцнення поверхонь, підвищення ресурсу, дискретне зміцнення, корундування, іонне бомбардування

**Вступ.** Сучасні машини з точки зору розробки фізичних принципів їх дії та конструктивної досконалості досягли досить високих рубежів. В силу цих обставин подальше зростання їхніх технічних і тактико-технічних характеристик (ТХ і ТТХ) найбільш доцільно та ефективно здійснювати за рахунок поліпшення технології їхнього виготовлення, ремонту та відновлення. У першу чергу це стосується транспортних засобів військового та цивільного призначення, енергетичних і технологічних машин, обладнання.

Виходячи з цього, авторський колектив здійснив комплексну розробку, спрямовану на підвищення ТХ і ТТХ серії двигунів і агрегатів для спеціальної техніки на основі створення нових ефективних методів дискретного зміцнення їхніх найбільш навантажених і відповідальних деталей. Сформульована мета зумовила цілий комплекс досліджень та розробок, які за своїм обсягом, актуальністю та значимістю досягли рівня роботи, що претендує на здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки у 2015 році. Подальший виклад матеріалу статті слідує основним положенням поданої роботи [<http://www.kdpu-nt.gov.ua/work/seriya-dvigniv-i-agregati-dlya-specialnoyi-tehniki>].

**Постановка задач дослідження.** Проблема створення надійних двигунів і агрегатів для цивільної та військової техніки, забезпечення високих технічних і тактико-технічних характеристик за мінімальних витрат, енергоефективних та екологічно безпечних методів виробництва, безумовно, є одним із важливих завдань для України. Як відомо, об'єкти спеціальної техніки працюють у важких умовах експлуатації. На деталі та агрегати одночасно здійснюється вплив багатьох чинників – високих і неоднорідно розподілених напружень, циклічних навантажень, які викликають втому матеріалу деталей, високі температури та тертя, результатом якого є підвищений знос контактуючих поверхонь, вплив агресивного середовища тощо. Тому при виробництві спеціальної техніки необхідний пошук і застосування таких технологій, які дозволили би хоча б частково вирішити ці завдання. Так, за статистикою, двигуни транспортних машин мають достатньо обмежений ресурс. Це призводить до колосальних фінансових витрат. Однією із основних причин зниження ресурсу є зношування шатунно-поршневої групи. Матеріальні витрати в наслідок зношування в машинобудуванні роз-

винених промислових країн становлять 4–5 % національного доходу. З літературних даних відомо, що витрати енергії на опір тертю становлять 30–40 % від усієї енергії, виробленої у світі протягом року. У той же час витрати на ремонт і технічне обслуговування техніки іноді в декілька разів перевищують її вартість. Двигуни транспортної техніки за весь термін служби підлягають капітальному ремонту близько 5 разів. Ресурс двигуна після капітального ремонту, порівняно із новим двигуном, становить 30–50 %, хоча виходячи із технічних умов повинен бути не нижче 80 %. Як показує практика, близько 75 % деталей двигуна, що ремонтуються, знаходяться в робочому стані і мають великий залишковий ресурс. У зв'язку із цим проблема підвищення зносостійкості деталей транспортних засобів є актуальною і потребує всебічного вивчення. При цьому технологічні процеси виробництва, ремонту і відновлення деталей і агрегатів повинні забезпечувати підвищення зносостійкості поверхонь пар тертя.

Створення нових технологій, що не здійснюють високого температурного впливу на відновлювану деталь при її зміцненні дає підвищення їх зносостійкості, значно підвищує ресурс та довговічність роботи двигунів і агрегатів спеціальної техніки. Це дасть можливість підвищити конкурентоспроможність української машинобудівної продукції на світовому ринку.

**Метою** роботи є розробка науково-технічних основ підвищення ресурсу та забезпечення міцності, довговічності, ТХ і ТТХ серії двигунів і агрегатів для спеціальної техніки за рахунок застосування технологій дискретного зміцнення робочих поверхонь чавунних і сталевих деталей та зміцнення поверхонь алюмінієвих деталей гальвано-плазмовим методом, створення комплексної технології, яка об'єднує переваги перших двох, а також способу іонного бомбардування.

Задля досягнення поставленої мети вирішувалися наступні **завдання**.

1. Виконати аналіз науково-технічної інформації щодо підвищення ресурсу високонавантажених деталей з використанням існуючих способів зміцнення.

2. Запропонувати нові методи формування твердих зносостійких поверхонь алюмінієвих, чавунних і сталевих деталей (гальвано-плазмове перетворення і дискретне зміцнення, поверхневе пластичне деформування та іонне бомбардування) як альтернативу стандартним технологі-

ям поверхневого зміцнення методом напилювання зносостійких покриттів поверхонь і технологіям з міцнення поверхонь чавунних і сталевих деталей методом азотування, СВЧ тощо.

3. Провести теоретичні дослідження ефективності використання розроблених технологій при виготовленні та ремонті двигунів і агрегатів спеціальної техніки.

4. Проаналізувати зміну структури і властивостей приповерхневих шарів матеріалів при зміцненні поверхні і оптимізувати їх режими для отримання необхідних експлуатаційних характеристик об'єктів.

5. Дослідити процеси і стани в парі взаємодіючих тіл, оброблених за пропонованими технологіями.

