

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-18>

УДК 629.1.024

ДРОБОТ ОЛЬГА

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-5220-9661>e-mail: pion12208@gmail.com**ПІДГАЙЧУК СВІТЛАНА**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9868-6447>e-mail: svitlankayar@gmail.com**БАБАК ОЛЕГ**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-1068-0631>e-mail: ang.babak@gmail.com**СИДОРЕНКО ЮРІЙ**

Хмельницький національний університет

e-mail: Yurahamann@ukr.net

ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАХОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ

Високі механічні та експлуатаційні властивості поршневих кілець забезпечують максимальну потужність автомобільного двигуна, ефективну його роботу на тривалий термін. Запропоновані технологічні заходи підвищують зносостійкість поршневих кілець. Досліджено та розроблено новий спосіб поверхневого зміцнення кілець із сірого чавуну термодифузійним легуванням з термоциклюванням з метою підвищення зносостійкості і довговічності кілець та спряжених з ними деталей. Розроблена технологія способу поверхневого зміцнення кілець з пастоподібного насичуючого середовища; розроблена ефективна робоча суміш для комплексного дифузійного насичення сірих чавунів; розроблено температурний режим термодифузійного насичення з термоциклюванням.

Досліджено вплив розробленого способу на основні експлуатаційні властивості кілець. Зроблена оцінка їх технологічності та надійності, надані практичні рекомендації для впровадження розробленого способу дифузійного зміцнення з термоциклічною обробкою на виробництві. Запропонований спосіб зміцнення дозволяє підвищити зносостійкість кілець у 6 разів та скоротити процес нанесення покриття у 3-4 рази у порівнянні з традиційними.

Ключові слова: поршневі кільця, термодифузійне легування, термоциклювання, антифрикційні характеристики, сірі чавуни, твердість.

DROBOT OLHA, PIDHAICHUK SVITLANA,**BABAK OLEH, SYDORENKO YURIY**

Khmelnytskyi National University

TECHNOLOGICAL MEASURES FOR ENHANCING THE WEAR RESISTANCE OF PISTON RINGS

High mechanical and operational properties of piston rings are essential for maximizing automobile engine power and ensuring long-term efficient performance. This study proposes technological improvements to enhance the wear resistance of piston rings. A novel method of surface strengthening for gray cast iron rings—based on thermal diffusion alloying combined with thermal cycling—has been developed and tested to increase both wear resistance and durability of the rings and their associated components.

The research introduces a surface strengthening technique using a pasty saturating medium and identifies an effective powder mixture for complex diffusion saturation of gray cast irons. The proposed method includes a specific temperature regime for thermodiffusion saturation combined with thermal cycling.

Findings reveal that optimal operational properties of gray cast iron piston rings are achieved through thermodiffusion alloying in a powder mixture based on sormite (comprising chamotte, ammonium chloride, and ferrosilicon). The study found that thermal diffusion hardening with thermal cycling reduces the cementation process of sealing rings to 3–4 hours, which is 5–6 times shorter than the traditional method.

Moreover, the addition of ferrosilicon to the saturating mixture increases process efficiency by 2–3 times and enhances the antifriction properties of the saturated layer by 8–13 times.

The influence of the developed method on key operational properties of the rings was thoroughly investigated, including assessments of manufacturability and reliability. Practical recommendations for industrial implementation of this diffusion hardening method with thermal cycling are provided.

Keywords: piston rings, thermal diffusion alloying, thermal cycling, antifriction properties, gray cast iron, surface hardening.

Стаття надійшла до редакції / Received 21.07.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.08.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Надійність та довговічність автомобіля залежить від тривалої, безвідмовної роботи кожного вузла та деталей. Вихід з ладу однієї деталі чи спряженої пари потребує ремонту автомобіля та заміни або відновлення зношених вузлів.

Передчасний вихід з ладу деталі чи вузла може бути результатом порушення конструкторських чи технологічних параметрів: неввірно вибраного матеріалу, незадовільних режимів термічної та

механічної обробки. Однак практика показує, що знос деталей прискорюється низькоякісним технічним обслуговуванням та іноді несвоєчасним його проведенням.

Несправності в автомобілі виникають внаслідок зносу деталей під дією сил тертя, втоми поверхневих шарів, чи навантажень, що перевищують розрахункові.

Внаслідок зносу змінюються початкові розміри спряжених поверхонь деталей, їх геометрична форма спотворюється, якщо знос нерівномірний. Централізований ремонт деталей машин став ефективним шляхом задоволення потреби в запасних частинах. Деталь, яку треба відремонтувати - ідеальна заготовка: вона не вимагає нових матеріальних і трудових витрат; форма і розміри її максимально наближені до остаточних, тому відновлення при цьому пов'язане з мінімальним об'ємом механічної обробки. Кількість пошкоджених поверхонь, як правило, невелика. Застосування ефективних методів зміцнення при ремонті дозволяє підвищувати ресурси відновлених деталей порівняно з новими. Все це визначає високу ефективність правильно організованого відновлюваного ремонту. При величезному парку машин він забезпечує значну економію матеріалів, енергії і затрат праці.

Поршневі кільця є однією з важливих деталей кривошипно-шатунного механізму автомобіля [1]. Поршень складається з чотирьох основних частин – днища, головки, юбки і бобишки. Поршневі кільця забезпечують щільне рухоме з'єднання між поршнем та гільзою циліндра, а також відведення частини теплоти від днища поршня до дзеркала гільзи циліндра (рис.1).

