

# ПОЛІПШЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАЖКИХ ТРАНСПОРТНИХ МАШИН ТЕХНОЛОГІЧНИМИ МЕТОДАМИ

*Представлені результати дослідження дискретного зміцнення чавунних та сталевих деталей типу колінчастий вал двигуна важких машин. Показано вплив нової технології через комплекс фізико-механічних і експлуатаційних характеристик на підвищення ресурсу двигуна і машини в цілому*

*Ключові слова: дискретне зміцнення, колінчастий вал, ресурс двигуна*

*Представлены результаты исследования процесса дискретного упрочнения чугуновых и стальных деталей типа коленчатый вал двигателей тяжелых машин. Показано влияние новой технологии через комплекс физико-механических и эксплуатационных характеристик на повышение ресурса двигателя и машины в целом*

*Ключевые слова: дискретное упрочнение, коленчатый вал, ресурс двигателя*

*Results of research of process of discrete hardening of pig-iron and steel details of type a cranked shaft of engines of heavy cars are presented. Influence of new technology through a complex of physicomachanical and operational characteristics on increase of a resource of the engine and the car as a whole is shown*

*Key words: discrete hardening, cranked shaft, a resource of the engine*

**Е.К. Посвятенко**

Доктор технічних наук, професор

Кафедра ремонту, виробництва та матеріалознавства\*

Контактний тел.: (044) 410-80-07

E-mail: Natali1963@ukr.net

**С.О. Кравченко**

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Кафедра «Двигуни внутрішнього згорання»

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002

Контактний тел.: (057) 706-39-92

**Н.І. Посвятенко**

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра «Дорожні машини»\*

Контактний тел.: 050-915-04-72

E-mail: Natali1963@ukr.net

\*Національний транспортний університет  
вул. Суворова, 1, м. Київ, Україна, 01010

## Актуальність і стан проблеми, мета дослідження

У 2009 році розроблена «Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008 – 2020 роки», яка передбачає задоволення потреб у перевезеннях за рахунок закупівлі тепловозів нового покоління, а також за рахунок наявного тягового рухомого складу шляхом подовження терміну його експлуатації при виконанні капітального ремонту з модернізацією та ремоторизацією (тобто заміною дизелів на нові).

При ремонті будь-якої машини слід визначити її агрегат, вузол чи деталь, які у першу чергу схильні до відмов у роботі. Практика показала, що такою слабкою ланкою у тепловоза є дизель, а найбільш характерною деталлю останнього з позицій відмов є колінчастий вал. Найбільш потужний тепловоз, що масово експлуатується в Україні у теперішній час, оснащено 16-ти циліндровим дизелем 5Д49. Колінчастий вал дизеля виготовляють із сталі 38ХНЗМА ГОСТ 4543-71. Вал має довжину 3591 мм при масі 1225 кг. Стандартна зміцнювальна технологія колінчастого вала полягає в термічній обробці, що включає поліпшення (гартування з високим відпусканням) з наступним азотуванням

за схемою: нагрівання в атмосфері аміаку до 500°C протягом 14 годин, витримка при 500–510°C протягом 30 годин, підвищення температури до 540°C з витримкою 50 годин. Отже, ця операція триває 94 години. Після азотування вал охолоджується разом з піччю до 400–450°C з наступним викочуванням з печі і подальшим охолодженням на повітрі. В роботі [1] показано, що після пробігу двигуна 5Д49 650 тис. км у матеріалі серцевини колінчастого вала, зміцненого за вказаною вище стандартною технологією, немає помітного «старіння» та деградації властивостей. Сталь зберігає достатнє значення межі в'язкості ( $\sigma_1 = 280$  МПа), що відповідає початковому стану після відпалу, при високій пластичності і ударній в'язкості. Це означає, що вал може і далі експлуатуватися без небезпеки крихкого або втомного руйнування. У той же час перше повторне азотування при ремонті призводить до втрати твердості з 26–33 HRC до 12–15 HRC, межі міцності на 20% (з 925 до 740 МПа), межі текучості на 24% (з 835 до 635 МПа) при незмінних відносному подовженні та відносному звуженні і зростанні ударної в'язкості на 13%. Отже, після зношування поверхневого азотованого шару колінчастого вала матеріал його основи не втрачає початкових механічних властиво-

стей, а сама деталь залишається ремонтпридатною, тобто здатною експлуатуватися і у подальшому без загрози руйнування. Однак, від повторного азотування при відновленні колінчастого валу слід відмовитись, оскільки при зміцненні поверхневого шару шийок одночасно знижуються до недопустимих значень механічні властивості металу серцевини.