6. Розробити і виготовити устаткування і оснащення для реалізації розроблених проектно-технологічних рішень.

**Аналіз стану проблеми.** До об'єктів спеціальної техніки, які розглядаються в цій роботі, відносяться бронемашини, тягачі, автомобілі, тепловози різного призначення, автономні установки енергозабезпечення тощо, а також різноманітні агрегати і захисні елементи конструкцій. Основними вимогами до них є надійність та безвідмовність у роботі. Так, двигуни бойових машин працюють у важких умовах, піддаються впливу високих теплових і механічних навантажень, особливо за високих та низьких температур навколишнього середовища. Це сприяє збільшенню навантажень на деталі високонавантажених пар, що збільшує їх зношування. Захисні елементи підлягають дії ударно-імпульсних навантажень. Це істотно підвищує вимоги до властивостей матеріалу, якості і стану робочих поверхонь деталей.

Звичай для деталей, що працюють в умовах підвищених навантажень, тертя і зношування, застосовують комплексну термічну обробку – спочатку виконують об'ємне зміцнення, яке знімає залишкові напруження і забезпечує властивості серцевини, потім – поверхнєве зміцнення для досягнення високої зносостійкості [1–6]. Матеріал таких деталей в серцевині повинен мати високу міцність, в тому числі і в'язкість, певний запас пластичності. Наприклад, для сталевих і чавунних колінчастих валів найчастіше такий комплекс властивостей досягається нормалізацією. Зміцнення робочих поверхонь шийок таких валів забезпечують застосуванням різних технологій, у тому числі азотуванням або загартуванням з використанням СВЧ. Ці методи не є оптимальними. Азотування є дуже тривалим процесом (більше 70 годин) і призводить до істотної втрати міцності серцевини та, як наслідок, до великої залишкової деформації вала в кінцевому результаті. Поверхнєве зміцнення знижує втомну міцність, що неприпустимо, оскільки, як правило, зношування поверхонь тертя відбувається при багаточисловому навантаженні.

Для підвищення зносостійкості поверхонь тертя також застосовують нанесення різного роду покриттів. Цей спосіб найчастіше застосовують при ремонті деталей. Але нанесення покриттів вимагає збільшення припусків на механічну обробку для усунення деформації деталі. До того ж не завжди забезпечується якісне зчеплення покриття з основою деталі. Серцевина деталі може перегрітися, що викличе втрату її міцності. При цьому у зв'язку із різними теплопровідністю і коефіцієнтом теплового розширення основного металу і матеріалу покриття на поверхні деталі можуть виникнути тріщини і відколи покриття.

Також можуть утворитися технологічні концентратори напружень, які знижують втомну міцність деталі. Внаслідок зазначених обставин ресурс двигунів у реальних умовах експлуатації є нижче нормативного.

**Методи дискретно-континуального зміцнення деталей машин.** У роботі проблема підвищення ресурсу та надійності роботи алюмінієвих, чавунних і сталевих деталей двигунів і агрегатів спеціальної техніки досягається за рахунок розробки і застосування технологій гальвано-плазмового перетворення алюмінієвих поверхонь та дискретного зміцнення робочих поверхонь чавунних і сталевих деталей, холодного пластичного деформування та іонного бомбардування, а також комплексного застосування цих технологій у одному вузлі тертя.

Розглянемо технологію дискретного зміцнення робочих поверхонь чавунних і сталевих деталей (рис. 1). В основі технології електроіскрового зміцнення лежить метод, запропонований більше 70 років тому радянськими вченими Лазаренко. Він базується на використанні електророзрядів для керуваного руйнування матеріалу деталі з отриманням необхідних форм і розмірів. Застосовувався для зміцнення дрібних деталей та інструменту. Проте проблемним є отримання стабільного шару суцільного покриття поверхні. У цій роботі замість суцільного пропонується дискретне покриття.

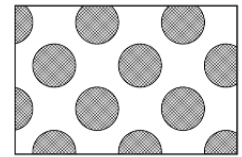


Рис. 1 – Дискретне зміцнення елементів двигунів і агрегатів спеціальної техніки

**Методи аналізу та синтезу параметрів технологічних процесів.** При розробці нових технологій однією з основних проблем є пошук рішення при нечітко вираженому і варіюваному просторі даних, при нечітких критеріях, обмеженнях і невизначених характеристиках самого технологічного процесу. Це стосується, в першу чергу, науково-технічної проблеми розробки ефективних технологій поверхневого зміцнення високонавантажених елементів машин, які знаходяться в рухомому контакті. Як вже було зазначено, традиційні технології при вирішенні цієї проблеми мають ряд принципових недоліків. Важливо те, що традиційні технології можуть вдосконалюватися, в основному, тільки за рахунок компромісних, а не оптимізаційних рішень. Вихід з цієї ситуації – відмова від жорсткої регламентації даних, пошук принципово нових фізико-механічних процесів та оптимізація їх впливу на комплекс критеріїв, які визначають характеристики поверхневого зміцнення елементів машин. При цьому, для реалізації даного підходу необхідно, по-перше, розробити теоретичну основу, математичну модель для багатоваріантного дослідження та оптимізації характеристик стану поверхневого шару у поєднанні зі станом матеріалу у глибині, по-друге, провести із застосуванням розроблених підходів дослідження та синтез схем і параметрів нової технології. З цією метою в роботі вирішені нові наукові проблеми та прикладні завдання:

1) розробка нових теоретико-множинних підходів до генерації математичних, числових і фізичних моделей досліджуваних і створюваних технологій і станів зміцнених елементів машин;

2) реалізація розробленого підходу в комплексній ма-

тематичній моделі дослідження напружено-деформованого стану (НДС) елементів машин в контакт, а також у вигляді спеціалізованого програмно-модельного комплексу із застосуванням методу скінченних елементів;

3) формування потужного програмно-апаратного комплексу на основі кластерних комп'ютерних технологій;

4) аналіз НДС елементів досліджуваних машин, поверхні яких оброблені із застосуванням нових технологій зміцнення;

5) розробка науково обґрунтованих технологічних режимів та підвищення ТХ і ГТХ спеціальної техніки.

