

УДК 629.083

DOI: 10.15587/1729-4061.2019.171619

## Дослідження можливості управління напружено-деформованим станом гільз циліндрів дизелів триботехнології припрацювання

В. В. Аулін, А. В. Гриньків, С. В. Лисенко, О. В. Диха, Т. М. Замота,  
В. О. Дзюра

Проведеними дослідженнями формування функціонального мідьвмісного поверхневого шару на деталях двигунів автомобілів триботехнологією припрацювання встановлено зниження зношування деталей під час їх експлуатації. Виявлено, що сформоване покриття створює можливість еластичного шару який зменшує напруження в матеріалі деталей двигунів. Експериментальними дослідженнями коерцитивної сили робочих поверхонь деталей підтверджено зниження накопичення руйнуючих напружень в приповерхневих шарах матеріалі деталей. В свою чергу, порівняльний аналіз отриманих результатів коерцитивним методом підтверджує, що запропонована триботехнологія припрацювання приводить до зменшення напружено-деформованого стану та дає можливість підвищити зносостійкість і полішити технічного стану гільз циліндрів дизеля: величина коерцитивної сили знижується на 7,5 %, в той час коли напрацювання збільшується на 16 %. При цьому при більшому напрацюванні: 254,8 тис. км проти 220,5 тис км за даними коерцитивної сили (14,2...9,1) А/см і (13,2...9,0) А/см знаходиться в практично однаковому технічному стані.

Функціональний поверхневий шар формується при впровадженні композиційної оливи в триботехнологію холодного припрацювання силового агрегату автомобіля. Запропоновано та реалізовано схему підключення електричного струму до деталей циліндропоршневої групи двигуна при дослідженні розробленої триботехнології припрацювання. Особливості даної схеми є те, що постійний електричний струм подається наступною полярністю, плюсом, через щітково-колекторний вузол на колінчастий вал, а мінусом, через затискний контакт на блок картер.

Результати досліджень дають підстави стверджувати про можливість контролю внутрішніх напружень та подальшої величини зношування в матеріалі робочих важконавантажених деталей силових агрегатів автомобілів під час певних їх сервісних діях. Запропонована триботехнологія припрацювання може представляти інтерес як для сервісних служб автотранспортних підприємств, так і для станцій технічного обслуговування автомобілів

Ключові слова: гільза, присадка, гліцерат міді, припрацювання, поверхневий шар, електроліт, коерцитивна сила, електрична схема, напруження, гільза циліндра

## **1. Вступ**

В даний час підвищення надійності систем і агрегатів автомобілів здійснюється шляхом вибору зносостійких конструкційних матеріалів, підбором до них оливи та створенням умов для рідинного мащення спряжень деталей [1]. У цьому напрямку проводяться більш інтенсивні дослідження й досягнуто значних успіхів при проектуванні трибоспряжень деталей. В свою чергу, протікання в них процесів тертя та зношування підчас експлуатації значною мірою залежить від властивостей мастильного середовища та сформованих на робочих поверхнях плівок антифрикційних матеріалів.

При цьому широко використовуються мідьвмісні матеріали поверхонь деталей спряжень, які експлуатуються в умовах контактування з високотемпературними, абразивовмісними речовинами. Однак, володіючи високою електропровідністю і теплопровідністю, робочі поверхні деталей мають низьку зносостійкість [2]. В свою чергу, висока електропровідність даних матеріалів призводить до швидкої трибоелектризації поверхневих шарів, які створюють електричне поле, що може впливати на присадки та частинки зношування. Даний вплив характеризується позитивно в період робочої експлуатації присадок, але при збільшенні кількості частинок зношування та спрацюванні присадок в оливі даний ефект відіграє негативну сторону свого прояву. За таких умов відбувається швидше дрейфування частинок зношування і подальшій їх роботі, на поверхні деталі, як абразивів, що зменшують зносостійкість робочих поверхонь деталей спряження.

Одним із шляхів усунення цього недоліку є створення антифрикційних поверхневих шарів з високими експлуатаційними властивостями на сталевій або чавунній основі триботехнологіями припрацювання та відновлення.

Ці технології володіють значною перевагою формування необхідного комплексу експлуатаційних характеристик та властивостей поверхневих шарів деталей. Їх використання дає можливість забезпечити еквідистантність робочих поверхонь спряжень деталей і створюють умови для реалізації процесів та станів самоорганізації матеріалів як підчас тертя в початковий період роботи спряжень, так і підчас подальшої експлуатації. Зазначене забезпечує мінімум зношування деталей спряжень, збільшення їх зносостійкості та експлуатаційної надійності, що є безумовно актуальною проблемою.

## **2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

В загальному підході усі методи підвищення зносостійкості спряжень деталей дизелів автотранспортної техніки поділяються на три основні групи: конструкційні, технологічні і експлуатаційні [1]. Але основну увагу бажано було приділити звязку експлуатаційних та технологічних груп з триботехнологічної точки зору. Конструкційні рішення по підвищенню зносостійкості і надійності закладаються на етапі проектування спряжень деталей силових агрегатів в цілому. При цьому можливе зниження витрат потужності на тертя на 8...10 %, але обмеженням є ускладнення їх компонування, зростання чаду, окислення оливи та ін. [2]. В такому випадку потрібно буде виконувати завдання підбору технологічних та сервісних операцій для різних агрегатів підчас експлуатації.

На величину зносу робочої поверхні спряжень деталей безпосередньо впливають рівень механічних і теплових навантажень, тип і продуктивність структурних трибоспряжень деталей [3]. Але в роботі не вирішено питання керування зносом триботехнологіями припрацювання спряження.

Покращення експлуатаційних властивостей олив відбувається при введенні в них присадок і утворенні спеціальних плівок або покриттів на поверхнях тертя деталей [4]. Але не розроблено схеми керування функціональними мідь вмісними покриттями на робочих поверхнях деталей. За своєю дією на поверхню тертя розрізняють наступні присадки: поверхнево-активні; хімічно-активні; ін-активні; металоплакуючі і пластично-деформуючі присадки [5] та ін. Але не розроблявся комплекс їх приготування та узгодження з триботехнологією припрацювання. У важких умовах експлуатації спряжень деталей може утворитись самоорганізаційне трибоспряження, з регулюванням процесів зношування і регенерацією поверхонь тертя без технічного обслуговування [6]. В роботі не вирішено питання самоорганізації, що дають можливість зменшити внутрішні напруження в матеріалах деталей. Не дивлячись на суттєві переваги, присадкам притаманні наступні особливості: їх дія триває при достатній концентрації; в деяких умовах вони здатні навіть збільшити опір тертю [7]. Оптимальні концентрації присадки позитивно впливають на реологію мастильного матеріалу; через складність фізико-хімічних процесів, перетворень, присадки не володіють універсальністю до матеріалів і режимів роботи трибоспряжень деталей [8]. В роботах не розглянуто можливість приготування присадок та з їх допомогою формування мідьвмісного покриття.

При дослідженні характеру та природи трибохімічних процесів припрацювання [9] метод електрохіміко-механічного припрацювання показав позитивний ефект. Сутність методу полягає в тому, що в зону тертя в якості мастильного матеріалу подається спеціальний електроліт, а на деталі - електричний струм. В результаті механічної і електрохімічної взаємодії та еквідистантності поверхонь деталей спряжень відбувається швидка взаємна їх припрацьовуваність [10]. Але підчас пвирішення питань електрохіміко-механічного припрацювання не розроблена схема підключення деталей зі зворотньо-поступальним рухом.

Застосування при технологічній обкатці олив з присадкою сприяє переходу до нормального механо-хімічного зношування деталей спряжень і утворенню ювенільних поверхонь, здатних сприймати експлуатаційні навантаження [11]. Але потрібно було вирішити завдання зменшення внутрішніх напружень підчас експлуатації. При цьому стабілізується технічний стан, склад, експлуатаційні властивості поверхонь тертя деталей і мастильних середовищ шляхом їх припрацювання [12]. Останнє сприяє осадженню іонів металів на зношеній поверхні деталей від розміщеної ізольованої від спряжених деталей металевої вставки. Цей процес обумовлює утворення нових зносостійких структур в поверхневих шарах деталей трибоспряжень і являє собою вибірковий перенос. Відповідно підчас протікання процесу тертя в присутності гліцерату міді можливо спостерігати аналогічний процес формування локальних областей з кращими фізико-хімічними властивостями аналогічно як при обробці концентрованим потоком енергії [13]. В даних роботах не розглянуто механізм трибологічної активації

локальних ділянок, а також покращення їх якості під час експлуатації, як технологічна операція.

