

УДК 629.083



В. Г. Гончаров



Д. В. Абрамов



М. В. Байцур

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДИСКРЕТНОГО ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ ПРИ КАПІТАЛЬНОМУ РЕМОНТІ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Виконаний аналіз недоліків та переваг існуючих методів підвищення зносостійкості поверхонь тертя. Подані результати лабораторних досліджень впливу способу зміцнення поверхонь на їх зносостійкість. Обґрунтовано доцільність використання дискретного зміцнення з комбінованою шорсткістю для відновлення корінних і шатунних шийок колінчастих валів двигунів внутрішнього згорання.

К л ю ч о в і с л о в а : двигуни внутрішнього згорання, колінчасті вали, шийка, відновлення, дискретне зміцнення, зносостійкість, ресурс.

Постановка проблеми. Забезпечення якості та ефективності капітального ремонту силових агрегатів транспортної техніки в сучасних умовах для країни є важливим економічним завданням. Сьогодні на переважній кількості цивільних та військових транспортних засобів як силові установки використовують двигуни внутрішнього згорання. Колінчастий вал у таких двигунах – саме та деталь, від стану якої значною мірою залежать працездатність двигуна внутрішнього згорання і його ресурс. Тому одним із шляхів підвищення економічної ефективності капітального ремонту двигунів внутрішнього згорання є максимальне використання залишкового ресурсу колінчастого вала. Відомо, що будь-який технологічний процес ремонту та відновлення деталі передбачає не тільки відновлення порушених у процесі експлуатації геометричних параметрів, а й, головним чином, стримування руйнівних процесів на поверхні деталі. Тому за достатньо великої кількості способів відновлення таких важко навантажених деталей, як колінчасті вали, актуальним завданням досі є пошук нових ефективних технологій їх ремонту з метою підвищення ресурсу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що зі зменшенням висоти мікронерівностей робочої поверхні деталі зменшується сила тертя у спряженні, але при цьому зменшується маслоємність і змочуваність. Усунути таке протиріччя можна створенням на відносно рівних поверхнях тертя частково регулярних або регулярних мікроємностей для додаткового розміщення і утримання мастильної рідини. Метод створення мікрорельєфу впливає на період припрацювання поверхонь, нагрів у процесі роботи, несучу здатність, ремонтпридатність і ресурс.

На сьогоднішній день існує велика кількість методів зміни топографії поверхні пар, що труться. У працях Ю. Г. Шнейдера ці методи поділені на три групи: обробка поверхонь різанням; пластичне деформування поверхонь; хімічне травлення через трафарет.

До обробки різанням відносять: свердління по розмітці або по кондуктору; вихрове точіння або фрезерування; точіння кругових або гвинтових канавок на тілах обертання. Недоліками цих методів є нерегулярний, хаотичний мікрорельєф поверхні заглиблень, ударний характер різання. Враховуючи дуже малі розміри мікрокишень (мікроємностей), виникає потреба у точному устаткуванні. Тому цей метод технологічно складний і не ефективний. До цієї групи можна також віднести плосковершинне алмазне хонінгування, суть якого полягає у створенні мікрогеометрії обробленої поверхні з такою характеристикою, за якої підвищується опорна поверхня та зносостійкість деталей і забезпечується необхідна маслоємність завдяки нанесеним відносно глибоким рискам у вигляді сітки. Цей метод з успіхом застосовують для обробки гільз та циліндрів двигунів з метою підвищення їх техніко-експлуатаційних показників. За даними праці [1] плосковершинне хонінгування збільшує довговічність прецизійних пар тертя на 60 %, при цьому сили тертя знижуються приблизно у 1,5 разу. Недоліком плосковершинного хонінгування є незадовільна стійкість інструменту та значні зусилля, що виникають у зоні різання, також цей метод відносно трудомісткий.