Оскільки перелічені наукові проблеми і завдання є новими, актуальними і важливими, що стоять на сьогодні перед механікою, технологією машинобудування та машинознавством, то для їх вирішення були задіяні найбільш передові теоретичні, комп'ютерно-інформаційні та апаратні розробки, системи та засоби.

Аналіз та узагальнення отриманих результатів дало можливість встановити два типи ефектів впливу на НДС, що виникають при виконанні дискретно-континуальної зміцнення: "Δ-ефект" і "σ-ефект". Перший полягає в тому, що легована область дискретного зміцнення при дії нормального тиску в деформованому стані дещо виступає над незміцненою областю (на величину Δ). Числовою характеристикою при цьому є відношення Δ до діючого тиску p, розрахункова величина якого може досягати 0,1 мкм/МПа і більше. Таким чином, ця виступаюча область поверхні приймає на себе більшу частину сил контактного тиску у сполученні з іншою деталлю. Завдяки більш високій якості поверхні дискретної зони зменшується сила тертя при відносному русі контактуючих деталей. Крім того, матеріал матриці зношується в першу чергу, цим створюються на поверхні лабіринти для проходження мастила. Найбільший "Δ-ефект" досягається при відносній площі зміцнення 60...80%.

Інший ("σ-ефект") з'являється із-за характерного розподілу напружень в зоні дискретного зміцнення: напруження великі в цій зоні навіть при рівномірному прикладанні тиску на поверхню, в результаті цього еквівалентні напруження більші на 10...15% порівняно з зоною основного матеріалу зміцненого елемента машини. Разом із тим механічні властивості в зоні зміцнення значно (до 50%) вищі, ніж основного матеріалу в цілому. Тому загальна міцність зростає. Найбільших значень "σ-ефект" досягає при відносній площі зміцнення 65...75%. Зіставлення інтервалів найбільшого позитивного прояву "Δ-ефекту" і "σ-ефекту" дає можливість визначити рекомендований інтервал зони дискретності в області 60...75% (рис. 2).

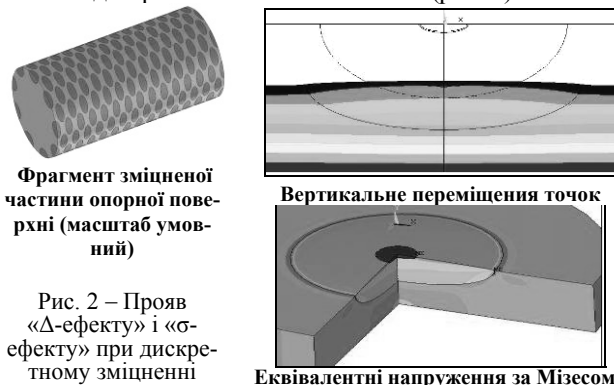


Рис. 2 – Прояв «Δ-ефекту» і «σ-ефекту» при дискретному зміцненні

На цій підставі можна стверджувати, що інтегральний вплив запропонованої технології на НДС зміцнених тіл в приповерхневому шарі дуже сприятливий як для його загальної міцності та твердості, так і для стійкості проти зношування.

**Аналіз властивостей матеріалу оброблених деталей.** Металографічний аналіз зразків після дискретного зміцнення показав, що у приповерхневому шарі досліджуваних зразків чітко проявляється зона, яка різко відрізняється від основного матеріалу. Вона має вигляд світлої блискучої точки. Умовно цю зону можна назвати "білим" шаром, мікротвердість якого перевищує мікротвердість основного матеріалу і знаходиться в межах 500...1000 МПа. Результати фазового, мікрорентгеноспектрального і спектрального аналізу та металографії показали, що "білим" шаром є твердий розплав із суміші матеріалів електроду і зразка, які перемішалися в момент електричного розряду (в полум'ї дуги), а потім кристалізуватися при охолодженні з великою швидкістю. Безпосередньо під "білим" шаром розташовується зона змінного хімічного складу і мікротвердості (рис. 3).