Для триботехнологій припрацювання і відновлення найбільш перспективними є методи, в основі яких покладені трибохімічні реакції, що відбуваються в умовах механічної активації в системі "метал – композиційна олива" або "метал-електроліт" [14]. Основною причиною протікання таких реакцій є перенос речовини електрично зарядженими компонентами. Якщо підібрати присадки або електроліт і активувати поверхню деталі, що оброблюється електричним полем, то можливо досягти спрямованої доставки на неї зносостійких компонентів [15]. Але в роботах не описано і не розглянуто питання керування реакціями за допомогою постійного струму і електричні схеми їх реалізації.

На сьогодні зниження рівня зносу та підвищення надійності спряження деталей силових агрегатів транспортних машин досягається переважно застосуванням методів:

- підвищення точності обробки деталей в трибоспряженнях [16];
- формування шорсткості поверхонь, що забезпечує оливозберігаючі функції [17];
- формування покриттів на робочі поверхні трибоспряжень, що знижують коефіцієнт тертя [18];
- застосування матеріалів з високими циклічною міцністю і демпфуючою здатністю та ін. [19];
- розробка поверхневих шарів з дисипуючими та реологічними властивостями [20].

Методи можливо реалізувати при впровадженні триботехнологій припрацювання та відновлення спряжень деталей в композиційному оливному середовищі [21]. Але вирішення даних проблем виконувалось виключно з використанням присадок до оливи без електричної складової.

Для оптимальних умов функціонування спряжень деталей необхідне створення на їх робочих поверхнях тонкого шару покриття з антифрикційних матеріалів, які сприяють пластифікуванню та згладжуванню мікронерівностей на поверхнях тертя [22]. В роботі не розглянуто особливості заповнення поверхневого шару з мідьвмісних присадок. Цього досягають при використанні олив з металовмісними та металоорганічними присадками [23], тобто композиційних оливних середовищ. Найбільшого поширення серед них набули металоорганічні сполуки міді та молібдену [24]. Натомість дані присадки володіють низькою величиною зсуву, а також бажано було б вивити вплив цих присадок на внутрішні напруження в деталях. Комплексного розгляду досліджуваної проблеми можливо досягнути при аналітичному комплексі, що розбиває загальну задачу на більш прості дослідні точки [25], загальний синтез даних дасть можливість висвітлити повну дослідну картину. Несправність циліндро-поршневої групи транспортних машин складає від 5...25 % відмов двигуна. Аналіз основних причин відмов показує, що основними причинами є наступні: перевищення умов навантаження; важкі умови експлуатації; недотримання періодичного технічного обслуговування системи змащування та використання невідповідних олив до умов експлуатації [26]. Але в роботах не розглянуто питання зміни коерцетив-

ної сили матеріалу деталей даних спряжень та вплив напруженого стану на їх напрацювання. Важливим критерієм реалізації триботехнологій є їх автоматизація як при виготовленні систем та агрегатів транспортних машин, так і під час їх експлуатації. Одним з ключових напрямків на даному часі є гідроелементи, що функціонують на ефекті прилипання струменю робочого середовища. Використання даних елементи дають можливість розподіляти гідравлічний потік, а також перенаправляти його по різним технологічним операціям, що вкрай важливо під час формування композиційних олів [27]. Але в даних елементах бажано було вирішити питання динамічного переміщення сумішей та можливість температурного регулювання.

Напружено-деформований стан також можливо виявляти під час тертя за рахунок різних безрозбірних методів, а саме методів акустичної емісії та коерцетивної сили на робочих поверхнях деталей [28]. Виявлення даного стану виконувалось в місцях максимального зношування, що не давало можливість оцінити всю картину розглянутого стану в матеріалі деталей. Додаткові напруження в спряженнях деталей здійснюють абразивні частинки, які потрапляючи в трибологічний контакт формують локальні компресійні зони, що в подальшому є концентраторами напружень [29]. Але в роботі не наведено моделювання даних локальних зон. Утворення даних абразивних частинок можливе за рахунок кластеризації частинок зношування та лакофарбових включень в робочій оліві, що в свою чергу є неприпустимим під час експлуатації транспортних машин. Формування зносостійких поверхневих шарів з сприятливими реологічними властивостями здійснюється для зменшення внутрішнього напружено-деформованого стану деталей машин. Це можливо при раціональному складі гідросуміші або композиційних мастильних середовищ [30]. Насамперед потрібно виявити закономірності впливу добавок з композиційної оліві на робочу поверхню деталей та на дисипативні властивості створених захисних плівок. Останнє в деяких умовах може забезпечувати значно нижчу температуру зварювання в трибологічному контакті [31]. Бажано було описати математичні моделі зношування в присутності добавок до оліві.

Вирішення проблеми підвищення довговічності деталей машин вимагає комплексного підходу і розгляду кожного елементу трибоспряжень, що позитивно впливає на точність визначення характеристик робочих поверхонь деталей. Дослідження формування поверхневих шарів з вмістом міді на робочих поверхнях деталей при реалізації триботехнічного припрацювання потребують сучасні силові агрегати для підвищення їх надійності. Практично відсутні дослідження динаміки формування покриттів та комплексу експлуатаційних властивостей в процесі припрацювання різних типів спряжень деталей в композиційних олівних середовищах.

### **3. Мета та задачі дослідження**

Метою роботи є зменшення напруженого стану деталей дизелів автомобілів під час експлуатації на основі комплексного дослідження технології триботехнічного припрацювання спряжень з формуванням функціональних мідьвмісних поверхневих шарів на гільзах циліндрів.

Завдання дослідження:

– розкрити механізм формування мідьвмісного антифрикційного покриття на основі трибологічних процесів та теоретично обґрунтувати можливість використання триботехнічного припрацювання ресурсовизначальних спряжень деталей дизелів автомобілів;

– виявити основні закономірності процесу напруженого стану досліджуваних деталей при триботехнічному припрацюванні та встановити аналітичні залежності впливу його параметрів на ресурс досліджених спряжень;

– теоретично та експериментально обґрунтувати вплив параметрів припрацювання на характеристики робочих поверхонь деталей циліндро-поршневої групи та їх напружено-деформований стан.

#### **4. Матеріали і методи формування та дослідження стану робочих оливи та поверхонь гільз циліндрів двигунів вантажних автомобілів**

Моделювання картини напружено деформованого стану спряження гільзи циліндрів та поршневого кільця і робочої поверхні гільзи циліндрів проводили методом скінченних елементів. На персональному комп'ютері визначали найбільш напружені локальні області поверхонь тертя гільз циліндрів, тобто найбільш підлеглих зношуванню, щоб в подальшому визначитися з областями та контрольними точками дослідження.

Оцінку поля напружень і деформацій здійснювали за допомогою пакету COSMOSWorks інтегрованого в CAD-систему SolidWorks 2011. При цьому на першому етапі будували модель гільзи циліндрів, поршневого кільця або їх спряження в CAD-системі SolidWorks з урахуванням геометричних параметрів. Для проведення аналізу побудованої моделі активізували модуль COSMOSWorks (Manager). За допомогою панелі інструментів вибирали вікно Study, в якому задавали тип аналізу Static Type та тип кінцевих елементів Mesh Type. В менеджері COSMOSWorks задавали матеріал деталі або спряження (пункт меню Apply/Edit Material). Зазначимо, що COSMOSWorks має бібліотеку матеріалів та їх властивостей, яку можна редагувати у разі відсутності відомостей про досліджуваний матеріал на панелі Material. Після цього в менеджері COSMOSWorks вводили граничні умови – Restraints, вибирали поверхні переміщення, які в умовах завдань обмежували у визначених напрямках. На досліджуваних поверхнях розподіляли навантаження, аналогічно тим, що спостерігаються в умовах експлуатації деталей ЦПГ, за допомогою панелі Pressure відповідними опціями.