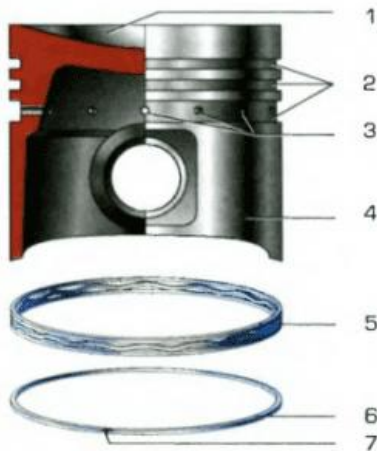


Рис.1. Поршень і поршневі кільця: 1 – днище поршня; 2 – канавки для кілець; 3 – отвори для зливання масла; 4 – шпindel поршня; 5 - масло знімне кільце; 6 – компресійне кільце; 7 – замок кільця

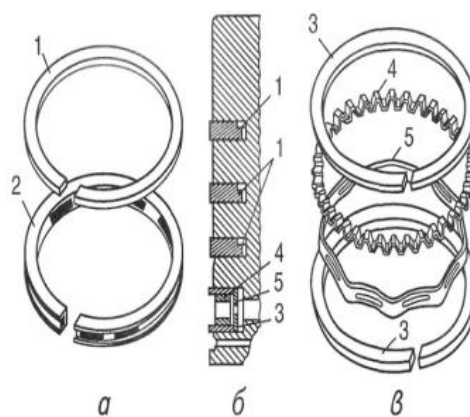


Рис. 2. Поршневі кільця: а) – зовнішній вигляд; б) – розташування кілець на поршнідвигуна автомобіля; в) – складене масло знімне кільце; 1,2 – відповідно компресійне і масло знімне кільця; 3 – плоскі сталеві диски; 4 – осьовий розширювач; 5 – радіальний розширювач

За призначенням поршневі кільця поділяють на компресійні та маслоснімні (рис.2).

Компресійні кільця запобігають надходженню газів із камери згоряння в картер, їх виготовляють із спеціальних легованих чавунів з хорошою пружністю та високою стійкістю проти спрацювання, шляхом індивідуальної відливки і з наступною механічною обробкою. Компресійні кільця встановлюють в канавках поршня.

Маслоснімні кільця призначені для зняття із дзеркала циліндра зайвого мастила та при виконанні своїх функцій поршневі кільця зазнають зношування внаслідок взаємодії із стінками циліндра та окиснення під впливом гарячих відпрацьованих газів. Причиною виходу з ладу поршневих кілець може бути його закоксування внаслідок накопичення нагару. Описані несправності є найбільш поширеними причинами виходу з ладу поршневих кілець та навіть їх руйнування (рис.3).

Поршневі кільця виготовляють з ковкого чавуну, що дозволяє добре утримувати масло, зменшуючи при цьому знос. Кільця поршневі також роблять з нержавіючої сталі, яка має здатність протистояти високій температурі, більше ніж хромований чавун. Верхнє кільце і кільце, що регулює подачу мащення, покривають хромом або оловом чи нітридами плазмовим чи вакуумним напilenням.

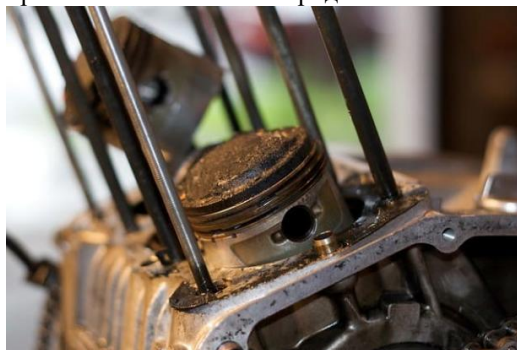


Рис.3. Окиснення та нагар на поршнях та поршневих кільцях

В сучасних дизельних двигунах для підвищення зносостійкості на верхнє поршневе кільце наносять покриття з пористого хрому з включеннями мікрочастинок алмазів чи оксиду алюмінію.

Останнім часом для виготовлення верхніх компресійних кілець вибирають високоміцний чавун з кулястим графітом (марки ВЧ500-2, ВЧ600-2) та ковкий (КЧ45-7) з пластівчастим графітом. Ковкий чавун має підвищені показники утомної стійкості, кращі антифрикційні властивості і значно дешевший за високоміцний. Загальним недоліком сірих чавунів є їх невисока твердість [2,3]

Підвищення твердості сірих чавунів досягають легуванням карбідоутворюючими елементами, внаслідок чого в структурі утворюються структурно вільні карбіди. Зносостійкість зростає при цьому на 40 – 60 % у порівнянні із звичайним сірим чавуном [4,5]. Тому використання у верхній поршневій канавці чавунних кілець без спеціального зносостійкого покриття не є доцільним.

Для отримання кілець з стабільними пружними властивостями проводять гомогенізуючий відпал при температурі 900 – 950°C з витримкою до 24 годин. Термічна обробка суттєво ускладнює технологію виготовлення кілець, підвищує їх собівартість, а також знижує їх корозійну стійкість, викликає деформацію і жолоблення.