Пластичне деформування поверхні з метою її зміцнення можна виконувати вібродинамічним накочуванням, накочуванням профільними роликками, вібраційним накочуванням, ультразвуковим вигладжуванням та іншими методами. Недоліки цих методів такі. Для видавлювання заглиблень різного виду (за розмірами, формою, взаємним розташуванням) необхідні роликки та індентори з різним мікрорельєфом (достатньо складний у виготовленні та дорогий інструмент). При роботі роликками потрібно прикладати значні зусилля, що неприпустимо для оброблення деталей малої та середньої жорсткості. Зносостійкість роликків мала, а обробка зміцнених поверхонь деталей практично неможлива.

Хімічне травлення через трафарет є високопродуктивним, оскільки всі заглиблення обробляються одночасно у ванні. Але для обробки необхідно мати значну кількість дорогих трафаретів і спеціальних ванн для травлення, а також контролювати швидкість травлення залежно від складу металу та стану хімічної речовини. До того ж процес хімічного травлення шкідливий та трудомісткий.

Перспективними є методи зміцнення поверхні концентрованими потоками енергії (лазерним променем, електронним променем, плазмовим струменем та ін.), що впливають не тільки на мікрогеометрію оброблюваної поверхні, а й спричинюють зміни у структурі, фазовому та хімічному складі поверхневого шару металу, а також забезпечують оптимальний розподіл фізико-механічних властивостей на зміцненій поверхні залежно від конкретних умов експлуатації деталей [2]. Такі методи мають спільні риси: наявність інтенсивного теплового впливу потужних енергетичних потоків на локальні об'єми металу; дуже швидке нагрівання поверхні (в області критичних температур фазових перетворень); наявність одночасних пластичних деформацій, спричинених внутрішніми температурними і структурними напруженнями або зовнішніми контактними тисками; швидке охолодження завдяки відведенню тепла вглиб основного металу та в атмосферу. Для сталевих і чавунних деталей ці умови стають причиною виникнення в оброблюваній поверхні багато в чому унікальної мартенситної структури, що отримала назву «гарденіт» або «білий шар».

Завдяки дослідженням Б. А. Ляшенко в галузі адгезійного та когезійного зносу почала розвиватися нова технологія нанесення дискретних зносостійких покриттів на деталі [3]. З'явилася низка публікацій про створення зносостійких дискретних покриттів на основі електроерозійної обробки. Найактивніше працювали у цій галузі співробітники Інституту проблем міцності НАН України. Основна суть створення зносостійких дискретних покриттів полягала в нанесенні на робочу поверхню деталі дискретного (острівкового) покриття та подальшої пластичної деформації. Незважаючи на значне збільшення зносостійкості матеріалу деталей з дискретними покриттями, цей метод зміцнення повністю не усуває зазначених недоліків, а додає нові. Деталі з дискретними покриттями мають підвищену здатність до зношування другої деталі у парі тертя через відносно високу шорсткість зміцненої поверхні.

Аналізуючи способи зміцнення корінних і шатунних шийок колінчастих валів, що використовуються у їх виготовленні або ремонті, можна виділити такі їх недоліки:

- не забезпечується одночасно потрібний рівень зносостійкості та втомної міцності деталей;
- триботехнічні характеристики оброблених поверхонь деталей значною мірою залежать від швидкості ковзання, питомого тиску (навантажень) та температури;
- не забезпечується надійне зчеплення покриття з підкладкою (деталлю);
- процеси обробки поверхонь є енергоємними;
- виникає необхідність у збільшених припусках під механічну обробку після зміцнення для усунення можливої деформації деталі;
- наявність зміни градієнта температур в основному матеріалі деталі, що призводить до руйнування зносостійких покриттів;
- можливе виникнення технологічних концентраторів напружень.

Таким чином, використовувані способи зміцнення та нанесення зносостійких покриттів не дозволяють отримати задовільного поєднання необхідного рівня експлуатаційних характеристик відновлених поверхонь деталей, що утворюють пари тертя, з прийнятними технологічністю, ремонтпридатністю та економічністю процесу відновлення [4].