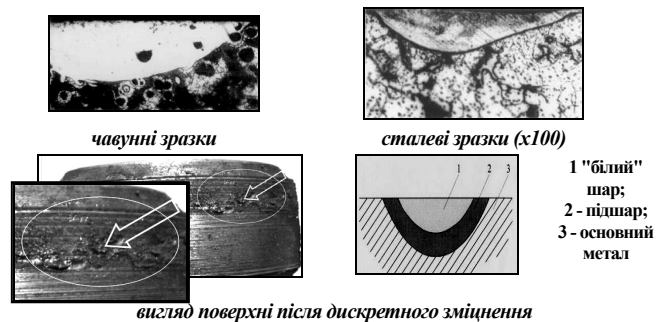


Рис. 3 – Зміцнені зони

Експлуатаційними випробуваннями встановлено, що дискретне зміцнення чавунних колінвалів забезпечує підвищення їх зносостійкості у 8...10 разів порівняно зі станом після нормалізації і в 1,3...1,5 разів – порівняно із гартуванням СВЧ. Для сталевих колінвалів зносостійкість збільшується в 1,6...3,5 рази порівняно із азотуванням. Одночасно з цим як у сталевих, так і у чавунних колінчастих валів поліпшується припрацьовуваність і збільшується зносостійкість валу та вкладиша.

У результаті на базі розробок і багаторічного досвіду із адаптації та впровадження у виробництво дискретного зміцнення Національним технічним університетом "ХПІ", ДП "ЗіМ", приватною науково-дослідною виробничо-комерційною фірмою "ТАВІ", Національним транспортним університетом, Харківським національним автомобільно-дорожнім університетом була вирішена комплексна цілісна проблема розробки способів зміцнення поверхні високонавантажених деталей, що виключає недоліки традиційних технологій зміцнення. Так, спосіб формування зносостійких поверхонь металевих виробів (дискретне зміцнення) за отриманими фізико-механічними і триботехнічними характеристиками не поступається кращим світовим аналогам: низькотемпературного ціанування ("Хонда", Японія); газового азотування (Росія, Великобританія та ін.); електродугової металізації (CRP Industry, США). Більш того, цей метод є кращим, оскільки не має недолі-

ків, властивих кожному з вище названих способів зміцнення. Дискретне зміцнення деталей виконується на додатково обладнаних станках. При виборі матеріалу електрода і розробці технології дискретного зміцнення критеріями оптимізації були: висока зносостійкість поверхні шийок колінчастих валів; підвищення втомної міцності деталі; підвищення термостійкості поверхні тертя; задиристійкість; оптимальне перекриття зміцнених зон (плям), тобто площі зміцнення; доступна ціна матеріалу електрода.

При впровадженні технології дискретного зміцнення на ДП "ЗіМ" для визначення впливу масштабного чинника на властивості колінчастих валів двигунів типу Д80, зміцнених методом дискретного зміцнення (високоміцний легований чавун з кульовим графітом), проведено натурні випробування на втомісну міцність. Випробування були проведені на двох кривошипних колінчастого вала дизеля Д80. Аналіз проведених випробувань показав, що масштабний фактор впливає несуттєво. Одночасно підтверджено, що дискретне зміцнення не призводить до зниження втомної міцності виробу. Такий же результат отриманий і для сталевих колінчастих валів. На підставі отриманих експериментальних даних дискретне зміцнення рекомендовано для корінних і шатунних шийок колінчастих валів високофорсованих двигунів та інших силових агрегатів, деталі яких виготовлені з чавуну і сталі. Двигун був підданий експлуатаційним випробуванням в депо "Основа" ДП "Укрзалізниця", де в умовах експлуатації підтвердив отримані результати.

З метою розширення використання технології дискретного зміцнення для колінчастих валів інших двигунів також були проведені дослідницькі роботи по зміцненню шийок колінвалів, виготовлених з різних легованих сталей, які використовуються для двигунів типу 10Д100, Д80, 5Д49 (тепловози) і КамАЗ-740 (шасі установок "Град", бронетранспортери тощо). У результаті, наприклад, пробіг тепловозів зростає до 4-х разів, автомобілів – у 1,5–2,0 рази. Дана технологія виготовлення та ремонту колінчастих валів використовується на Ізюмському тепловозоремонтному заводі при ремонті та модернізації магістральних тепловозів серії 2ТЕ10 та 2ТЕ116 (рис. 4).

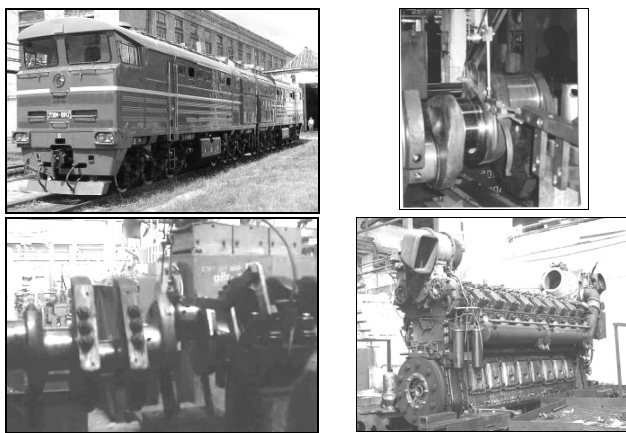


Рис. 4 – Магістральний тепловоз 2ТЕ10М з модернізованим двигуном зі зміцненим валом

Крім того, технологія дискретного зміцнення при ремонті колінчастих валів використана для двигунів КамАЗ-740 автомобілів (рис. 5) та інших машин на підпри-

ємствах Міністерства оборони України "ХАРЗ 110". Для забезпечення автономного живлення спеціальних об'єктів розроблено установки на основі модернізованого двигуна Д80 із зміцненими елементами (ДП "Завод ім. Малишева") (рис. 6).