Важкі чи навіть екстремальні умови роботи двигуна такі як детонація та перегрів викликають прискорений знос і руйнування поршневих кілець. Поршневі кільця, оброблені за традиційною технологією, не здатні протистояти таким умовам експлуатації. Зношені поршневі кільця потребують ремонту та відновлення

Відновлення та зміцнення поршневих кілець, підвищення їх механічних характеристик є актуальним, своєчасним.

Аналіз досліджень та публікацій

Чавуни широко використовують для пар тертя в машинобудуванні, завдяки високим механічним та антифрикційним характеристикам. Однак, не завжди показники зносостійкості чавунних деталей задовольняють практиків. На сьогодні розроблена значна кількість способів зміцнення чавунних поршневих кілець: це розпушення робочих поверхонь для утримання мастила, травлення, формування оксидних покриттів, фосфатування, сульфидування, кадмування, оміднення тощо [5].

Основним способом зміцнення є хромування, яке забезпечує високу твердість (до HV 1100), низьку схильність до заїдання та малий коефіцієнт тертя [6]. Обмежують широке використання цього способу недоліки, такі як важке припрацювання, низька теплостійкість, розтріскування, погане утримання мастила, крім того електролітичне хромування є екологічно небезпечним процесом. Високі зносостійкості досягають нанесенням керамічних покриттів, покриттів з молібдену, оксидів з алюмінію та азоту, нітриду титану [7].

Використання електроіскрового легування (ЕІЛ) для підвищення зносостійкості деталей з чавуну дозволяє отримувати зносостійкі покриття з електродів, що мають високі механічні характеристики (тверді сплави, тугоплавкі матеріали). Таким способом можна наносити покриття в обмежених місцях, заданої товщини, без розігрівання деталі, використовуючи нескладне обладнання [7].

Ефективним для зміцнення зазначених деталей є хіміко - термічна обробка (ХТО), а саме – нітроцементация [6]. Вона дозволяє підвищити утомну міцність на 50-80 % у порівнянні з цементациєю та азотуванням.

Карбонітрація поршневих кілець в середовищі розплаву солей при температурі 540 – 580°C протягом години забезпечує формування карбонітридного шару товщиною 12 – 15 мкм з твердістю 1158 – 1513 HV [7-11].

Автори [6] для зміцнення робочої поверхні кільця наносили багат шарове наноструктурне покриття TiN/CrN на установці типу «Булат -6». Технологія нанесення досить складна, так як передбачає додаткове плазмове нанесення хрому, після чого технологічний процес забезпечує формування багат шарового покриття TiN/CrN.

Альтернативним рішенням до традиційних процесів ХТО, є окислегування [7] – процес хіміко-термічної обробки, де в якості насичуючого середовища використовують перегріту пару розведених водних розчинів солей. Склад утвореного поверхневого шару визначається складом розчинів солей та хімічними реакціями і дифузійними процесами, які відбуваються на поверхні металу. Сформований шар забезпечує поліпшення припрацювання деталей, підвищує їх зносостійкість.

Розглянуті способи підвищення зносостійкості поршневих кілець є актуальними, ефективними, однак впровадження в ремонтному виробництві не знайшли із-а відсутності сучасного технологічного обладнання та контролюючих приладів.

Переважає більшість ремонтних майстерень та виробництв віддають перевагу традиційним способам ХТО залізовуглецевих сплавів у газовому середовищі, долаючи певними технологічними заходами недоліки (забезпечення стабільності складу газової суміші та його регулювання), які супроводять процеси ХТО. Для цього проводять послідовну обробку різними газами тощо. Такі заходи подовжують технологічний процес та вимагають використовувати складну апаратуру для регулювання складу суміші.

Виходячи із описаного, нами запропоновано: для підвищення зносостійкості чавунних поршневих кілець проводити ХТО в пастах, склад яких забезпечить комплексне дифузійне насичення, а використання режиму термоциклічної обробки дозволить скоротити час насичення у 3-5 разів [10]

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: підвищення міцності, зносостійкості, твердості поршневих кілець проведенням термодифузійного легування з термоциклюванням. Запропонований спосіб зміцнення дозволяє підвищити зносостійкість кілець у 6 разів та скоротити процес нанесення покриття у 3-4 рази у порівнянні з традиційними.

В роботі вирішені такі задачі: розроблена технологія поверхневого зміцнення кілець, вибрано склад ефективної робочої суміші для комплексного дифузійного насичення, визначені температурні режими термоциклічної обробки.

Досліджувані матеріали та методи дослідження

Поршневі кільця виготовлені із сірого чавуни марки СЧ20. Хімічний склад чавуну показано в таблиці 1.

Таблиця 1.

Хімічний склад чавуну					
Хімічні елементи, %					
C	Si	Mn	P	S	Cr
3,6-3,9	2,3 -2,9	0,5-0,8	0,3 -0,6	До 0,1	0,17 – 0,35
Ni	Mo	Cu	Ti	V	Fe
0,1 -0,25	0,25-0,50	До 0,35	До 0,2	До 0,2	решта

Термодифузійне легування проведено з використанням порошкової суміші, яка складається з порошку сормайту (69-70 %), активатора процесу – хлористого амонію (1-2 %) та інертної добавки – порошку шамоту (29 %). Для інтенсифікації процесу до суміші додавали порошковий феросиліцій марки ФС-45. Дисперсність гранул 0,2 – 0,4 мм.