Крім вказаних вище проблем у вторинному (ремонтному) виробництві процеси хіміко-термічної обробки, зокрема азотування, створюють подібні проблеми і при виготовленні відповідальних високо навантажених деталей важких транспортних машин, тобто у первинному виробництві. Так, перебування колінчастого валу двигуна 5Д49 протягом кількох десятків годин у високотемпературному газовому середовищі призводить до його короблення. Якщо зважити на те, що маса вала сягає 1225 кг при довжині понад 3500 мм, то зрозуміло стає проблема заключних операцій шліфування, при виконанні яких доводиться видаляти значну частину зносостійкого азотованого шару. Це призводить до того, що нові колінчасті вали, як правило, мають різну товщину зміцненого шару по периметру корінних та шатунних шийок. В результаті там, де цей шар найтонший, виникають втомні віспоподібні вирви металу глибиною до 0,5 мм (рис. 1), що вимагає перешліфування валу в наступний менший ремонтний розмір. В результаті цього, згідно з діючими ремонтними технологіями, видалається первинний азотований шар металу. Однак, оскільки повторне азотування, як відзначалося вище, недопустиме, ремонтники, як варіант, застосовують досить грубу технологію гартування поверхневого шару струмами високої частоти з наступним шліфуванням. В результаті втрачається до 1 мм робочого шару металу. Тому після одного – трьох, максимум чотирьох ремонтів, колінчастий вал масою понад 1000 – 1500 кг доводиться утилізувати, хоча цей вал втратив усього кількасот грамів металу.

Крім тепловозів, подібні проблеми виникають при ремонті інших важких машин – прокатних станів, турбін, електричних машин, потужних металорізальних верстатів, морських та річкових суден тощо. Тому колективом науковців та виробників, серед яких є автори даної публікації, протягом останніх двох десятиліть був проведений цикл теоретичних та експериментальних досліджень, метою яких було визначення оптимальних напрямків підвищення надійності таких машин технологічними методами при ремонті.

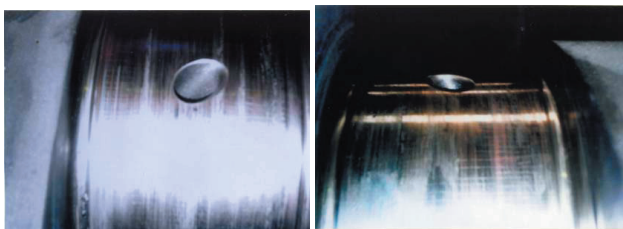


Рис. 1. Втомні тріщини на шийці колінчастого валу двигуна 5Д49

### Результати дослідження

Першим етапом досліджень була систематизація методів інженерії поверхні деталей машин, що знайш-

ла відображення в наукових працях [2, 3]. Було показано, що увесь спектр методів інженерії поверхні впливає на експлуатаційні властивості деталей (зносостійкість, втомнісну міцність, опір адгезійним явищам, задиристість, триботехнічні характеристики тощо) через комплекс фізико-механічних характеристик (мікротвердість, залишкові напруження, мікроструктуру, текстуру, мікро- і макропрофіль поверхні, товщину зміцненого шару та міцність його утримання на основі). Методи інженерії поверхні були класифіковані на 4 групи: нанесення покриттів, модифікування поверхневого шару, технологічні і комбіновані методи, а також вивчені їх можливості щодо використання для реалізації завдань даної роботи. Зокрема, були досліджені методи наплавлення, наплення, іонного імпульсного азотування, дифузійного борування, поверхневого гартування, плазмових технологій, холодного пластичного деформування та різання, модифікування за допомогою УЗК, нанесення мікро- і макрорельєфів, нанесення покриттів змінної товщини, гібридних технологій, а також дискретних покриттів. Об'єктами досліджень служили колінчасті вали ДВЗ, поршні, зубчасті колеса, поршневі пальці, гільзи, шпинделі верстатів, валки прокатних станів, ротори електричних машин, вали турбін.