Крім проведених вище випробувань, в період з 2001 року до теперішнього дня були здійснені експлуатаційні випробування дискретно зміцнених деталей двигунів автомобілів КамАЗ, КрАЗ та інших транспортних засобів на ВАТ "ХЗТСП" та Добропільській автобазі. Доцільність застосування технології дискретного зміцнення була також підтверджена на ВАТ "Краматорський завод важких верстатів" при виробництві деталей шпindelної групи верстатів моделей 9А350Ф1, 9А340. Ця технологія апробована на Криворізькому меткомбінаті при обробці декількох комплектів прокатних валків, що забезпечило випуск додаткової продукції на 15 млн. грн.

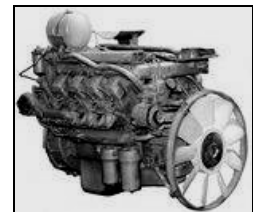
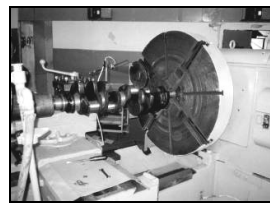


Рис. 5 – Дискретно зміцнений колінчастий вал двигуна КамАЗ для встановлення на шасі установки "Град"

Досліджено та рекомендовано дискретне зміцнення робочих поверхонь деталей гідروпередач для танкових трансмісій, зміцнення елементів бронетранспортерів БТР-70, БТР-80, БТР-94Б (ДП "Завод ім. Малишева"). Також запропоновані технології модифікації поверхонь боеприпасів з метою підвищення ефективності їх використання.

За останні 20 років в НТУ "ХП" розроблена і впроваджена у виробництво технологія гальвано-плазмового перетворення алюмінієвих поверхонь (рис. 7). Розробка і доведення цього технологічного процесу здійснювалося на дослідницькій установці "Корунд-7" в лужному електроліті при робочій напрузі 1000–1200 В та щільності струму до  $1 \cdot 10^4$  А/м<sup>2</sup>. Ця технологія відрізняється від раніше відомих методів МДО електрофізичними параметрами процесу, конфігурацією імпульсів напруги, має більш високу швидкість формування корундового керамічного шару за рахунок високої щільності струму, дозволяє оброб-



Рис. 6 – Форсовані двигуни для установок автономного енергоживлення спеціальних об'єктів на базі модернізованих двигунів Д80

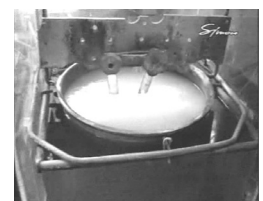


Рис. 7 – Фото електролітичної ванни для гальвано-плазмового перетворення алюмінієвої поверхні шару за рахунок високої щільності струму, дозволяє оброб-

ляти відносно великі поверхні, видалає з поверхневого шару деталі неметалеві домішки, легкоплавкі сполуки, які мають малу адгезію до основного металу і більш низьку теплостійкість. При цьому корундовий шар набуває більш високу мікротвердість (17–20 ГПа) і теплостійкість до 1200°C. На рис. 8 чітко видно сліди зношування покриття дисульфиду молібдену та мікронерівностей. Після гальвано-плазмової обробки цього ж поршня і полірочки, поверхня поршня стає пористою і має дзеркальну поверхню. Розміри діаметра поршня при цьому не змінюються. Корундовий шар складається з гексагональних комірок з центральними орієнтованими порами, в основному має кристалічну будову з хаотичним орієнтуванням кристалів (рис. 8–10).

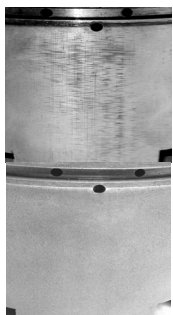


Рис. 8 – Бокова поверхня поршня СМД після випробувань і після корундування

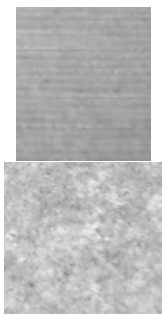


Рис. 9 – Циліндрична поверхня поршня з АЛ 25 до і після корундування



Рис. 10 – Поршень дизеля з корундовим шаром K6S310DK відпрацював 114676 мотогодин

Експлуатаційні випробування поршнів проводилися в локомотивному депо Харків-Сортувальний. У жовтні 1992 р. була виконана технологічна гальвано-плазмова обробка 12 поршнів дизелів тепловозів ЧМЕ–3. Контрольні параметри рівня експлуатаційних характеристик тепловозів ЧМЕ–3 вимірювалися при проведенні реостатних випробувань під час поточних ремонтів (рис. 10–12). Здійснювалися контрольний огляд і мікрометраж гільз циліндрів, які показали, що нижче контакту з компресійним кільцем усі гільзи мають дзеркальну поверхню без поздовжніх подряпин і видимого зношування. Установлено, що знос гільз зростає поступово і знаходиться в допустимих межах, ресурс поршнів зріс у 2,8–4,0 рази, втрати палива знизилися до 5 %.

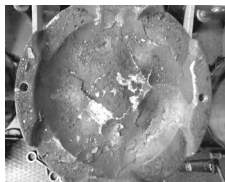


Рис. 11 – Серійний поршень дизеля K6S310DK відпрацював 46512 мотогодин



Рис. 12 – Поршень з корундовим шаром дизеля тепловоза ЧМЕ–3: а – до випробувань, б – після напрацювання 114676 мотогодин



Також розроблено новий метод зміцнення за допомогою іонного бомбардування. Підвищення механічних характеристик – на рівні до 40 %. Воно досягається за рахунок створення на поверхні деталей субмікроструктури із наноелементами.