Склад сормайту наведено в табл. 2.

Таблиця 2.

Хімічний склад наплавочного сормайту							
Вміст компонентів за масою, %							
Cr	Ni	C	Si	Mn	P	S	Fe
25 -31	3 -5	2,5 – 3,5	2,8 – 4,2	До 1,3	До 0,08	До 0,08	решта

Термодифузійне легування проведено в сумішах різного складу, розроблено 5 композицій, склад яких наведено в таблиці 3. [11]

Таблиця 3.

Хімічний склад порошкових сумішей для досліджень				
Умовне позначення суміші	Вміст компонентів за масою, %			
	Сормайт	Шамот	Феросиліцій	Хлористий амоній
А	69 -70	29	0	2 -1
Б	64 -65	32	2	2 -1
С	59 -60	34	5	2 -1
Д	40 - 39	44	15	2 -1
Е	49 -50	39	10	2 -1

Деталі, що підлягали ХТО завантажували в спеціальні контейнери та засипали активною порошковою сумішшю.

Газотермічне насичення проводили при температурах 800, 900, 950, 1000°C в чотирьох активних сумішах протягом 2, 4, 8 та 16 годин.

Процес термодифузійного легування проведено в режимі термоциклювання (6-8 термоциклів в інтервалі температур 860 – 950°C), під час насичення контейнер вивантажувався з печі. Кількість циклів 11.

Металографічні дослідження проведені на поперечних мікрошліфах, підготовлених за традиційною методикою з використання шліфувального паперу та алмазних паст. В якості травника вибрано 4 % розчин азотної кислоти в спирті. Мікрошліфи досліджувались на мікроскопі МИМ-8, який оснащений цифровою камерою.

Мікротвердість поверхневого шару та по глибині визначали на приладі ПМТ – 3 при навантаженні на індентор 50 та 100 г (0,49 і 0,98 Н).

Випробування на зносостійкість проведені за схемою обернено -поступального руху на зразках з чавуну та алюмінієвого сплаву АЛ25 в присутності абразивного порошку. Зміцнююча обробка кілець проведена у порошковій суміші складу С з витримкою зразків при температурі 950°C протягом 16 годин. Вплив хіміко-термічної обробки поршневих кілець на зносостійкість гільзового чавуну вивчали за величиною зносу зразків – пластин чавуну, які працювали в парі з чавунними колодочками,

які піддавались термодифузійному зміцненню. Пластини перед випробуваннями піддавали гартуванню струмом високої частоти для отримання твердості HRC 43 - 45. Зміцнений шар мав товщину 50 – 70 мкм.

Під час випробувань пластина – контртіло здійснювала обернено – поступальні рухи з частотою 60 циклів на хвилину відносно притиснутого до неї нерухомого зразка (4). Хід пластини за один цикл – 120 мм. В зону тертя додавали індустриальне мастило М-20 по 25 крапель через кожну хвилину. Для прискорення процесу зношування до мастила додавали абразивний порошок електрокорунду білого, в кількості 0,5 г на 100 мл мастила.

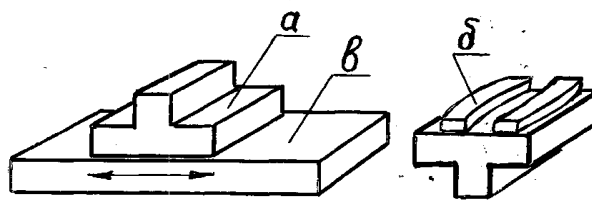


Рис. 4. Зразки і схема випробувань на зносостійкість: а – колодка із гільзового чавуна; б – зразки поршневих кілець; в – контртіло

Величину зносу визначали методом відбитків, які наносили на зміцнені зразки з допомогою приладу для вимірювання твердості за Віккерсом, при навантаженні 5 кгс (49Н). На зразки і контрпластини, які не зміцнені, відбитки наносили з допомогою приладу ТК-2, алмазним конусом при навантаженні 150 кгс (1470 Н).

Аналіз результатів дослідження

Вплив параметрів дифузійного насичення на глибину та властивості зміцненого шару.

Термодифузійне насичення дозволяє одночасно насичувати всі відкриті поверхні оброблюваної деталі, отже робочі поверхні кільця - зовнішня та торцеві насичувались легуючими елементами одночасно. Зміцнений шар, отриманий при дифузійному легуванні містить карбіди хрому та заліза, що забезпечує високу мікротвердість та підвищену абразивну зносостійкість, пружність та температурну стабільність механічних властивостей [11 - 13].

На рис. 5 показана структура насиченого шару після термодифузійної зміцнюючої обробки в сумішах А, В, С, Е при тривалості процесу 16 годин і температурі 950°C.

Аналіз мікроструктур (рис.5) свідчить, що глибина насиченого шару зростає при введенні до складу насичуючої суміші феросиліцію. Додавання до складу суміші 2-5% феросиліцію збільшує товщину зміцненого шару у 1,5 – 2 рази. При додаванні феросиліцію до 10% глибина насиченого шару зростає майже втричі. Зростає глибина шару і при підвищенні температури процесу (рис.6) та тривалості насичення (рис.7).