Після перевірки настройки аналізу методом кінцевих елементів будували сітку за допомогою пункту меню Mesh, в якому задають необхідні параметри та визначають розміри кінцевих елементів. Далі із контекстного меню, що відповідає піктограмі Static Analysis – Pressure, запускали процедуру розрахунку командою Run. При цьому в менеджері з'являються папки Stress (Напруження), Displacement (Переміщення), Strain (Деформація), Deformation (Деформований вигляд), Design Check (Перевірка міцності), в яких подано результати розрахунків відповідних величин та їх наочне представлення. В навантажених деталях

виділяли характерні області з різною величиною напруження. Про це свідчить колір областей. Величину напружень оцінювали за визначеною шкалою.

Для реалізації процесів покращення робочих поверхонь гільз циліндра й поршневих кілець формуванням антифрикційних мідьвмісних покриттів триботехнічного припрацювання в даній роботі використано композиційна олива, що містить присадку 3,5...4,0 % гліцерату міді  $\text{Cu}_3(\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3)_2$  в базовій оливі М-10Г<sub>2</sub>. Вибір гліцерину як розчинника гліцерату міді обумовлений тим, що він має високу стабільність у мастильних композиціях, а при їх зберіганні, дає можливість одержувати стійкі і недорогі композиційні оливи для реалізації триботехнології припрацювання спряжень деталей дизелів. Крім цього вибір гліцерину, як розчинника, пояснюється насамперед тим, що він має добрі мастильні властивості і здатність відновлювати метали з їх оксидів.

Приготування мастильної композиції полягає в наступному. До обезводненого гліцерину, нагрітого до температури 391...395 К, додавали безводневий ацетат міді (II) 7...8 % відносно об'єму гліцерину, даний процес супроводжувався помірним перемішуванням. Зазначена температура є температурою кипіння оцтової кислоти [31]. Тривалість кип'ятіння – 2 години. Приготування відбувається у терморекторі. Охолодження здійснюється разом з реактором, протягом 1 години від 393 К до 293 К за лінійним законом зі швидкістю 1,67 К/хв., поки температура не знизиться до кімнатної. Одержану таким чином присадку до базової оливи М-10Г<sub>2</sub> зберігали у скляній або фарфоровій посудині при температурі 293 К.

Оцінку якості композиційної оливи та її вплив на протизношувальні та протизадиркові властивості робочих поверхонь спряжених деталей дизелів проводили на основі випробувань у спеціалізованій лабораторії на чотирикульковій машині тертя (FBM). Випробування та визначення характеристик мастильних середовищ на FBM проводили відповідно до однотипних стандартів ГОСТ 9490-75, в Німеччині – DIN 51350, в США – ASTM D2783.. Для реалізації методів триботехнічного припрацювання при стендових випробувань запропонована схема підключення електричного струму до деталей циліндро-поршневої групи дизелів на одноциліндровій установці (рис. 1).

Від випрямляча електричний струм величиною  $I=10$  А і напругою  $U=1,2$  В подавали на щітково-колекторний вузол "плюс", що розташовується на одному кінці колінчастого валу, а "мінус" на блок-картера одноциліндрової установки. Частота обертання колінчастого валу установки складала  $n=200$  об/хв.

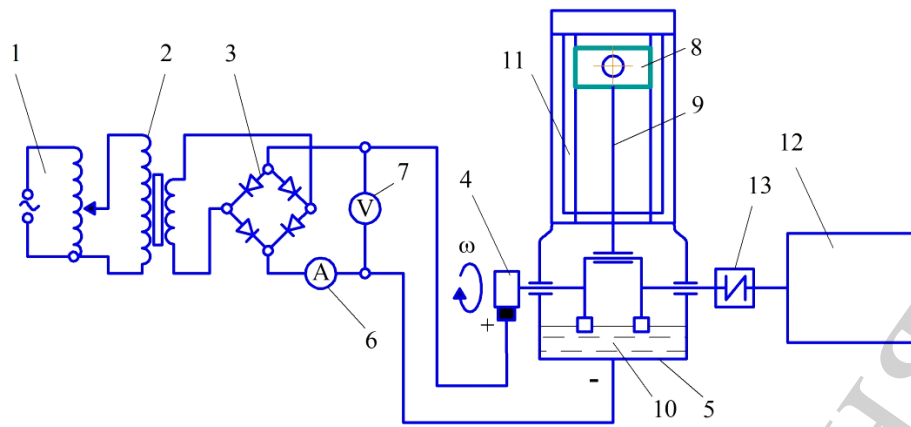


Рис. 1. Схема підключення електричного струму до деталей циліндро-поршневої групи дизелів автомобілів на одноциліндровій установці: 1 – джерело струму; 2 – опір для регулювання величини струму; 3 – випрямляч струму; 4 – щітково-колекторний вузол; 5 – картер для оливи; 6 – амперметр; 7 – вольтметр; 8 – поршень; 9 – шатун; 10 – мастильне середовище; 11 – гільза циліндра дизеля; 12 – електродвигун; 13 – муфта

Ступінь заповнення  $\square$  поверхні тертя плакованим шаром міді визначали, виходячи з результатів металографічного аналізу поверхні, використовуючи методи цифрової обробки зображень в програмі Photoshop. Для цього відкривали меню файл та вибирали дирекцію, в якій збережено записане зображення поверхні тертя в монохромному форматі, щоб зменшити похибку визначення заповненості. Далі за допомогою опції "Чарівна паличка" виділили необхідні фрагменти областей поверхні покритих міддю. Після цього проводили сегментацію за яскравістю методом квантування мод гістограм та вибирали діапазон тону на рівні 119...255. У відповідності до поставленої задачі отримали характеристику тонового інтервалу, що відповідає покриттю міді, на зображенні в монохромному режимі.

Величину зносу гільз циліндрів дизелів визначали їх мікрометражем. Методика вимірювання передбачала проведення замірів у площинах через  $45^\circ$  і не менше 8 точках замірів по твірній з обов'язковим заміром посередині положення першого поршневого кільця. Вимірювання здійснювали при положенні поршня у верхній мертвій точці та посередині положення останнього поршневого кільця, при знаходженні поршня у нижній мертвій точці.

Визначення напружено-деформованого стану матеріалу деталей проводили коерцитиметричним методом. Досліджували стан поверхні тертя спряжених зразків і деталей, експериментально визначаючи коерцитивну силу  $H_C$  в локальних областях їх поверхонь. Вимірювання здійснювали в області, обмеженій ферозондом потенціалометру за допомогою коерцитиметру КРМ-Ц (рис. 2).





Рис. 2. Загальний вигляд коерцитиметру КРМ-Ц (Росія)

Принцип роботи приладу полягає в намагнічуванні локальної ділянки поверхні деталі з наступним його розмагнічуванням наростаючим полем, фіксації напруженості поля, що відповідає коерцитивній силі матеріалу, і вимірюванню амплітуди сигналу з ферозонду. Прилад дозволяє контролювати якість поверхні до і після припрацювання та зміну фізико-хімічних і структурних властивостей. Якщо всі фактори, які визначають стан поверхні деталі, крім одного, фіксовані, то, в межах однієї конструкції, коерцитиметр дозволяє виявити аномалії, пов'язані зі станом деталей спряження.

Дані вимірювань  $H_C$  використано для визначення змін в станах зношування та напружено-деформованого станах робочих поверхонь гільз циліндрів дизелів. Вимірювання  $H_C$  в обраних локальних ділянках здійснювали відповідно до ГОСТ 30415-96:

- на досліджувану ділянку щільно прикладали щупи ферозонду;
- подавали струм з пульту керування для створення в матеріалі локального магнітного поля, яке компенсується наростаючим магнітним полем протилежного напрямку;
- фіксоване значення напруженості компенсованого магнітного поля (коерцитивну силу) отримували на цифровому табло приладу;
- вимірювання на поверхнях зразків і деталей проводили у вибраних напрямках з певним кроком.