Деякі важливі аспекти роботи висвітлено у монографіях [7–15].

Науково-технічне та соціальне значення даної роботи полягає в тому, що вона спрямована на суттєве збільшення терміну експлуатації двигунів внутрішнього згоряння, тепловозів, автотранспорту, важких токарних верстатів, турбін, валків прокатних станів і агрегатів для спеціальної техніки. Це підтверджено при громадському обговоренні на засіданні вченої ради НТУ "ХПІ" та ДП "ЗіМ". Отримано позитивні відгуки від виробничих і науково-дослідних організацій.

**Висновки.** На основі проведених фундаментальних і прикладних досліджень вперше науково обґрунтована та експериментально підтверджена можливість підвищення ресурсу високонавантажених деталей двигунів і агрегатів спеціальної техніки методами гальвано-плазмового перетворення алюмінієвих поверхонь і дискретного зміцнення деталей з чавунних і сталевих сплавів, холодного пластичного деформування та іонного бомбардування.

Ці методи забезпечують більш високий, порівняно з відомими способами зміцнення, рівень зносостійкості і міцності з одночасним підвищенням задиристості та зниженням зношування.

У роботі на основі теоретико-множинного підходу запропоновані нові концепції і методи підвищення ресурсу серії двигунів і агрегатів спеціальної техніки на базі нових технологій зміцнення поверхонь тертя деталей, а також вирішені такі фундаментальні і прикладні задачі.

1. Розроблено концепцію узагальненого параметричного моделювання складних механічних систем, методи аналізу фізико-механічних процесів і синтезу конструктивних параметрів та нових технологій зміцнення для забезпечення підвищеного ресурсу двигунів і агрегатів спеціальної техніки.

2. Розроблено метод синтезу раціональних конструктивних параметрів і нових технологій для зміцнення приповерхневих шарів високонавантажених об'єктів при нечітких множинних критеріях, обмеженнях і умовах експлуатації.

3. Розроблено метод розрахунково-експериментального обґрунтування параметрів зон гальвано-плазмового перетворення алюмінієвої поверхні і зон дискретного зміцнення високонавантажених поверхонь чавунних і сталевих деталей на основі результатів лабораторних досліджень мікроструктури металу, мікротвердості, жорсткості, триботехнічних параметрів і втомної міцності.

4. Запропоновано і обґрунтовано новий комплексний метод обробки поверхонь тертя високонавантажених деталей, одна з яких зміцнюється методом дискретного зміцнення, інша – створенням корундового шару. Таке поєднання призводить до збільшення ресурсу вузла тертя в цілому.

5. Запропоновані і обґрунтовані нові методи зміцнення на основі пластичного деформування поверхневих шарів матеріалу.

6. Розроблені методи зміцнення шляхом іонного бомбардування поверхні деталей та створення на поверхні композиції із наноструктурними елементами.

7. Науково обґрунтовані матеріали, режими і параметри технологій зміцнення, які лягли в основу прийняття проектно-технологічних рішень при виробництві та ремонті серії двигунів та агрегатів для спеціальної техніки

(елементи гідропередач для танкових трансмісій, автомобільні двигуни для військової техніки, стволи танкових гармат, тепловозні двигуни, колісні пари рухомого складу залізничного транспорту, верстати, валки прокатних станів тощо) з високими ТХ і ТТХ.

*Практична цінність* роботи полягає в розробці принципово нових технічних рішень щодо забезпечення високої надійності та ресурсу деталей високонавантажених пар двигунів і агрегатів спеціальної техніки, а на цій основі:

- розроблена та впроваджена у виробництво (виготовлення й ремонт) спеціальної техніки гама методів зміцнення (зокрема, дискретне зміцнення на базі розвитку електроіскрового легування, гальвано-плазмового перетворення поверхневого шару алюмінієвих деталей (корундування), холодне пластичне деформування, іонне бомбардування зі створенням мікронаноструктурних композицій, а також комплексні технології, що поєднують окремі види із перелічених); вони, порівняно із традиційними, суттєво (у 2–4 рази) підвищують ресурс, міцність та довговічність, знижують у 2–3 рази втрати на тертя і зношування. Крім того, вони позбавлені недоліків існуючих технологій зміцнення (розтріскування, ослаблення серцевини, залишкові деформації тощо);

- запропоновано спосіб посилення дії кожного з перелічених методів шляхом їх комбінації, що дає набагато більший ефект, ніж кожний з них окремо;

- запропоновані технології відрізняються від відомих способами і режимами перетворення поверхні. У результаті це дає ефект одночасного поліпшення трибomeханічних характеристик пар тертя, зокрема, порівняно із традиційними, збільшується не тільки твердість, але і втомна міцність матеріалу деталей;