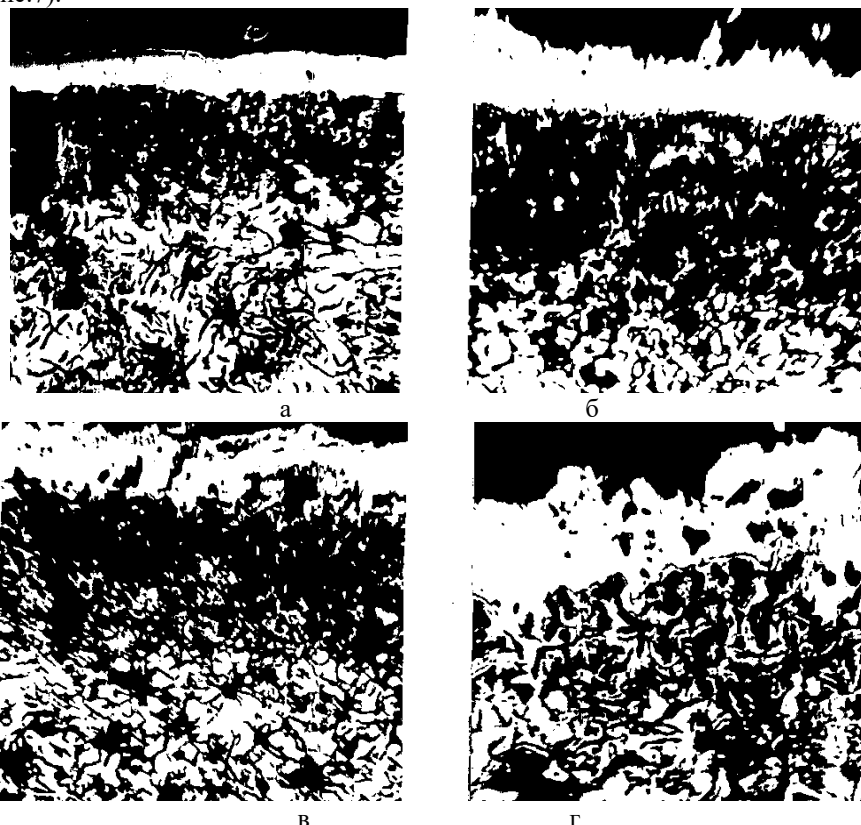


Рис. 5. Вплив складу насичуючої суміші на глибину дифузійного шару (x200): а – термодифузійне легування; б - 2; в - 5; г – 10% ФС- 45. Температура 950°C, витримка 16 год.

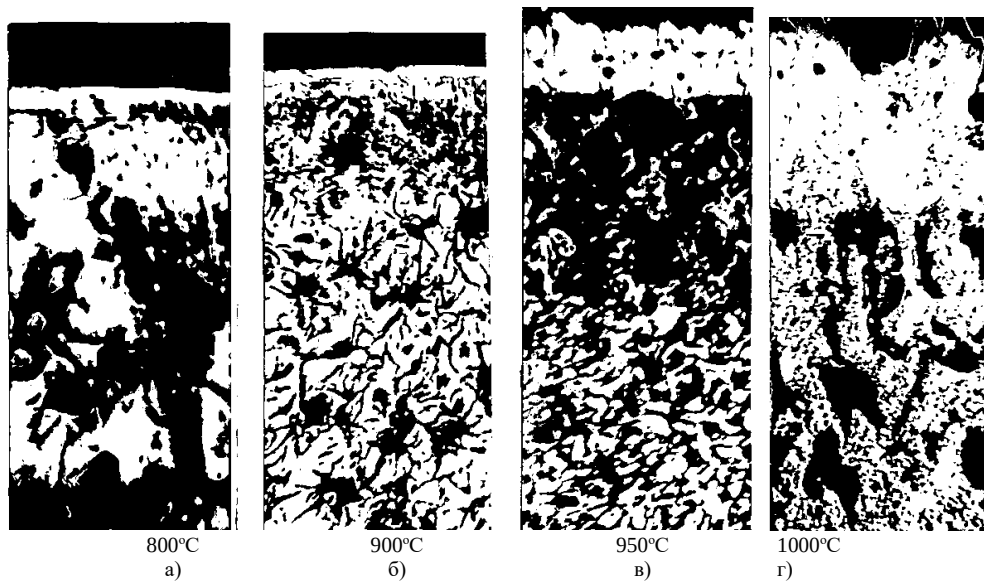


Рис.6. Вплив температури насичення на глибину дифузійного шару. Тривалість насичення 16 год. Суміш С (5% ФС-45): а – х 800; б, в, г – х 200