На основі цих досліджень було науково обґрунтовано принципово нову високоєфективну технологію зміцнення деталей типу вал двигунів та силових агрегатів, основою якої є нова концепція формування зносостійкого шару металу. Цей шар мав би поєднувати переваги класичних суцільних покриттів, такі як добрі захисні властивості від дії середовища та високий опір зношуванню, з перевагами модифікованих холодним пластичним деформуванням та хіміко-термічною обробкою шарів, що добре утримуються на деталі, оскільки фактично є поліпшеним матеріалом останньої. Крім того, особливостями такого комбінованого методу отримання поверхневого шару є його дискретність, що передбачає чергування зносостійких «острівців» або «стрічок» будь-якої конфігурації з незміцненими ділянками основи деталі. Оскільки ці «острівці» або «стрічки» між собою розділені основним матеріалом, то кожен з них несе тільки свою частину навантаження. Цей захід дозволяє виключити розтріскування поверхневого шару під навантаженням, що є досить характерним для суцільних покриттів. Ще однією особливістю концепції є створення заглиблень на самих «острівцях» та «стрічках» зносостійкого матеріалу для поліпшення умов змащування пари деталей, що працюють при терті ковзання. Що стосується змащування, то суттєвою перевагою дискретного покриття над суцільним є різні швидкості зношування матеріалу «острівців» і матеріалу основи. Тобто під час припрацювання пари деталей в контакт утворюються мікрозаори по усій поверхні основного матеріалу, які стають резервуарами для мастила [4–6].

Серед методів інженерії поверхні, які є перспективними для реалізації «острівцевої» технології, було вибрано електроіскрове легування, яке має наступні переваги [7, 8]:

– високу міцність зчеплення матеріалу шару з основою (за рахунок механічного переміщення і дифузійного проникнення матеріалів електродів у шар, що формується);

- можливість локального проведення процесу (обробку можна здійснювати у строго заданих місцях радіусом від часток міліметра і більше, не захищаючи при цьому іншу поверхню деталі);
- можливість використання в якості легуючих матеріалів будь-яких металів, сплавів, металокерамічних композицій, тугоплавких сполук тощо;
- відсутність суттєвого нагрівання деталі в процесі легування, яке може змінити її фізико-механічні властивості і геометрію;
- можливість дифузійного збагачення металічної поверхні елементами матеріалу аноду;
- простоту технологічного процесу і малогабаритність обладнання.

Металографічний аналіз зразків після дискретного зміцнення показав, що в поверхневому шарі дослідних зразків чітко виявляється зона, яка різко відрізняється від основного матеріалу. Вона має вигляд світлої блискучої плями. Умовно цю зону названо «білим» шаром. Товщина «білого» шару дорівнює 200–400 мкм, а її мікротвердість перевищує мікротвердість основного металу і коливається в межах 500–1000 МПа. Для встановлення природи «білого» шару, що утворюється при дискретному зміцненні, досліджували його структуру та фазовий склад. Дані фазового, мікрорентгеноспектрального та спектрального аналізів і металографії дають змогу стверджувати, що «білим» шаром є суміш матеріалів електрода і зразка, які перемішалися у момент розряду (у полум'ї дуги), а потім закристалізувалися при охолодженні з великою швидкістю. Безпосередньо під «білим» шаром розташована зона змінного хімічного складу і мікротвердості (рис. 2).

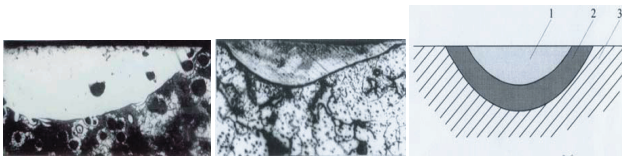


Рис. 2. Зміцнені зони: а – чавунні зразки; б – сталеві зразки (х 100); в – схема розташування шарів: 1 – «білий» шар; 2 – підшар; 3 – основний метал

На рис. 3 видно, що в «білому» шарі чавунних зразків виявляються включення графіту. Це свідчить, що ця зона є сумішшю матеріалів електрода і зразка, перемішаних у момент розряду, а потім закристалізованих при охолодженні.