На персональному комп'ютері, з використанням бази експериментальних даних, будували розподіли значень  $H_C$  та їх зв'язок з основними параметрами навантаження:  $H_{C0}$  – вихідний (ненавантажений) стан;  $H_{Cт}$  – стан, що відповідає фізичній границі текучості матеріалу  $\sigma_m$ ;  $H_{CB}$  – стан, що відповідає границі його міцності  $\sigma_b$ . В залежності від нормативних вимог встановлювали критичну величину коерцитивної  $H_{Cкр}$ , що відповідає допустимому значенню напруження при розрахунку на міцність  $\sigma_b$  поверхневих шарів деталей трибоспряження. Оскільки  $H_C$  визначається векторною сумою діючих напружень то, при аналізі напружено-деформованого стану враховували не тільки абсолютне її значення, але і напрямок по відношенню до розташування магнітних силових ліній в місцях вимірювань.

За даними вимірювань  $H_C$  на робочих поверхнях деталей трибоспряження за допомогою програми MS Excel на персональному комп'ютері будували картографи розподілу коерцитивної сили. При цьому відтінки зафарблення областей картографи відповідають різним діапазнам значень коерцитивної сили  $H_C$ , характерних для різних станів матеріалу у відповідності до величини залишкових напружень.

### **5. Результати досліджень стану деталей циліндро-поршневої групи при формуванні поверхневих шарів триботехнологіями припрацювання у середовищі композиційної оливи**

Опис механізму виникнення та утворення напружено-деформованого стану можливо на основі його моделювання за допомогою пакету COSMOSWorks інтегрованого в CAD-систему SolidWorks 2011.

Результати моделювання напружень в спряженні "гільза циліндрів-поршневе кільце", проведені на рис. 3.

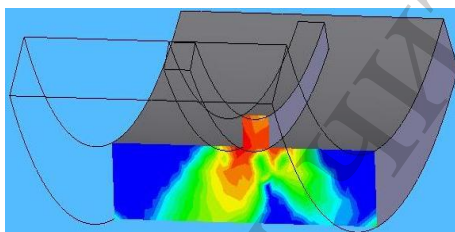


Рис. 3. Характерні розподіли полів напружень в перерізі спряження зразків "гільза циліндрів-поршневе кільце": червоний колір – максимальні напруження в деталі; темно-синій колір відображає мінімальні напруження в деталі

Розподіл напруження робочої поверхні гільзи циліндрів (СЧ-18) після моделювання наведено на рис. 4.

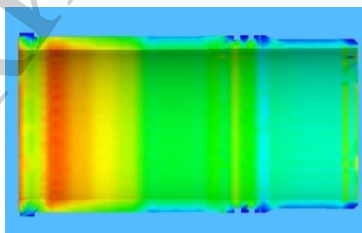


Рис. 4. Характерні розподіли полів напружень робочих поверхонь гільзи циліндрів: червоний колір – максимальні напруження в деталі; темно-синій колір відображає мінімальні напруження в деталі

Результати формування функціонального шару після проведення технології триботехнічного припрацювання гільзи циліндрів. Ступінь заповненості сформованого мідьвмісного шару на робочій поверхні гільзи циліндрів триботехнологією припрацювання у середовищі композиційної оливи визначали за

допомогою обробки монохромних мікрофотографій досліджуваних поверхонь у програмі Photoshop (рис. 5).

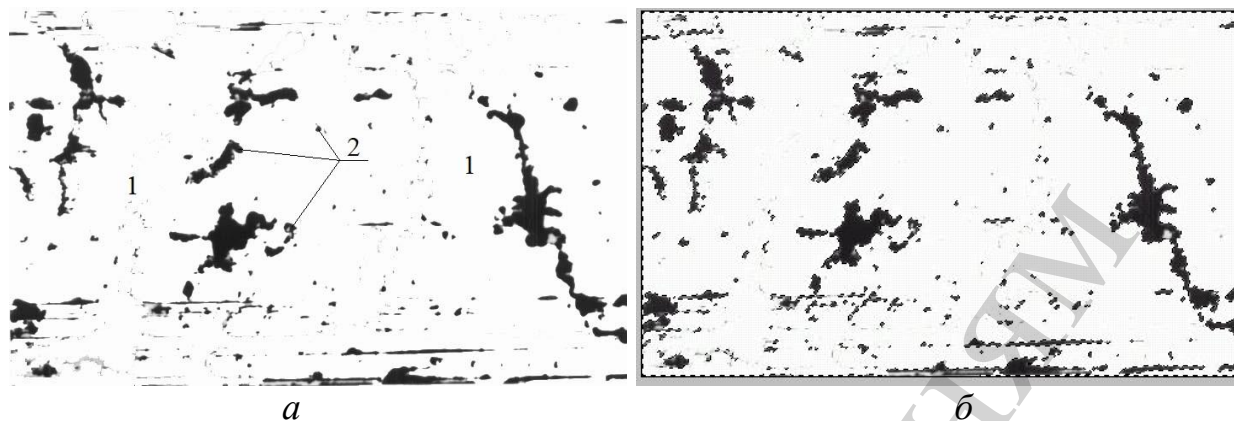


Рис. 5. Мікрофотографія поверхні тертя плакованою міддю в наслідок припрацювання спряжень зразків і деталей в композиційному оливному середовищі під дією постійного електричного струму ( $I=2,0$  А,  $U=1,2$  В,  $P=8$  МПа,  $\Delta=4$  %,  $h=35$  с<sup>-1</sup>,  $t=45$  хв): а – монохромна фотографія: 1 – область мідного покриття; 2 – область основного матеріалу деталі; б – виділенні області фрагментів на ній в програмі Photoshop ( $\times 500$ )

Результати дослідження поверхні зразків сегментацією за яскравістю методом квантування мод представлено у вигляді гістограм тонових інтервалів (рис. 6).

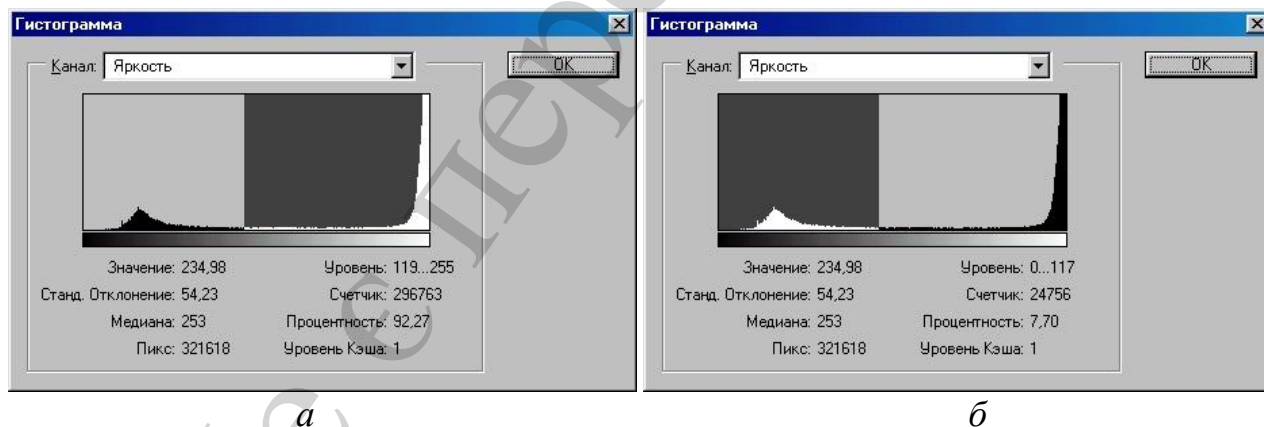


Рис. 6. Частина повного спектру мод гістограми, що відповідає області поверхні тертя, плакованої міді при триботехнології припрацювання:  
а – в середовищі композиційної оливи 4 % вмістом гліцерату міді;  
б – при базовій оливі без добавок

Можна бачити, що для даного випадку ступінь заповнення міддю поверхні тертя для досліджуваного зразка гільзи циліндрів рис. 6, а складає  $\square_{\text{ш}}=92,27$  %, або 296763 пікселя, а для рис. 6б –  $\square=7,70$  %, або 24756 пікселя. Піксельний аналіз мікро фотографій в програмі Photoshop свідчить про формування та за-

повнення на значній частині поверхні тертя мідьвмісної плівки, максимально можливий ступінь охопленості дорівнює 100 %, а число пікселів – 312618. Для точнішої обробки візуальних даних, у вигляді мікрофотографій поверхонь зразків, було прийнято рішення спочатку зменшити кількість кольорів, фото виконували в монохромному режимі зйомки. А для зменшення захоплювань перехідних зон, між покриттям і основою, в монохромному зображенні використовували більш складніший спосіб піксельного аналізу в програмі Adobe Photoshop CS4 Extended (2009) PC Portable (версія 11.0.1).