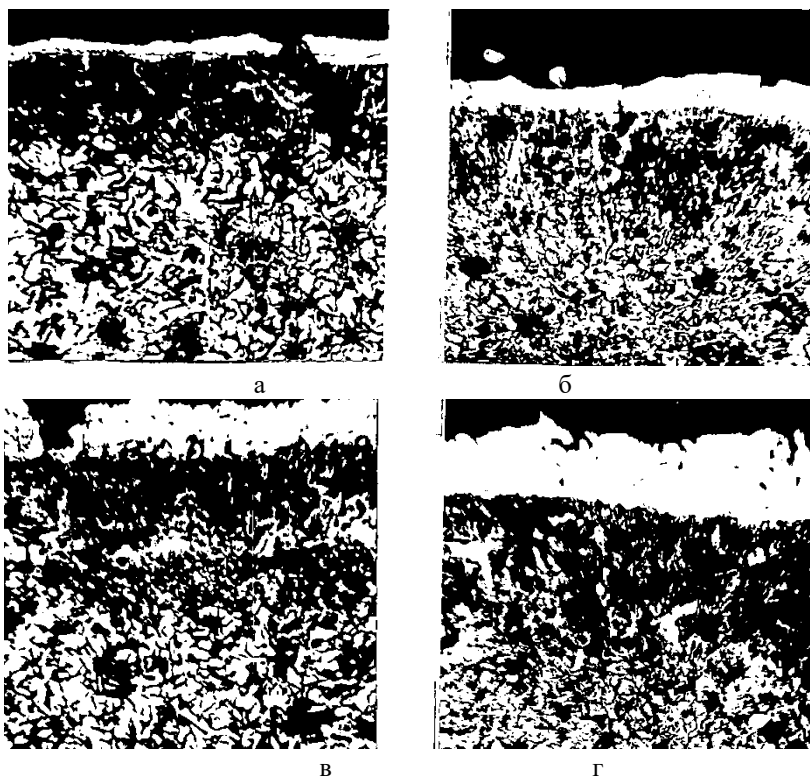


Рис. 7. Вплив тривалості насичення на товщину зміцненого шару: а, б, в, г – відповідно 2, 4, 8, 16 годин. Температура 950°C. Суміш С (5%ФС-45)

Досліджено, що вплив феросиліцію на товщину насиченого шару при температурах до 900°C незначний. При температурах вищих за 900 °C вплив феросиліцію різко збільшується.

Низьку активність феросиліцію при температурах до 900 °C можна пояснити тим, що металева основа чавуну – феритна (Fe_α) – і укорінення в таку решітку атомів кремнію не викликає поліморфних перетворень. При температурах вищих за 900 °C вплив феросиліцію різко збільшується. Відбувається поліморфне перетворення заліза, внаслідок якого утворюється γ – фаза здатна розчинити більшу кількість легуючих елементів.

Очевидно, що оптимальними параметрами процесу дифузійного легування є: насичуюча суміш складу С, температура 950 °C. Збільшення вмісту феросиліцію до 10 % сприяє значному утворенню пор, коагуляції пор в мікротріщини. Насичений шар втрачає однорідність та щільність.

Термоциклювання застосоване для термодифузійного легування внесло суттєві зміни в якість отриманого покриття та тривалість процесу. За час насичення в інтервалі температур 860 – 950°C було здійснено 11 термоциклів (рис.8). На зразках, які піддавали термодифузійному легуванню в

ізотермічних умовах товщина шару 10 - 25 мкм, а зразки, що насичувались за тих самих температурних умов і в однакових середовищах, але в режимі термоциклювання, мають глибину насиченого шару 60 -100 мкм.

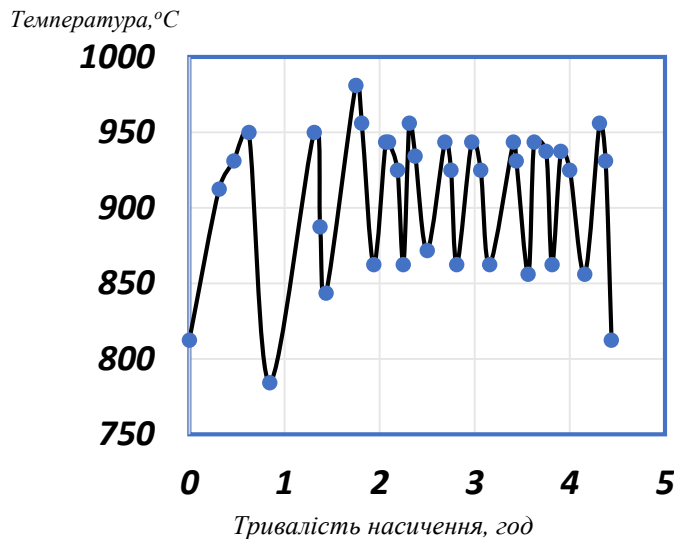


Рис. 8. Графік режиму термоциклювання

Глибина зміцненого шару при термоциклюванні збільшується у 6 разів в суміші А і у 5 разів у суміші С. Така ж закономірність спостерігається і при насиченні в інших сумішах (рис.9).

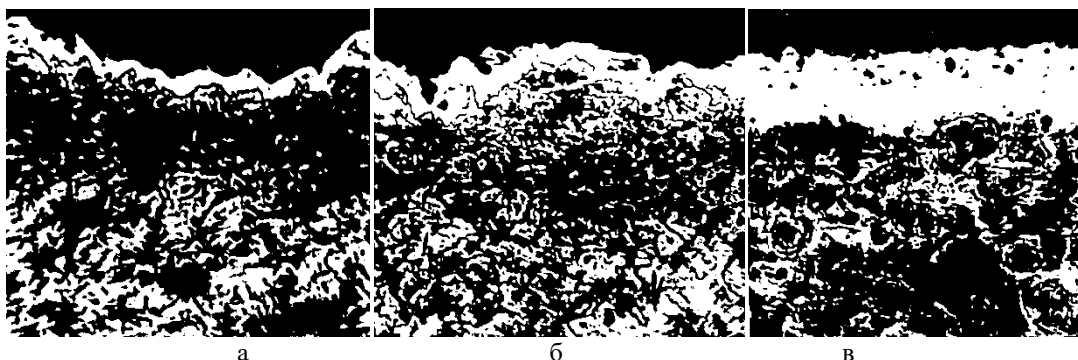


Рис.9. Вплив термоциклювання на глибину зміцненого шару (x200): а, в – насичення в суміші А; б – в суміші С; а, б – насичення при T=950 °C; в – з термоциклюванням в інтервалі 860 – 950 °C.