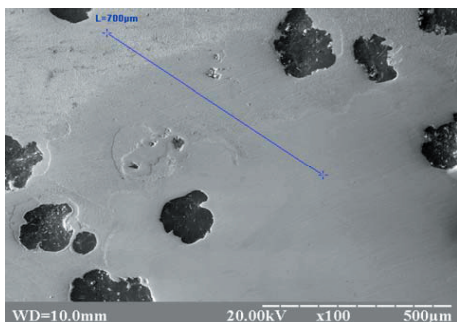


Рис. 3. Мікроструктура чавуну в зоні дискретного зміцнення; х 100

Наявність «підшару» є важливим чинником отримання необхідних властивостей у зміцнюваних деталях, оскільки завдяки цьому відбувається поступовий перехід від поверхневої зони до серцевини. Особливо позитивну роль грає зменшення кількості вуглецю при переході від аустенітної структури сталі до чавуну, що виключає можливе окрихчення виробів.

Експлуатаційними випробуваннями встановлено, що дискретне зміцнення чавуну забезпечує підвищення його зносостійкості у 8–10 разів порівняно зі стандартною технологією нормалізації і в 1,3–1,5 разів у порівнянні з гартуванням СВЧ, а сталі – у 1,6–3,5 рази у порівнянні з азотуванням. Одночасно з цим як у сталі, так і в чавуні покращується припрацьовуваність і зменшується зношувальна здатність, тобто зношування вкладиша.

На базі розробок і багаторічного досвіду по адаптації і впровадженню у виробництво дискретного зміцнення Приватною науково-дослідною виробничо-комерційною фірмою «ТАВІ» та ДП Укрзалізниця і за результатами науково-дослідних робіт, проведених Національним технічним університетом «ХПІ», Харківським національним автомобільно-дорожнім університетом і Національним транспортним університетом, була розв'язана задача створення способу зміцнення поверхонь високонавантажених деталей, що виключає недоліки традиційних технологій зміцнення.

Спосіб формування зносостійких поверхонь металевих виробів (дискретне зміцнення) за отримуваними фізико-механічними і триботехнічними характеристиками не поступається кращим світовим аналогам: низькотемпературному ціануванню, яким зміцнюють колінчасті вали двигунів фірми «Хонда» (Японія); газовому азотуванню, що використовується для важконавантажених деталей двигунів у Росії, Великобританії та інших країнах; електродугової металізації, що застосовується фірмою «CRP Industry» (США). Більш того, він є кращим за них, оскільки не супроводжується недоліками, притаманними кожному з названих способів.

При впровадженні технології дискретного зміцнення на ДП «Завод ім. В. О. Малишева» для визначення впливу масштабного чинника при дискретному зміцненні колінчастих валів дизелів типу Д80 (високоміцний легований чавун з кулястим графітом) проведені натурні випробування на втомну міцність на двох відсіках колінчастого вала. Аналіз результатів випробувань показав, що масштабний чинник не є суттєвим. Одночасно підтверджено, що зміцнення не призводить до зниження втомної міцності виробу. Такий же результат отриманий і для сталевих валів.

З метою розширення застосування технології дискретного зміцнення для колінчастих валів інших двигунів були проведені дослідницькі роботи по зміцненню колінчастих валів зі сталі 38ХНЗМА та 42ХМЮ, які використовуються для двигунів типу 5Д49 і КамАЗ–740.

При надходженні двигуна 5Д49 на капітальний ремонт встановлено, що після шліфування шийок колінчастого вала під другий ремонтний розмір, а інколи і під перший ремонтний розмір, практично відсутній зміцнений (азотований) шар. Тому для продовження терміну експлуатації двигуна 5Д49 були розроблені технічні умови ТУ В 29.1-22615920-001:2005, що перед-

бачають при ремонті замість повторного азотування застосовувати дискретне зміцнення шийок колінчастих валів.

Пробіг тепловозів після ремонту колінчастих валів двигунів після дискретного зміцнення корінних і шатунних шийок на даний час складає 270–780 тис. км, і всі вони знаходяться в експлуатації, хоча гарантійний пробіг після ремонту колінчастого валу складає 240 тис. км.