Візуальне представлення результатів зміни усередненого зносу по твірній та по діаметру гільз циліндрів агрегату КамАЗ-740 без та з реалізацією триботехнології припрацювання на різних напрацюваннях наведено на рис. 7. Отримані закономірності дають можливість провести попередню порівняльну оцінку відповідності спрацювання деталей та виникнення напружено-деформованого стану в них.

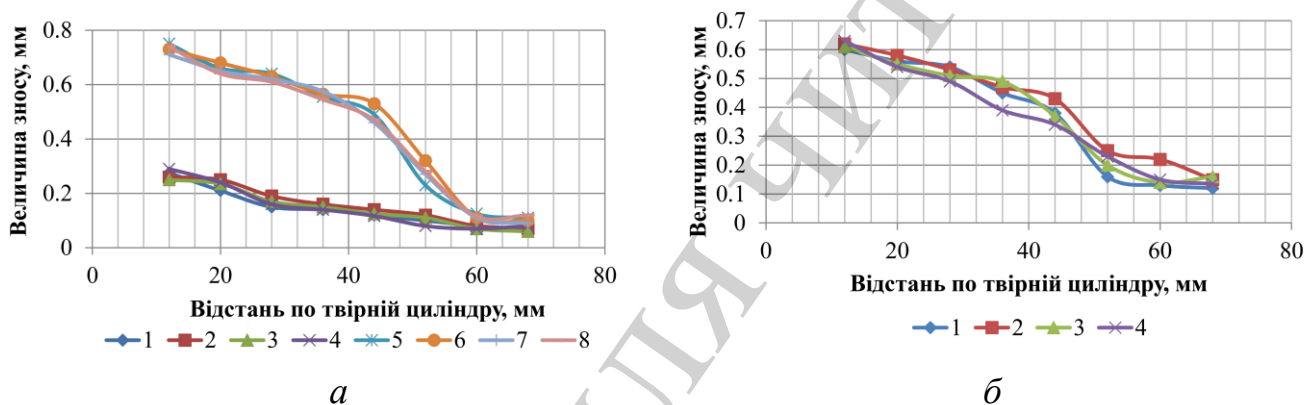


Рис. 7. Розподіл усередненого зносу по твірній та по діаметру гільз циліндрів агрегату КамАЗ-740: *a* – при напрацюванні 112 тис. км (криві 1–4) та 220,5 тис. км (криві 5–8), криві 1, 5 лежать в площині паралельній осі колінчастого валу (базова площина), 0°; криві 2, 6 з відхиленням від базової площини за годинниковою стрілкою за видом зверху на 45°; криві 3, 7 з відхиленням від базової площини за годинниковою стрілкою за видом зверху 90°; криві 4, 8 з відхиленням від базової площини за годинниковою стрілкою за видом зверху 135°; *б* – при напрацюванні 254,8 тис. км (в моторну оливу додається  $c_v=4$  % присадки гліцерату міді): 1 – паралельно осі колінчастого валу, 0°; 2 – з відхиленням 45°; 3 – з відхиленням 90°; 4 – з відхиленням 135°

Оцінку фактичного напружено-деформованого стану гільзи циліндрів можливо провести за зміною коерцитивної сили на різній висоті від верхньої площини деталі. Зміна напружено-деформованого стану змінюється в залежності від наявності виконання триботехнології припрацювання деталей. Результати побудови гістограм стану гільз циліндрів, на різній висоті від верхньої площини, за величиною коерцитивної сили наведено на рис. 8.

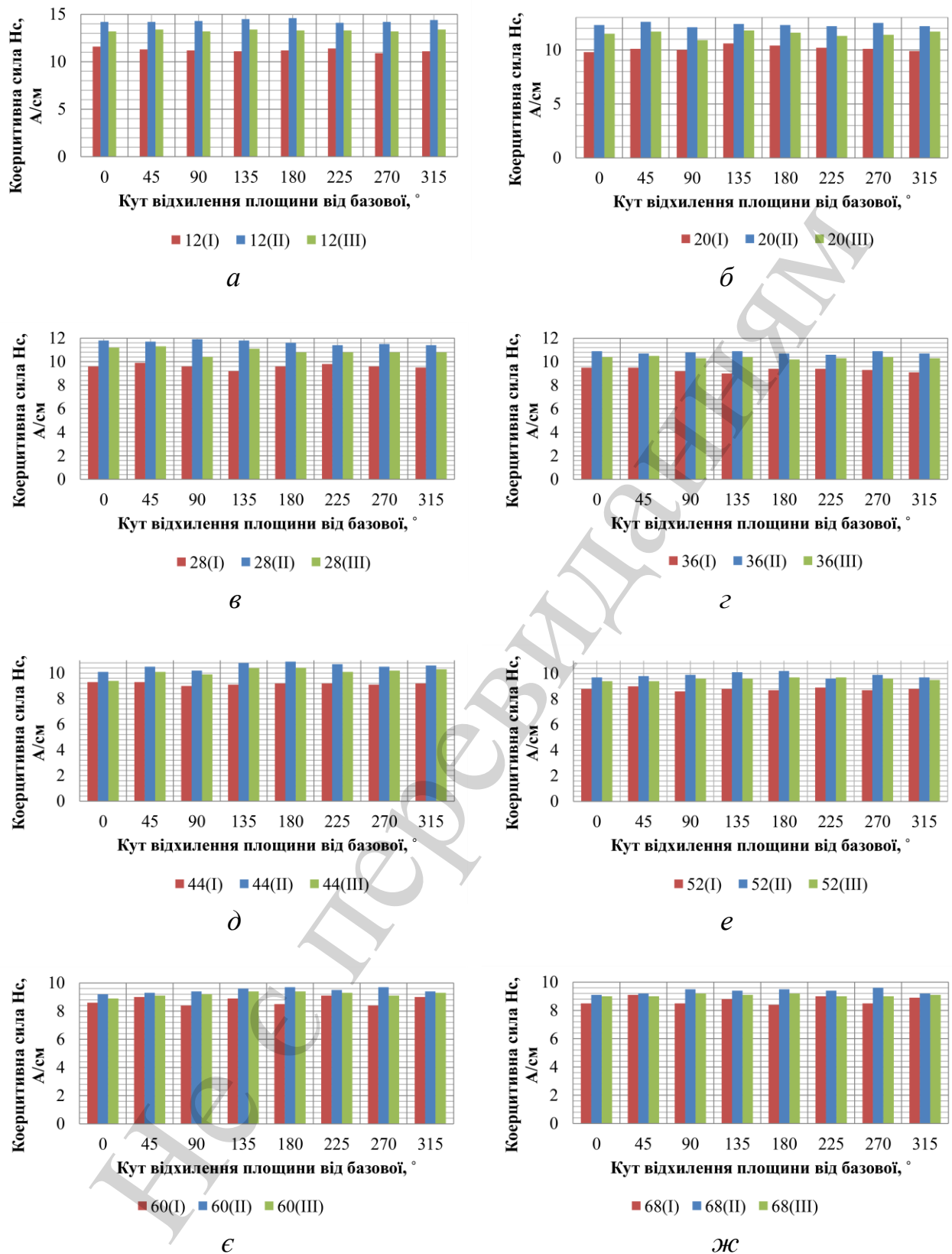


Рис. 8. Усереднені значення коерцитивної сили на робочій поверхні гільзи циліндрів дизеля КаМАЗ-740 по твірній на відстані від верхньої площини: *a* – 12 мм; *б* – 20 мм; *в* – 28 мм; *г* – 36 мм; *д* – 44 мм; *е* – 52 мм; *є* – 60 мм; *ж* – 68 мм; при відповідному напрацюванні: 112 тис. км (I); 220,5 тис. км (II); 254,8 тис. км (III) з реалізацією запропонованої триботехнології припрацювання робочих поверхонь



Відображені картограми показують зменшення коерцитивної сили на гільзах циліндрів, що були трибологічно припрацьованні, що показує позитивний ефект даної технології. Аналізуючи картограми також можна стверджувати, що використання триботехнології припрацювання дає змогу зменшити напружено-деформований стан робочої поверхні гільзи циліндрів і збільшити напрацювання цієї деталі в експлуатації.