- застосування запропонованої технології дискретного зміцнення, наприклад, для колінчастих валів форсованих двигунів, підвищує їх ресурс на 40 % з одночасним зменшенням витрат на їх виробництво до 70 %. При модифікації поверхні алюмінієвих поршнів методом гальвано-плазмового перетворення в умовах експлуатації ресурс циліндро-поршневої групи збільшується в 3...4 рази, що істотно окупає всі виробничі витрати. Рівень конструктивної міцності виробів зі зміцнених іонним бомбардуванням деталей машин дає приріст механічних характеристик до 40 %. Подібний ефект спостерігається також і для інших видів військової і цивільної техніки;

- обґрунтовано оптимальні технологічні режими зміцнення робочих поверхонь алюмінієвих, чавунних і сталевих деталей, а також, розроблено та виготовлено обладнання і технологічне оснащення. На цій основі створено й освоєно виробництво низки двигунів для військової та цивільної техніки із підвищеними ТХ і ТТХ, у т.ч. – при ремонті: серій КамАЗ, 10Д100, Д80, 5Д49 та інших; а також агрегатів спеціальної техніки: гідропередачі для танкових трансмісій, автомобільні двигуни для військової техніки, стволи танкових гармат, тепловозні двигуни, верстати, валки прокатних станів тощо. Економічний ефект від роботи складає 970,0 млн. грн. на рік;

- запропоновані технології здійснюють мінімальний вплив на навколишнє середовище. При цьому в 5...8 разів зменшується час і вартість технологічних операцій з дискретного зміцнення. Границя між зміцненим шаром і

основним металом не є технологічним концентратором напружень і не знижує втомну міцність деталі.

Організоване серійне виробництво, ремонт та реконструкція серії двигунів КамАЗ, 10Д100, Д80, Д49; а також агрегатів спеціальної техніки: танкові трансмісії, автомобільні двигуни для військової техніки, стволи танкових гармат, тепловозні двигуни, колісні пари рухомого складу залізничного транспорту, верстати, валки прокатних станів тощо. Впровадження результатів проведених дослідних робіт в серійне виробництво дало можливість підвищити до світового рівня Т і ТТХ та скоротити закупівлю дорогих імпортованих запасних частин до двигунів, а також інших агрегатів спеціальної техніки.

У подальших дослідженнях планується вдосконалити запропоновані методи зміцнення.

**Список літератури:** 1. *Синенко Н. П.* Исследование и доводка тепловозных двигателей / Синенко Н. П., Гринсберг Ф. Г., Половинкин И. Д. [и др.]. – М.: Машиностроение, 1975. – 184 с. 2. *Основы трибологии. Трение, износ, смазка.* / Под ред. А. В. Чичинадзе – М.: Центр "Науки и техники", 1995. – 400 с. 3. *Гаркунов Д. Н.* Триботехника: учебник для студентов вузов / Д. Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с. 4. *Gleiter H.* Nanostructured materials: basic concepts and microstructure / Gleiter H. // Acta mater. – 2000. – Vol. 48. – P. 157–163. 5. *Bernштейн М. Л.* Термомеханическая обработка металлов и сплавов. В 2-х т. / М. Л. Бернштейн – Металлургия, 1968. 6. *Утяшев Ф. З.* Наноструктурирование металлических материалов методами интенсивной пластической деформации / Ф. З. Утяшев. – Физика и техника высоких давлений. – 2010. – Т. 20, № 1. – С. 7–25. 7. *Ткачук Н. А.* Континуальная и дискретно-континуальная модификация поверхностей деталей: монография / Н. А. Ткачук, С. С. Дьяченко, Э. К. Посвятенко [и др.]. – Харьков: Щедра садиба плюс, 2015. – 259 с. 8. *Повстен В. О.* Фізичні основи та джерела живлення зварювальної дуги / В. О. Повстен, Е. К. Посвятенко. – К.: Арістей, 2004. – 168 с. 9. *Посвятенко Э. К.* Качество поверхности, обработанной деформирующим протягиванием / Э. К. Посвятенко, А. М. Розенберг, О. А. Розенберг [и др.]. – Киев: Наук. думка, 1977. – 188 с. 10. *Посвятенко Е.* Основы обеспечения надежности форсованных двигунів нового поколения для магистральных тепловозів / Е. Посвятенко, М. Ткачук // Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr 4. Seria: Transport. – Rzeszów: Politechnika Rzeszowska, 2013. – P. 407–412. 11. *Кравченко С.* Комбинированные технологии повышения износостойкости высоконагруженных пар трения / Кравченко С., Посвятенко Е., Ткачук М. [и др.] // Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr 5. Seria: Transport. – Rzeszów: Politechnika Rzeszowska, 2014. – P. 269–280. 12. *Дьяченко С. С.* Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах / Дьяченко С. С. – М.: Металлургия, 1982. – 128 с. 13. *Дьяченко С. С.* Физические основы прочности металлов / С. С. Дьяченко, В. Б. Рабухин - Харьков: Вища школа. – 1982. – 315 с. 14. *Дьяченко С. С.* Гидроэкструзия как малоотходный способ изготовления изделий с улучшенными свойствами / С. С. Дьяченко, Н. Г. Александров, Е. А. Милославская [и др.]. – Харьков: Изд-во «Основа» при ХГУ, 1991. – 105 с. 15. *Дьяченко С. С.* Фізичні основи міцності та пластичності металів / С. С. Дьяченко. – Харьков: Вид-во ХНАДУ, 2003. – 226 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Sinenko N.P.* Issledovanie i dovodka teplovoznyh dvigatelej / Sinenko N.P., Grinsberg F. G., Polovinkin I. D. [i dr.]. – Moscow: Mashinostroenie, 1975. – 184 p. 2. *Osnovy tribologii. Trenie, iznos, smazka.* / Pod red. A.V. Chichinadze. – Moscow: Centr "Nauki i tehniki", 1995. – 400 p. 3. *Garkunov D.N.* Tribotekhnika: uchebnik dlja studentov vuzov / D.N. Garkunov. – Moscow: Mashinostroenie, 1989. – 328 p. 4. *Gleiter H.* Nanostructured materials: basic concepts and microstructure / Gleiter H. // Acta mater. – 2000. – Vol. 48. – P. 157–163. 5. *Bernshtejn M.L.* Termomechanicheskaja obrabotka metallov i splavov. V 2-h t. / M.L. Bernshtejn. – Moscow: Metallurgija, 1968. 6. *Utyashev F.Z.* Nanostrukturirovanie metallicheskih materialov metodami intensivnoj plasticheskoj deformacii / F.Z. Utyashev. – Fizika i tehnika vysokih davlenij. – 2010. – Vol. 20, No 1. – P. 7–25. 7. *Tkachuk N.A.* Kontinual'naja i diskretno-kontinual'naja modifikacija poverhnostej detalej: monografija / N.A. Tkachuk, S.S. Djachenko, Je.K. Posvyatenko [i in.]. – Kharkov: Shhedra sadiba plus, 2015. – 259 p. 8. *Povsten V.O.* Fizychni osnovy ta dzherela zhyvlyennya zvarjuval'noyi duhy / V.O. Povsten', E.K. Posvyatenko. – Kyiv: Aristey, 2004. – 168 p. 9. *Posvyatenko Je.K.* Kachestvo poverhnosti, obrabotannoj deformirujushhim protjagivaniem / Je.K. Posvyatenko, A.M. Rozenberg, O.A. Rozenberg [i dr.]. – Kiev: Nauk. dumka, 1977. – 188 p. 10. *Posvyatenko E.* Osnovy zabezpechennja nadiynosti forsovanykh dyhyniv novoho pokolinnja