Дана технологія використовується в Ізюмському тепловозоремонтному заводі при ремонті, модернізації та ремоторизації магістральних тепловозів серій 2ТЕ10 та 2ТЕ116 (рис. 4).

Доцільність використання дискретного зміцнення була також підтверджена на ВАТ «Краматорський завод важких верстатів» при виготовленні деталей шпіндельної групи (телескопічного шпінделя) верстатів моделей 9А350Ф1 і 9А340.



Рис. 4. Магістральний тепловоз 2ТЕ10М з модернізованим двигуном

Дискретне зміцнення було також апробоване на Криворізькому металургійному комбінаті при обробці двох комплектів прокатних валків. Це забезпечило випуск додаткової продукції на 15 млн. грн.

Наведені приклади свідчать про те, що успішне використання дискретного зміцнення впродовж 10 років

дає можливість українським виробникам підсилити свої позиції на внутрішньому і зовнішньому ринках за рахунок збільшення конкурентоспроможності виробів. Економічний ефект від впровадження дискретного зміцнення забезпечується зниженням виробничих витрат при виготовленні і ремонті деталей двигунів та силових агрегатів з високими експлуатаційними і триботехнічними характеристиками, що збільшує ресурс тепловозів та інших важких машин.

## Висновки

На підставі проведених фундаментальних та прикладних досліджень уперше науково обґрунтована та експериментально підтверджена можливість підвищення ресурсу тепловозів на базі технології дискретного зміцнення деталей двигунів та силових агрегатів, виготовлених з чавуну і сталі, що забезпечує, порівняно з відомими способами зміцнення, високий рівень зносостійкості та втомної міцності з одночасним збільшенням задиростійкості та зменшенням зношувальності здатності.

Установлено, що границя між зміцненим шаром та основним металом не є технологічним концентратором напружень і не знижує втомну міцність.

Впровадження результатів проведених дослідницьких робіт в серійне виробництво дало можливість скоротити закупівлю дорогих імпортних запасних частин до силових агрегатів тепловозів та інших машин і зменшити капітальні витрати на створення спеціалізованих ділянок для зміцнення деталей, а, отже, значно скоротити споживання енергоресурсів.

## Література

1. Дьяченко, С.С. Исследование ремонтпригодности тепловозного коленчатого вала / С.С. Дьяченко, Б.В. Савченко, В.Г. Гончаров и др. // Локомотив-информ. – 2007. – № 8. – С.16–17.
2. Канарчук, В.Є. Інженерія поверхні деталей транспортних засобів: сучасний стан і перспективи / В.Є. Канарчук, Е.К. Посвятенко, Л.А. Лопата // Вісник Національного транспортного ун-ту. – К., 2000. – Вип.4. – С. 6–24.
3. Пути совершенствования методов инженерии поверхности деталей машин / М.И. Черновол, В.М. Корж, Э.К. Посвятенко и др. // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения : Сб. науч. тр. – Минск, 2001. – С.279–282.
4. Гончаров, В.Г. Повышение износостойкости коленчатых валов форсированных дизелей большой мощности / В.Г. Гончаров, Э.К. Посвятенко, С.С. Дьяченко // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2009. – Вип. 77. – С.53–65.
5. Батюшин, І.Є. Українському тепловозу – повноцінне повторне життя / І.Є. Батюшин, Ю.Ф. Гутаревич, Е.К. Посвятенко // Урядовий кур'єр : газета центральних органів виконавчої влади України, 2 квітня 2010 р. – № 61. – С.20.
6. Посвятенко, Е.К. Підвищення ресурсу тепловозів на базі технології дискретного зміцнення деталей форсованих дизелів / Е.К. Посвятенко, В.Г. Гончаров, С.С. Дьяченко, М.А. Ткачук // Сучасні технології в машинобудуванні: Зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПИ», 2010. – Вип. 4 – С. 175–187.
7. Фізична сутність електроіскрового легування / Е.К. Посвятенко, В.І. Шевченко, Л.П. Барилевич, О.В. Мельник // Зміцнення деталей машин. – К. : НТУ, 2004. – С. 4–9.
8. Верхотурова, А.Д. Технология электроискрового легирования металлических поверхностей / А.Д. Верхотурова, И.М. Муха. – Киев : Техника, 1982. – 181 с.