## **6. Обговорення результатів формування функціонального мідь вмісного поверхневого шару гільз циліндрів під час їх триботехнічного припрацювання**

Результати моделювання поля напружень спряжень деталей "гільза циліндрів – поршневе кільце" свідчать про необхідність формування на робочих поверхнях функціональних покриттів з максимальною заповненістю антифрикційного матеріалу на довжині 12-68 мм по твірній гільзи циліндра.

Локальний характер зношування спряжень зразків та деталей двигуна підтверджується дослідженням полів напружень рис. 4, моделювання і аналіз яких проведені методом кінцевих елементів за допомогою пакету COSMOSWorks, інтегрованого в CAD-систему SolidWorks. На увагу заслуговує розподіл напружень з розвинутим крайовим ефектом, який по мірі комбінованого застосування триботехнології припрацювання в композиційній оливі поступово згасає. Зазначене відображає характер локального процесу зношування, розподіл поля температур та моментів тертя (рис. 3, 4).

Картини розподілу напруженого стану в гільзах циліндрів (рис. 4) свідчать про нерівномірний його характер: найбільш напруженою є область верхньої мертвої точки, область верхнього компресійного кільця. Ця область найбільше зношується, а тому напружено-деформований стан матеріалу безпосередньо пов'язаний з зношуванням деталей з нього.

Механізм створення антифрикційного захисного покриття на матеріалах деталей трибоспряжень в процесі реалізації запропонованої триботехнології припрацювання в композиційному оливному середовищі з 4% вмістом гліцерату міді розглянемо з трибофізичної точки зору. При цьому вважаємо процес тертя як сукупність великої кількості механічної взаємодії мікронерівностей спряжених поверхонь деталей. В таких умовах порушується рівноважний стан поверхневих шарів, що відповідає мінімуму потенціальної енергії деформованої зони. Накопичення енергії пружних деформацій в поверхневих шарах деталей змінюють їх стан механічні властивості та теплофізичні характеристики їх матеріалів. Зважаючи на незначні об'єми поверхневих шарів, значення накопиченої енергії може виявитись критичними і поверхневих шарів матеріалу деталей переходить в особливий, надзбуджений стан. Даний стан є нестійким утворенням і швидко релаксує, переходячи до початкового стану. При цьому постадійно створюються реакційноздатні сполуки, що мають радикальну, іонорадикальну або іонну структуру.

Зазначені процеси супроводжуються емісією електронів з поверхні тертя в композиційну оливу. Електрони, співударяючись з молекулами оливи і атомами речовин добавок, збуджують їх. Це приводить до іонного розпаду струк-

тури молекул речовин присадки, що є спусковим механізмом формування на поверхнях тертя антифрикційних покриттів з продуктів трибохімічних реакцій.

Інтенсивність процесу формування антифрикційних покриттів на поверхні тертя залежить від щільності некомпенсованих зв'язків в її локальних областях. Склад добавки гліцерату міді обумовлює процес знаходження активних областей поверхонь деталей та формування на них захисного мідьвмісного покриття, яке є хімічно стабільним, має високі іонообмінні властивості і достатньо інертним по відношенню до хімічно агресивних речовин. Пори, що наявні в сформованому покритті, є областями аномально високої активності абсорбції і можуть ефективно утримувати оливу, змінюючи режими тертя в процесі експлуатації. Крім цього, наявність іонів металів в композиційній оліві сприяє зв'язуванню гідроксильних груп і кисню, що приводить до розчинення поверхневих поверхні захисної плівки й реалізації градієнта її властивостей. Під покриттям формується перенасичений дислокаціями поверхневий шар, що приводить до формування шарів наднизького опору деформації зсуву. В свою чергу, згадувані шари в колективній взаємодії із структурою антифрикційної плівки мають аномально високу адсорбційну здатність. Дані плівки створюють на поверхні тертя сприятливі умови для розвитку гранично низьких рівнів коефіцієнта тертя, інтенсивності зношування та реалізації певних процесів і станів самоорганізації.

З точки зору трибофізики спряження деталей можна розглядати як електрично ізольовані провідники один від одного шаром діелектрика – композиційної оліві. В трибоспряженні деталей протікають наступні електричні явища:

- трибоелектризація поверхневих шарів деталей внаслідок контактної взаємодії і збільшення контактуючих областей при терті;
- локальне накопичення зарядів на поверхнях за рахунок їх перерозподілу і утворення подвійних електричних шарів;
- виникнення різниці потенціалів при русі частинок присадки у вузьких зазорах спряжень деталей та їх осідання на поверхні тертя та ін.

Зазначені електричні процеси спостерігаються в поверхневих шарах матеріалу деталей і зміни, що відбуваються при цьому охоплюють об'єм шару захисних вторинних структур. Електроерозійне руйнування останнього посилює екзоелектронну емісію, і спостерігається додатковий приплив електронів з поверхонь деталей до шару мастильної композиції. При цьому забезпечується розкладання його структури на іони (додатковий масоперенос) та створюються сприятливі умови утворення нової захисної поверхні тертя деталей. Взаємний вплив компонентів присадки обумовлює на локальних областях адгезії створення гальванічних пар та бар'єру для інгібування водневого зношування.

Аналіз отриманих даних зношування робочої поверхні гільз циліндрів дизелів засобів транспорту дає можливість твердити, що діаметри гільз циліндрів дизеля при напрацюванні 112 тис. км (рис. 7, а, криві 1-4) не виходять за межі граничних або ремонтних розмірів і гільзи, здатні виконувати свої функції. Найбільший знос спостерігається в області першого компресійного кільця. Далі по твірній гільзи знос експоненціально зменшується. Знос вздовж кутових сегментів по колу гільзи циліндрів суттєво не відрізняється. Знос гільз циліндрів

після напрацювання 220,5 тис. км. (рис. 7, а, криві 5-8) порівняний з гранично допустимими величинами і гільзи потребують профілактичних та ремонтних заходів щодо приведення їх параметрів до значень працездатного стану. Інтенсивність зносу гільз циліндрів при напрацюванні 112 тис. км складала  $2,5 \cdot 10^{-6}$  мм/км, а при 220,5 тис. км – збільшується у 1,36 рази і дорівнювала  $3,4 \cdot 10^{-6}$  мм/км. У випадку, наведеному на рис. 7, б, криві 1-4, при напрацюванні 254800 км інтенсивність зносу -  $2,4 \cdot 10^{-6}$  мм/км, спостерігається картина розподілу зносу по твірній, яка свідчить про підвищення зносостійкості гільз циліндрів, при комбінованому модифікуванні моторної оливи 4% присадкою гліцерату міді і реалізації запропонованої триботехнології припрацювання та збільшення ресурсу гільз циліндрів на 16 %.

Розглянемо з теоретичної точки зору зміну зносного стану трибоспряження "гільза циліндра-поршневе кільце" при роботі у базовій і композиційній моторній оливі. При напрацюванні  $L$  знос трибоспряження деталей дорівнює:

$$u(L) = u_b(L) - u_k(L), \quad (1)$$

де  $u_b(L)$ ,  $u_k(L)$  – знос трибоспряження деталей в базовій та композиційній оливі.