Позитивний вплив термоциклічного режиму насичення на глибину зміцненого шару показано на рис.9 та в таблиці 4.

Таблиця 4.

Вплив термоциклювання на глибину зміцненого шару при термодифузійному легуванні.

Режим насичення витримка 4 години	Глибина зміцненого шару, мкм Насичуюча суміш, позначення			
	А	В	С	Е
Ізотермічний процес 950 °C	10	15	20	25
Режим термоциклювання 860 – 950 °C	60	65	100	60

Термоциклювання значно підвищує механічні характеристики отриманих шарів. При цьому підвищується ударна в'язкість (до 5,2 Дж/см², при ізотермічному насиченні – 4,7), зменшується торцеве жолоблення кілець у 1,4 – 1,6 рази. Такі результати досягаються подрібненням зерна в металевій основі чавуна та більш повною релаксацією напружень, які виникають під час насичення під дією багаторазової фазової перекристалізації.

Позитивний вплив термоциклювання на зносостійкість зміцнених кілець та спряжених з ними деталей показали стендові випробування. Результати стендових випробувань свідчать, що зносостійкість в абразивному середовищі поршневих кілець, зміцнених термодифузійним легуванням, збільшилась у 8-14 разів. Одночасно збільшилась зносостійкість вторинного валу у 3,3 рази та втулки у 2,7 рази.

Висновки зданого дослідження

1. Оптимальний комплекс експлуатаційних властивостей чавунним поршневым кільцям забезпечує термодифузійне легування в порошок суміші на основі сормайту (шамоту 34%, хлористого амонію 2%, феросиліцію - 5%) .
2. Термодифузійне зміцнення з термоцикуванням з 6-8 термоциклами в інтервалі температур 850 – 950°C, дозволяє скоротити технологічний процес цементації ущільнювальних кілець до 3-4 годин, що у 5–6 разів менше за традиційний.
3. Температурним режимом термодифузійного легування рекомендовано термоциклічне ведення процесу 4–6 циклів в інтервалі температур 860 – 950°C з періодичним вивантаженням контейнерів з печі. Тривалість насичення 3-4 години.
4. Уведення до складу насичуючої суміші феросиліцію підвищує продуктивність процесу у 2–3 рази та підвищує антифрикційні властивості насиченого шару у 8-13 разів.

Література

1. Лудченко О.А. Технічна експлуатація і обслуговування автомобілів : підручник. Київ : Вища школа, 2007. 527 с.
2. ДСТУ 3132-95. Чавун ливарний. Технічні умови (ГОСТ 4832-95). Зі Зміною № 1 (ІПС № 11-2005) та Поправками (ІПС № 10-97).
3. ДСТУ 8833: 2019. Виливки із сірого чавуну з пластинчастим графітом. Загальні технічні умови.
4. Дробот О.С., Підгайчук С.Я., Боровик Л.В. Технологія конструкційних матеріалів і основи матеріалознавства в технічних системах охорони державного кордону : навчальний посібник. Хмельницький : НАДПСУ, 2019. 264 с.
5. Черватюк А. О. Зміцнення поршневих кілець кривошипно-шатунного механізму легкового автомобіля : дипломна робота бакалавра : 132 Матеріалознавство / А. О. Черватюк ; Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький, 2024. – 66 с.
6. Мальцев Т.В. Підвищення триботехнічних властивостей поршневих кілець багатошаровим зміцненням наноструктурним покриттям. автореф. дис. на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук : 05.02.04. Харків, 2021.
7. Комарова Г.Л., Федченко І.І., Нестерчук О.М. Підвищення зносостійкості сталей шляхом нанесення поверхневих покриттів. *Інженерія поверхні та реновація виробів* : матеріали 23-ї Міжнародної науково-технічної конференції, Київ–Тернопіль, 20–22 червня 2023 р..
8. L.A. Timofeeva, S.S. Timofeev, A.Y. Dyomin et al. Surface modification of machine parts made of iron– carbon alloys operating under conditions of friction and wear. *J. of Friction and Wear*. 2018. vol. 39, № 3. P. 283–289.
9. Тимофєєва, Л.А. Модифікація поверхні деталей машин і механізмів в умовах тертя та зношування / Л.А. Тимофєєва, Л.В. Волошина, С.С. Тимофєєв та ін. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків : НТУ «ХПІ», 2022. – Серія : Технології в машинобудуванні. – № 2 (6). – С. 104–109.
10. Диха О, В., Свідерський В.П., Дробот О.С., Машовець Н.С. Технологічне забезпечення довговічності технічних трибо систем: монографія / О.В. Диха, В.П. Свідерський, О.С. Дробот, Н.С. Машовець. - Хмельницький : ХНУ, 2021. – 178 с.
11. Бурбан О. В. Дослідження та розробка режимів термодифузійного зміцнення для підвищення експлуатаційних властивостей деталей автомобіля : дипломна робота магістра : 132 Матеріалознавство / О.В. Бурбан ; Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький, 2024. – 93 с. [URI https://elar.khmnpu.edu.ua/handle](https://elar.khmnpu.edu.ua/handle)
12. Тимофєєва, Л.А. Модифікація поверхні деталей машин і механізмів в умовах тертя та зношування / Л.А. Тимофєєва, Л.В. Волошина, С.С. Тимофєєв та ін.. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія “Технології в машинобудуванні”. 2022. № 2 (6). С. 104–109.
13. Тимофєєва ,Л.А., Козловська І.П., Ольховський В.В. Вплив багатошарового покриття на зносостійкість чавунних виробів. *Інженерія поверхні та реновація виробів* : матеріали 23-ї Міжнародної науково-технічної конференції, Київ–Тернопіль, 20–22 червня 2023 р..