Мета статті – визначити можливість застосування способу дискретного зміцнення поверхні електроерозійною обробкою для підвищення ефективності відновлення шийок колінчастих валів при капітальному ремонті двигунів внутрішнього згорання.

Виклад основного матеріалу. Протягом останніх десятиліть у різних галузях науки і техніки були спроби створення нових нетрадиційних способів підвищення зносостійкості деталей, які були б позбавлені багатьох недоліків класичних технологій.

На думку авторів, таким новим способом формування зносостійкої поверхні деталі може бути спосіб, основою якого є дискретне зміцнення (рис. 1 та рис. 2), виконане електроерозійним методом [5, 6].

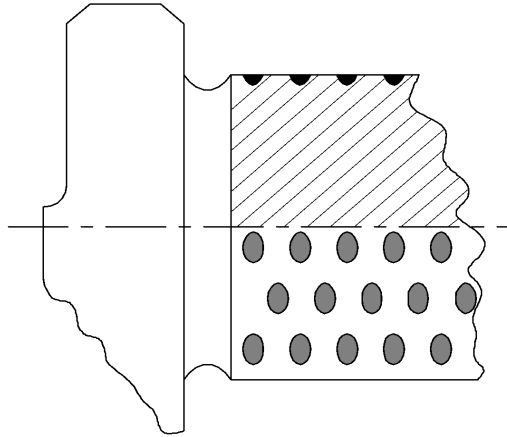
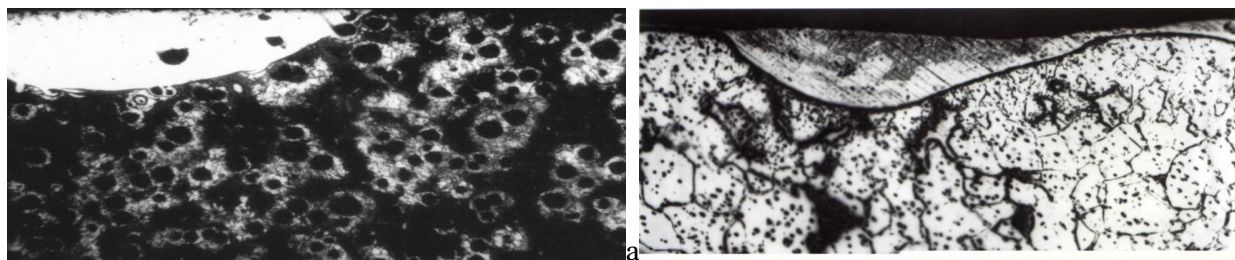


Рисунок 1 – Схема побудови робочої поверхні корінних і шатунних шийок колінчастого вала з дискретним зміцненням



а – високоміцний чавун; б – сталь

Рисунок 2 – Мікроструктура поперечного шліфа зразків матеріалу колінчастих валів у зоні розряду

Для обґрунтування доцільності застосування дискретного зміцнення при формуванні мікрорельєфу на робочих поверхнях корінних і шатунних шийок колінчастих валів двигунів внутрішнього згорання був виконаний комплекс повномасштабних лабораторних досліджень з визначення впливу отриманої топографії на працездатність шийок. У комплексі використані стандартні методики металографічних, рентгеноструктурних та мікрорентгеноструктурних досліджень, а також методики з дослідження їх триботехнічних характеристик та втомної міцності.

Результати досліджень показали, що втомна міцність зразків, які піддавали дискретному зміцненню, знаходиться на рівні втомної міцності чавунних нормалізованих колінчастих валів без дискретного зміцнення (див. табл. 1 та рис. 3).