Використаємо вид функції зв'язку зносу деталей з напрацюванням:

$$u = K_p \cdot L^{\alpha_{I_u}}, \quad (2)$$

де  $K_p$  – коефіцієнт, що залежить від режиму роботи спряження;  $\alpha_{I_u}$  – показник зміни інтенсивності його зношування. При цьому швидкість зносу дорівнює:

$$du(L) / dL = \alpha_{I_u} \cdot K_p L^{\alpha_{I_u} - 1} - K_p m(L), \quad (3)$$

де перший доданок характеризує швидкість зносу деталей в базовій моторній оливі, а другий – при додаванні присадки. При цьому зміна маси присадки в оливі з напрацюванням становить:

$$m(L) = m_0 \exp((-I_u / V_M \rho_M) \cdot L), \quad (4)$$

де  $m_0$  – початкова маса присадки;  $V_M$  – об'єм мастильного матеріалу;  $\rho_M$  – густина антифрикційного матеріалу;  $I_u$  – інтенсивність зношування деталей. Враховуючи (4) в рівнянні (3), отримаємо:

$$\begin{aligned} u(L) &= \int_0^L \alpha_{I_u} K_p L^{\alpha_{I_u} - 1} dL - \int_0^L K_p m_0 \exp\left(-\frac{I_u}{V_M \rho_M} L\right) dL = \\ &= K_p L^{\alpha_{I_u}} - \frac{K_p m_0 \rho_M V_M}{I_u} \exp\left(-\frac{I_u}{V_M \rho_M} L\right). \end{aligned} \quad (5)$$



Отриманий вираз являє собою математичну модель зносу деталей дизеля автотранспортної техніки при використанні активних присадок до моторних оливо. Він свідчить, що зносостійкість деталей підвищується за рахунок зміни характеристик і властивостей моторної оливи та періодичного формування на їх робочих поверхнях покриття антифрикційного металу (міді).

Проведення мікрометражу гільз циліндрів при визначенні зносу дало змогу оцінити адекватність результатів коерцитиметричним методом при визначенні напружено–деформованого стану деталей циліндро-поршневої групи. Аналізуючи зони виміру коерцитивної сили (рис. 8) виявлено рівномірно розподілені значення  $H_c$  по кутовому розподілу, а при збільшенні відстані від верхньої площини гільзи коерцитивна сила зменшується. Представлені гістограми коерцитивної сили робочих поверхонь гільз циліндрів, дають можливість отримати об'єктивну картину їх напружено–деформованого стану, а отже і передумови зміни ресурсних характеристик. Розподіл значень величини  $H_c$  по твірній свідчить про їх характерні зміни при вимірюванні по кожному з секторів і різному напрацюванні агрегату, наведений на рис. 8.

Тенденція розподілу коерцитивної сили (рис. 8) аналогічна проведеним результатам замірів зносу у визначених точках гільзи циліндра (рис. 7). Значний рівень збіжності результатів (більш ніж з 90 % ймовірністю) мікрометражу і коерцитиметричного методу дозволяють обґрунтовано прогнозувати ресурс гільз циліндрів та інших деталей дизелів.

Отримані результати свідчать, що навіть при більшому напрацюванні: 254,8 тис. км проти 220,5 тис. км за значеннями коерцитивної сили (14,2...9,1) А/см і (13,2...9,0) А/см знаходиться в практично однаковому технічному стані. Порівняльний аналіз представлених результатів дає можливість твердити, що реалізація запропонованої триботехнології припрацювання в композиційній оливі гліцерата міді приводить до поліпшення технічного стану гільз циліндрів: величина коерцитивної сили знижується на 7,5 %, в той час коли напрацювання збільшується на 16 %.

За величиною коерцитивної сили  $H_C$  для чавуну СЧ18 встановлено, в якому стані знаходяться локальні області вимірювання матеріалу гільзи циліндрів у порівнянні до його початкового стану ненавантаженого матеріалу  $H_{C0} \approx (6,5 \dots 6,9)$  А/см. Визначено, що при  $H_{Ci} \approx 1,2 \dots 1,5 H_{C0}$  спостерігається пружна область;  $H_{Ci} \approx 1,5 \dots 1,6 H_{C0}$  – зона пластичних деформацій;  $H_{Ci} \approx 1,6 \dots 1,7 H_{C0}$  – пружно-пластична область;  $H_{Ci} \approx 1,7 \dots 1,9 H_{C0}$  – перехід із зони пластичної деформації в зону руйнування. Найбільшу небезпеку становлять ділянки поверхні деталі, у яких  $H_{Ci}$  наближається до  $H_{CM} \approx (17,6 \dots 18,1)$  А/см (коерцитивна сила границі міцності матеріалу) або  $H_{Ci} > H_{CT} \approx (15,3 \dots 15,7)$  А/см (коерцитивна сила границі текучості матеріалу). При зазначеній умові поверхневі шари матеріалу гільзи циліндра переходять у пластичний стан, а потім знеміцнюється і можуть утворюватись корозійно-втомні тріщини.

Крім цього виявлено, що зміна значень величини  $H_C$  від навантаження в місцях максимальних напружень дає можливість визначити в яких режимах відбувалась експлуатація дизелів: надійна експлуатація –  $H_C \square H_{CT} \approx$

$\approx(7,6...15,1)$  А/см; контрольована експлуатація –  $H_{CT} \square H_C \approx(15,3...17,5)$  А/см  $< H_{CM}$ ; критичний режим експлуатації –  $H_C = H_{CM} \square H_{CK} \approx(17,6... 17,8)$  А/см.

## 7. Висновки

1. Використовуючи методи скінченних елементів, проведено дослідження напружено-деформованого стану деталі гільза циліндра дизеля. Виявлено, що розподіл поля напружень відповідає розподілу усередненого зносу по твірній та по діаметру гільз циліндрів силового агрегату КамАЗ при різному напрацюванні. Показано, що коерцитиметричний метод дає можливість отримати об'єктивну картину напружено-деформованого стану гільз циліндрів побудовою гістограми розподілів коерцитивної сили по їх твірній і поперечному перерізу. Виявлено, що важливою величиною по твірній досліджуваних гільз циліндрів складає від 12...68 мм по твірній від верхньої площини.

2. Виявлено, що інтенсивність зносу гільз циліндрів при напрацюванні 112 тис. км складає  $2,5 \cdot 10^{-6}$  мм/км, при 220,5 тис. км – збільшується у 1,36 рази і дорівнює  $3,4 \cdot 10^{-6}$  мм/км., а після реалізації триботехнології припрацювання на працюванні в розмірі 254,8 тис. км інтенсивність зносу –  $2,4 \cdot 10^{-6}$  мм/км. Це свідчить про підвищення зносостійкості гільз циліндрів у випадку комбінованого модифікування моторної оливи 4 % присадкою гліцерату міді і реалізації запропонованої триботехнології припрацювання й збільшення ресурсу гільз циліндрів на 16 %.

3. Теоретично обґрунтовано динаміку зміни зносостійкості деталі гільза циліндра дизеля при реалізації запропонованої триботехнології припрацювання, враховуючи характер спрацювання присадки. Побудовано уточнену математичну модель зносу деталей дизеля при використанні активних присадок до моторних оливи, що в подальшому можливо використати для теоретичної оцінки їх залишкового ресурсу.

4. Порівняльний аналіз отриманих результатів коерцитиметричним методом підтверджує, що запропонована триботехнології припрацювання приводить до зменшення напружено-деформованого стану. Що сприяє підвищенню зносостійкості і поліпшенню технічного стану гільз циліндрів дизеля: величина коерцитивної сили знижується на 7,5 %, в той час коли напрацювання збільшується на 16 %. При цьому при більшому напрацюванні: 254,8 тис. км проти 220,5 тис. км за даними коерцитивної сили (14,2...9,1) А/см і (13,2...9,0) А/см знаходиться в практично однаковому технічному стані.