References

1. Ludchenko O.A. Tekhnichna ekspluatatsiia i obsluhovuvannia avtomobiliv : pidruchnyk. Kyiv : Vyshcha shkola, 2007. 527 s.
2. DSTU 3132-95. Chavun lyvarnyi. Tekhnichni umovy (HOST 4832-95). Zi Zminoiu № 1 (IPS № 11-2005) ta Popravkamy (IPS № 10-97).
3. DSTU 8833: 2019. Vylivky iz siroho chavunu z plastynchastym hraitom. Zahalni tekhnichni umovy.
4. Drobot O.S., Pidhaichuk S.Ia., Borovyk L.V. Tekhnolohiia konstruktsiinykh materialiv i osnovy materialoznavstva v tekhnichnykh systemakh okhorony derzhavnoho kordonu : navchalnyi posibnyk. Khmelnytskyi : NADPSU, 2019. 264 s.
5. Chervatiuk A. O. Zmitsnennia porshnevnykh kilets kryvoshypno-shatunnoho mekhanizmu lehkovoho avtomobilia : dyplomna robota bakalavra : 132 Materialoznavstvo / A. O. Chervatiuk ; Khmelnyts. nats. un-t. – Khmelnytskyi, 2024. – 66 s.

6. Maltsev T.V. Pidvyshchennia trybotekhnichnykh vlastyvostei porshnevnykh kilets bahatosharovym zmitsnenniam nanostrukturnym pokryttiam. avtoref. dys. na здобuttia naukovoho stupenia kand. tekhn. nauk : 05.02.04. Kharkiv, 2021.
7. Komarova H.L., Fedchenko I.I., Nesterchuk O.M. Pidvyshchennia znosostiikosti stalei shliakhom nanesennia poverkhnevnykh pokryttiv. Inzheneriia poverkhni ta renovatsiia vyrobiv : materialy 23-yi Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, Kyiv–Ternopil, 20–22 chervnia 2023 r..
8. L.A. Timofeeva, S.S. Timofeev, A.Y. Dyomin et al. Surface modification of machine parts made of iron– carbon alloys operating under conditions of friction and wear. J. of Friction and Wear. 2018. vol. 39, № 3. R. 283–289.
9. Tymofeieva, L.A. Modyfikatsiia poverkhni detalei mashyn i mekhanizmv v umovakh tertia ta znoshuvannia / L.A. Tymofeieva, L.V. Voloshyna, S.S. Tymofieiev ta in. // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». – Kharkiv : NTU «KhPI», 2022. – Serii : Tekhnolohii v mashynobuduvanni. – № 2 (6). – S. 104–109.
10. Dykha O, V., Sviderskyi V.P., Drobot O.S., Mashovets N.S. Tekhnolohichne zabezpechennia dovhovichnosti tekhnichnykh trybo system: monohrafiia / O.V. Dykha, V.P. Sviderskyi, O.S. Drobot, N.S. Mashovets. - Khmelntskyi : KhNU, 2021. – 178 s.
11. Burban O. V. Doslidzhennia ta rozrobka rezhymiv termodyfuziinoho zmitsnennia dlia pidvyshchennia ekspluatatsiinykh vlastyvostei detalei avtomobilia : diplomna robota mahistra : 132 Materialoznavstvo / O.V. Burban ; Khmelnyts. nats. un-t. – Khmelnytskyi, 2024. – 93 s. URI <https://elar.khmnu.edu.ua/handle>
12. Tymofeieva, L.A. Modyfikatsiia poverkhni detalei mashyn i mekhanizmv v umovakh tertia ta znoshuvannia / L.A. Tymofeieva, L.V. Voloshyna, S.S. Tymofieiev ta in.. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriiia “Tekhnolohii v mashynobuduvanni”. 2022. № 2 (6). S. 104–109.
13. Tymofeieva ,L.A., Kozlovska I.P., Olkhovskiy V.V. Vplyv bahatosharovoho pokryttia na znosostiikist chavunnykh vyrobiv. Inzheneriia poverkhni ta renovatsiia vyrobiv : materialy 23-yi Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, Kyiv–Ternopil, 20–22 chervnia 2023 r..