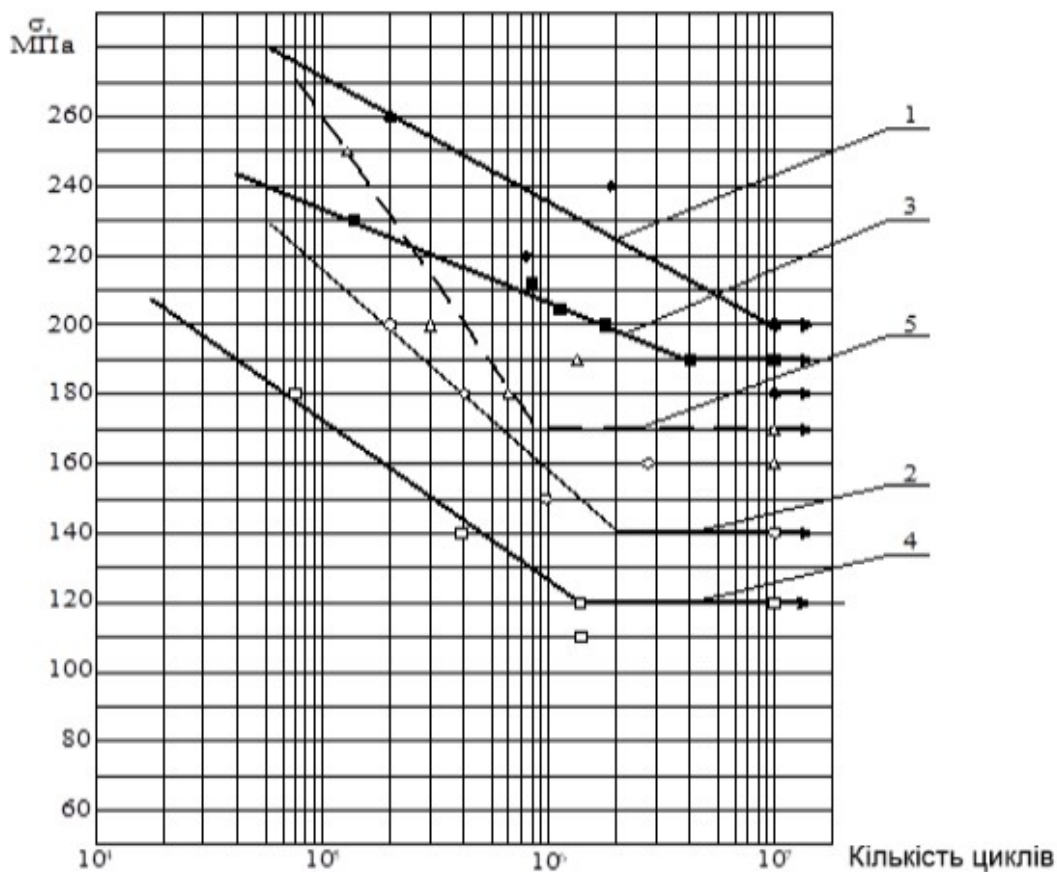
Крім того, важливим фактором є місце виникнення руйнування при втомних випробуваннях зразків. Дані досліджень, проведених раніше, свідчать про те, що внаслідок зміцнення зразків з високоміцного чавуну загартуванням ТВЧ і лазерним загартуванням межа зміцненого шару стає технологічним концентратором залишкових напружень, що розтягують, а це є причиною зниження втомних характеристик матеріалу. При випробуванні на втомну міцність зразків з дискретним зміцненням руйнування в жодному випадку не відбувається по межі зміцненої зони і основного металу.

Дослідження зносостійкості показали, що дискретне зміцнення зразків з комбінованою шорсткістю призводить до суттєвого (приблизно в 10 разів) зменшення їх зносу, порівнюючи з нормалізованими зразками, і у 1,3-1,5 разу зменшення зносу, порівнюючи із загартованими зразками з високоміцного легованого чавуну з кулястим графітом, що модифікований магнієм.

Таблиця 1 – Результати випробувань зразків матеріалу колінчастих валів на втомну міцність

№ серії	Спосіб зміцнення зразків	Якість поверхні після полірування	Межа витривалості σ_{-1} , МПа
1	нормалізація + високий відпуск	без дефектів	200
2		поодинокі ливарні дефекти	140
3	нормалізація + високий відпуск + дискретне зміцнення	без дефектів	190
4		грубі дефекти (глибина до 0,12 мм)	120

Результати випробувань зразків зі складнолегованої конструкційної сталі з різною шорсткістю основного металу виробу та зміцнених зон, які піддавали зміцненню за традиційною технологією та дискретному зміцненню, наведено у таблиці 2.