## Література

1. Substantiation of diagnostic parameters for determining the technical condition of transmission assemblies in trucks / Aulin V., Hrinkiv A., Dykha A., Chernovol M., Lyashuk O., Lysenko S. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 2, Issue 1 (92). P. 4–13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.125349>

2. Studying truck transmission oils using the method of thermal-oxidative stability during vehicle operation / Aulin V., Hrynkiv A., Lysenko S., Rohovskii I., Chernovol M., Lyashuk O., Zamota T. // Eastern-European Journal of Enterprise

Technologies. 2019. Vol. 1, Issue 6 (97). P. 6–12. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156150>

3. Osadchiy S. I., Kalich V. M., Didyk O. K. Structural identification of unmanned supercavitation vehicle based on incomplete experimental data // 2013 IEEE 2nd International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments Proceedings (APUAVD). 2013. doi: <https://doi.org/10.1109/apuavd.2013.6705294>

4. Chernovol M. I., Solovykh E. K. Prediction of thickness of solid-lubricant film formed at friction of metal-polymer composite coating // Journal of Friction and Wear. 1997. Vol. 18, Issue 2. P. 40–45. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-4243070931&origin=inward&txGid=c8b2d89199374bc6b0be3f1916fe5812>

5. The Effect of Friction Behaviour and Wear Protection Ability of Selected Base Lubricants on Tribo-pairs Parameters of Machine Components / Kopčanová S., Kučera M., Kučera M., Kučera M., Kučerová V. // Tribology in Industry. 2018. Vol. 40, Issue 4. P. 681–691. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.04.14>

6. Grain boundary internal friction of unalloyed copper subjected to continuous laser radiation / Ashmarin G. M., Aulin V. V., Golubev M. Yu., Zvonkov S. D. // Physics and chemistry of materials treatment. 1986. Vol. 20, Issue 5. P. 476–478. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0022781198&origin=inward&txGid=c61495ffd8c85481709b2b372a040b74>

7. Determining the characteristics of viscous friction in the sliding supports using the method of pendulum / Dykha A., Aulin V., Makovkin O., Posonskiy S. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3, Issue 7 (87). P. 4–10. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.99823>

8. Levanov I., Zadorozhnaya E., Vichnyakov D. Influence of Friction Geo-modifiers on HTHS Viscosity of Motor Oils // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. 2019. P. 967–972. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5\\_101](https://doi.org/10.1007/978-3-319-95630-5_101)

9. Abd Al-Samieh M. F. Surface Roughness Effects for Newtonian and Non-Newtonian Lubricants // Tribology in Industry. 2019. Vol. 41, Issue 1. P. 56–63. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.07>

10. Increasing the chemical apparatus component service life using contact welding-on / Sokolovskij M. F., Chernovol M. I., Chabannyj V. Ya., Nalivajko V. N., Pavlyuk-Moroz V. A. URL: [https://www.researchgate.net/publication/295822572\\_Increasing\\_the\\_chemical\\_apparatus\\_component\\_service\\_life\\_using\\_contact\\_welding-on](https://www.researchgate.net/publication/295822572_Increasing_the_chemical_apparatus_component_service_life_using_contact_welding-on)

11. Increasing the life of chemical apparatus parts by contact surfacing / Sokolovskii M. F., Chernovol M. I., Chabannyi V. Y., Nalivaiko V. N., Pavlyuk-Moroz V. A. // Chemical and Petroleum Engineering. 1992. Vol. 28, Issue 11. P. 695–697. doi: <https://doi.org/10.1007/bf01150933>

12. Investigation Antiwear Properties of Lubricants with the Geo-Modifiers of Friction / Levanov I., Doykin A., Zadorozhnaya E., Novikov R. // Tribology in In-

dustry. 2017. Vol. 39, Issue 3. P. 302–306. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2017.39.03.04>

13. Electrical conductivity of copper after laser treatment / Ashmarin G. M., Aulin V. V., Golobev M. Yu., Zvonkov S. D., Malyuchkov O. T. // *Russian metallurgy. Metally*. 1986. Issue 5. P. 185–189. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0022959597&partnerID=40&md5=a27075bbaeb23b2bea5c5f9b2cc75f68>

14. Tribological Behaviour of Smart Fluids Influenced by Magnetic and Electric Field – A Review / Michalec M., Svoboda P., Krupka I., Hartl M. // *Tribology in Industry*. 2018. Vol. 40, Issue 4. P. 515–528. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.04.01>

15. Chernovol M. I. Electrolytic polymer-metal coatings // *Protection of Metals (English translation of Zashchita Metallov)*. 1991. Vol. 26, Issue 5. P. 667–668. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0026155660&origin=inward&txGid=1c5bb6f16aff0dab643e4f4c23c268a0>

16. Chernets M. A Method for Predicting Contact Strength and Life of Archimedes and Involute Worm Gears, Considering the Effect of Wear and Teeth Correction // *Tribology in Industry*. 2019. Vol. 41, Issue 1. P. 134–141. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.15>

17. Chernovol M. I., Solovykh E. K. Calculation of solid-lubricant film thickness in friction of the composite polymer-metal coating // *Trenie i Iznos*. 1997. Vol. 18, Issue 2. P. 181–186. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0031084372&partnerID=40&md5=096f22bf978a95f9a53608ad174f42e6>

18. Schott M., Schlarb A. K. Simulation of the thermal budget of plastic/metal tribological pairings by means of FEM [Simulation des thermischen haushalts von kunststoff/metall-gleitpaarungen mittels FEM] // *Tribologie und Schmierungstechnik*. 2018. Vol. 65, Issue 1. P. 20–26. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85042685942&origin=inward&txGid=d9fb6055c4ee7a736a08f0b84cc403a8>

19. Improving of the wear resistance of working parts agricultural machinery by the implementation of the effect of self-sharpening / Aulin V., Warouma A., Ly-senko S., Kuzyk A. // *International Journal of Engineering and Technology*. 2016. Vol. 5, Issue 4. P. 126–130. doi: <https://doi.org/10.14419/ijet.v5i4.6386>

20. Influence of Rheological Properties of a Soil Layer Adjacent to the Working Body Cutting Element on the Mechanism of Soil Cultivation / Aulin V., Lyashuk O., Tykhyi A., Karpushyn S., Denysiuk N. // *Acta Technologica Agriculturae*. 2018. Vol. 21, Issue 4. P. 153–159. doi: <https://doi.org/10.2478/ata-2018-0028>

21. Continuous ZIF-8/reduced graphene oxide nanocoating for ultrafast oil/water separation / Kim D. W., Eum K., Kim H., Kim D., Mello M. D. de, Park K., Tsapatsis M. // *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 372. P. 509–515. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.179>

22. Hiilser P. Electroplating meets lamella - Successful combination of two coating technologies (Part 1) [Galvanik trifft lamelle - erfolgreiche verbindung zweier beschichtungstechnologien (teil 1)] // *Galvanotechnik*. 2018. Vol. 109, Issue

10. P. 1964–1972. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85056282820&origin=inward&txGid=3666f251791780c664096e6220fdea7d>
23. Riva G., Perricone G., Wahlström J. Simulation of Contact Area and Pressure Dependence of Initial Surface Roughness for Cermet-Coated Discs Used in Disc Brakes // *Tribology in Industry*. 2019. Vol. 41, Issue 4. P. 1–13. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.01>
24. Bautista-Ruiz J., Caicedo J. C., Aperador W. Evaluation of the Wear-Corrosion Process in Beta-Tricalcium( $\beta$ -TCP) Films Obtained by Physical Vapor Deposition (PVD) // *Tribology in Industry*. 2019. Vol. 41, Issue 1. P. 126–133. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2019.41.01.14>
25. Realization of the logistic approach in the international cargo delivery system / Aulin V., Lyashuk O., Pavlenko O., Velykodnyi D., Hrynkiiv A., Lysenko S. et. al. // *Communication – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2019. Vol. 21, Issue 2. P. 3–12.
26. Gritsenko A. V., Zadorozhnaya E. A., Shepelev V. D. Diagnostics of Friction Bearings by Oil Pressure Parameters During Cycle-By-Cycle Loading // *Tribology in Industry*. 2018. Vol. 40, Issue 2. P. 300–310. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.02.13>
27. Sowing machines and systems based on the elements of fluidics / Aulin V. V., Chernovol M. I., Pankov A. O., Zamota T. M., Panayotov K. K. // *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 53, Issue 3. P. 21–28. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85039172369&origin=inward&txGid=6e0c8378e2a117b0cf9e123c55056a13>
28. A comparative experimental study on fault diagnosis of rolling element bearing using acoustic emission and soft computing techniques / Ratnam C., Jamin N. M., Rao V. V., Rao K. V. // *Tribology in Industry*. 2018. Vol. 40, Issue 3. P. 501–513. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.03.15>
29. Development of a method and an apparatus for tribotechnical tests of materials under loose abrasive friction / Lutsak D., Prysyzhnyuk P., Burda M., Aulin V. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 5, Issue 7 (83). P. 19–26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.79913>
30. Fedorov S. V. Nano-Structural Standard of Friction and Wear // *Tribology in Industry*. 2018. Vol. 40, Issue 2. P. 225–238. doi: <https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.02.06>
31. Painuly A., Arora A. Rayleigh wave at composite porous half space saturated by two immiscible fluids // *Applied Mathematical Modelling*. 2019. Vol. 73. P. 124–135. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.03.038>