dlya mahistral'nykh teplovoziv / E. Posvyatenko, M. Tkachuk // Systemy i šrodki transportu samochodowego. Wybrane zagad-nienia. Monografia nr 4. Seria: Transport. – Rzeszów: Politechnika Rzeszowska, 2013 – P. 407–412. **11. Kravchenko S.** Kombinirovannye tehnologii povysheniya iznosostojkosti vysokonagruzhennyh par trenija / Kravchenko S., Posvyatenko E., Tkachuk M. [i dr.] // Systemy i šrodki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr 5. Seria: Transport. – Rzeszów: Politechnika Rzeszowska, 2014 – P. 269–280. **12. Djachenko S.S.** Obrazovanie austenita v zhelezouglerodistykh splavah / Djachenko S.S. – Moscow: Metallurgija, 1982. – 128 p.

**13. Djachenko S.S.** Fizicheskie osnovy prochnosti metallov / S.S. Djachenko, V.B. Rabuhin. – Kharkov: Vishha shkola, 1982. – 315 p. **14. Djachenko S.S.** Gidrojekstruzija kak maloohodnyj sposob izgotovlenija izdelij s uluchshennymi svojstvami / S.S. Djachenko, N.G. Aleksandrov, E.A. Miloslavskaja [i dr.]. – Kharkov: Izd-vo «Osnova» pri HGU, 1991. – 105 p. **15. Dyachenko S.S.** Fizychni osnovy mitsnosti ta plastychnosti metaliv / S.S. Dyachenko. – Kharkiv: Vyd-vo KhNADU, 2003. – 226 p.

Надійшла (received) 15.08.2015

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**М. А. Ткачук**, д.т.н., проф., НТУ «ХПІ», зав. каф. «ТММіСАПР», т. 7076-902, tma@tmm-sapr.org

**С. О. Кравченко**, к.т.н., ст. наук. співр. каф. «ДВЗ» НТУ «ХПІ», т. 7076-902, tma@tmm-sapr.org

**В. В. Шпаковський**, д.т.н., проф., проф. каф. «ДВЗ» НТУ «ХПІ», т. 7076-902, tma@tmm-sapr.org

**М. Л. Белов**, к.т.н., ген. директор ДП «Завод ім. В. О. Малишева», т. 7076-902, tma@tmm-sapr.org

**О. І. Шейко**, гол інж. ДП «Завод ім. В. О. Малишева», т. 7076-902, tma@tmm-sapr.org

**В. І. Демиденко**, керівник цеху 430 ДП «Завод ім. В. О. Малишева», т. 7076-902, tma@tmm-sapr.org

**С. С. Д'яченко**, д.т.н., проф., проф. каф. «Технологія машинобудування і ремонту машин» Харк. нац. автомоб.-дор. ун-ту, т. 7076-902, tma@tmm-sapr.org

**Е. К. Посвятенко**, д.т.н., проф., проф. каф. «Виробництво, ремонт та матеріалознавство» Національного транспортного університету, Київ, т. 7076-902, tma@tmm-sapr.org

**В. Г. Гончаров**, к.т.н., ген. директор приватної науково-дослідної виробничо-комерційної фірми «ТАВІ», Харків, т. 7076-902, tma@tmm-sapr.org