1 – серія зразків 1; 2 – серія зразків 2; 3 – серія зразків 3; 4 – серія зразків 4;
5 – результати досліджень, наведених у праці [7]

Рисунок 3 – Залежність величини межі втоми зразків матеріалу колінчастих валів від числа циклів навантаження

Згідно з отриманими результатами встановлене істотне (у 1,5-3,5 разу) підвищення зносостійкості поверхонь зразків з різною шорсткістю зміцнених і незміцнених зон.

При цьому їх зношувальна здатність знижується зі збільшенням товщини знятого зміцненого шару (8-10 мкм) і водночас підвищується зносостійкість робочих поверхонь деталей.

Таблиця 2 – Результати випробувань зразків з матеріалу колінчастих валів на зносостійкість

№ серії	Спосіб зміцнення зразків	Товщина знятого шару, мм	Знос ролика, г	Знос колодочки, г	Співвідношення зносів роликів	Співвідношення зносів колодочок
1	Азотування	0	0,0147	0,0084	3,5	2,6
2	Нормалізація + дискретне зміцнення	0	0,0089	0,0068	2	2,1
3	Нормалізація + дискретне зміцнення	-0,08	0,0042	0,0032	1	1

З метою визначення характеристик зношування в умовах, близьких до реальних (можливе потрапляння абразивних часток у мастило), проведено випробування на абразивну зносостійкість. Для цього було виготовлено дві серії зразків: азотовані зразки за стандартною технологією для колінчастих валів (контрольний зразок); зразки, які піддали дискретному зміцненню з комбінованою шорсткістю (запропонована технологія). Випробування проводилися за відомою методикою з додаванням до моторної оливи M14B2 0,5 % абразивних часток діоксиду кремнію (SiO₂) з розміром фракції у межах 0,02 мм. Результати випробувань наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Результати випробувань зразків з матеріалу колінчастих валів на абразивну зносостійкість

№ серії	Спосіб зміцнення	Зношування ролика (г) за час випробувань (год)			Зношування колодки (г) за час випробувань (год)		
		10	20	30	10	20	30
1	азотування	0,062	0,065	0,068	0,490	0,691	0,898
2	дискретне зміцнення	0,020	0,023	0,026	0,220	0,323	0,336

Отримані результати свідчать про суттєве (приблизно в 3 рази) підвищення зносостійкості зразків з дискретним зміцненням, порівнюючи з контрольними зразками з азотованої сталі. Встановлено, що зношування контртіла (колодки) при роботі з дискретно зміцненими зразками є у 2 рази меншим. Це можна пояснити меншою схильністю робочої поверхні ролика до шаржування абразивними частками, подрібненням цих часток завдяки дискретній твердості поверхні зміцнених зразків і хорошою змочуваністю поверхні. Результати виконаних випробувань свідчать про зниження коефіцієнта тертя в трибосистемі з дискретно зміцненими поверхнями деталей, що мають комбіновану шорсткість.

Базуючись на результатах лабораторних досліджень, були проведені повномасштабні заводські випробування колінчастих валів, виготовлених та відремонтованих з використанням технології дискретного зміцнення робочих поверхонь корінних та шатунних шийок з комбінованою шорсткістю. Результати випробувань показали, що двигуни, оснащені такими колінчастими валами, стабільно працюють на всіх режимах. При цьому крутильні та поздовжні коливання колінчастого вала зменшилися і не перевищували 60 % від нормативно допустимих, що позитивно позначається на роботі двигуна і окремих його вузлів та агрегатів.

Висновки

Дискретне зміцнення робочих поверхонь шийок колінчастого вала з комбінованою шорсткістю суттєво підвищує їхню зносостійкість та збільшує ресурс. Тому даний спосіб відновлення поверхні шийок колінчастих валів може бути запропонований як заміна існуючих способів зміцнення шийок колінчастих валів шляхом нанесення зносостійких покриттів, нормалізації, загартування ТВЧ і повторного азотування.

Застосування запропонованого способу зміцнення поверхні шийок колінчастих валів дозволить підвищити ефективність капітального ремонту двигунів внутрішнього згорання в цілому.

Перелік джерел посилання

1. Шепеленко І. В. Наукові основи технології нанесення антифрикційних покриттів з використанням пластичного деформування: дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08. Київ, 2021. 465 с.
2. Технологічне забезпечення зносостійкості деталей трибо-механічних систем дискретними поверхнями : монографія / Кіндрачук М. В., Марчук В. Є., Духота О. І., Радіоненко О. В. Київ, 2020. 204 с.

3. Застосування іонно-плазмового термоциклічного азотування для підвищення зносостійкості високолегованої сталі / Б. А. Ляшенко та ін. *Вісник Житомирського державного технологічного університету*. Житомир, 2015. Вип. № 3 (74). С. 28–33.

4. Континуальна та дискретно-континуальна модифікація поверхонь деталей: монографія / Н. А. Ткачук та ін. Харків: ТОВ «Щедра садиба плюс», 2015. 259 с.

5. Спосіб формування зносостійкої поверхні металевих виробів: пат. 11798 Україна. № 200505864; заявл. 14.06.2005; опубл. 16.01.06, Бюл. № 1. 17 с.

6. Гончаров В. Г. Підвищення ресурсу транспортної техніки удосконаленням технології ремонту колінчастих валів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20. Харків, 2008. 20 с.

Стаття надійшла до редакції 20.11.2024 р.

UDC 629.083

V. Honcharov, D. Abramov, M. Baitsur

APPLICATION OF DISCRETE SURFACE STRENGTHENING TECHNOLOGY IN OVERHAUL OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Today, the vast majority of civilian and military vehicles use internal combustion engines as a power plant. One of the ways to increase the economic efficiency of overhauling such engines is to maximize the residual life of the crankshaft.

The life of the crankshaft depends on the wear resistance of the journal surfaces and the fatigue strength of the part. Therefore, when restoring crankshafts, it is necessary not only to preserve these surface properties, but also to improve them.

The wear resistance of the surface of the part can be influenced by changing the chemical composition and structure of the surface layer or by changing the surface topography. There are many traditional processing methods that allow obtaining high wear resistance of friction surfaces. Analysis of these methods has shown that they have a number of disadvantages that do not allow ensuring the required level of operational characteristics of the restored surfaces, and cannot be used for restoring crankshafts.

Over the past decades, in various branches of science and technology, there have been attempts to create new unconventional methods of increasing the wear resistance of parts, which would be devoid of many of the shortcomings of classical technologies. One of such methods is the method of forming a microrelief with combined roughness on the working surfaces of the main and connecting rod journals of crankshafts due to their discrete hardening.

A set of full-scale laboratory studies of the tribotechnical characteristics and fatigue strength of the surfaces of parts after their discrete hardening by the proposed method has been carried out. The results of the studies have shown that discrete hardening of the working surfaces of the crankshaft journals with combined roughness leads to a significant increase in their wear resistance and resource.

К e y w o r d s : internal combustion engines, crankshafts, neck, restoration, discrete hardening, wear resistance, resource.

Гончаров Віктор Григорович – кандидат технічних наук, директор приватної науково-дослідної господарсько-комерційної фірми «ТАВІ».

<https://orcid.org/0009-0005-6007-8779>

Абрамов Дмитрій Володимирович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технології машинобудування і ремонту машин Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

<https://orcid.org/0000-0003-1846-1991>

Байцур Максим Вячеславович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології машинобудування і ремонту машин Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

<https://orcid.org/0000-0003-4935-3707>