

3. Гігієна населених місць. Збірник наукових праць з проблем медичної екології, гігієни, охорони здоров'я та екологічної безпеки [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – Режим доступу: <http://www.gigiena-mist.kiev.ua> (дата звернення 19.01.2021), вільний. – Назва з екрана.

4. Державна науково-дослідна лабораторія з контролю якості лікарських засобів ДУ "Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва Національної Академії Медичних Наук України" [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – Режим доступу: <http://www.druglab.kiev.ua> (дата звернення 19.01.2021), вільний. – Назва з екрана.

5. Влодек О.Б., Брязкало В.В., Лисенко Ю.І., Діденко І.А. Деякі питання роботи веб-сайту випробувальної науково-дослідної лабораторії в умовах карантину / Збірка тез доповідей VIII Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва: міжгалузеві диспути». ISSN: 2708-1257. К.: 2020. С. 58 – 66.

6. Автоматизація обліку стандартних зразків та реактивів в інформаційно-керуючих системах для лабораторій з контролю якості лікарських засобів / Н. В. Останіна, В. В. Брязкало, А. М. Череменко, О.М. Кузнецова, Ю. І. Лисенко, В. М. Лімбах, З. С. Коваль // Збірник наукових праць співробітників НМАПО ім. П. Л. Шупика. - 2015. - Вип. 24(4). - С. 285-290.

4.10 Increase of resistance against wear of a cranked shaft with babbitt bearings by nanodiamond saturation of friction surfaces

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ПРОТИ ЗНОСУ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛУ З БАБІТОВИМИ ПІДШИПНИКАМИ НАНОАЛМАЗНИМ НАСИЧЕННЯМ ПОВЕРХОНЬ ТЕРТЯ

Постановка проблеми. Одним із напрямків у рішенні задач підвищення ресурсу двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) та компресорів є удосконалення методів отримання високої якості спряжених поверхонь деталей, що працюють в умовах тертя.

Для отримання заданого моторесурсу ДВЗ необхідною умовою на початку його експлуатації є «правильне» обкатування, яке, наприклад для суднових дизелів, виконують поетапно за спеціальними режимами [1]. Обкатування фактично є останньою і самою відповідальною технологічною операцією доводочної обробки поверхонь тертя від якої залежить термін подальшої експлуатації ДВЗ до ремонту та об'єм необхідних при цьому робіт [2]. Досягти високих результатів якості оброблених обкатуванням поверхонь неможливо, тому що при такій обробці зменшується запас на знос, а на поверхнях можуть виникати неконтрольовані негативні зміни.

Результати обкатуванням залежать від локальних параметрів і умов процесу таких як питомий тиск, температура і властивості мастила та матеріалу, шорсткість та відхилення форми і розташування поверхонь, геометричні параметри і властивості відходів обробки обкатуванням у вигляді твердих включень, які попадають у циркулююче мастило, а також різних випадкових факторів, які при цьому відбуваються. Обкатування збільшує зазор в спряженні, а таким чином зменшує гарантований запас на знос і ресурс. В результаті нерівномірності зазору відповідно перерозподіляється гідродинамічний тиск шару мастила, епюра тисків стає нерівномірною [3], що підвищує знос поверхонь. Окрім того з-за місцевої зміни товщини масляного шару і наявності у маслі твердих включень іноді можуть виникати місцеві підклинювання та непередбачені дефекти. Наприклад, на деяких ділянках поверхонь можуть приварюватися і стиратися або відламуватися тверді включення, які утворюють подряпини в напрямку відносного руху поверхонь та інші дефекти, що також зменшує ресурс валу. Деталі не підлягають контролю в технологічному процесі обкатування, як завершальної обробки, та виправленню дефектів після неї.

Як свідчить статистика, 80-85 % виходу з ладу машин відбувається з причини зношування вузлів та деталей. Подолання тертя поглинає 30-40 % всієї енергії, що виробляється [4]. Майже 40 % вироблюваного металу витрачається на заміну спрацьованих деталей, а не на виробництво нових.

На ресурс колінчастого валу впливають такі характеристики контактуючих поверхонь шийок валу і вкладишів: відхилення форми та їх розташування відносно осі валу, параметри шорсткості та механічні і фізико-хімічні властивості матеріалу поверхонь спряження.

Основними причинами виходу з ладу колінчастих валів є знос і задири шийок, які спостерігаються, наприклад, на всіх типах двигунів та компресорів незалежно від твердості шийок: 67,6% колінчастих валів, які поступають на відновлення, мають величини зносів і відхилень форми шийок менше допустимих. Однак ризики і кругові царапини мають 100% колінчастих валів [5].

На ресурс колінчастих валів дуже впливає технологія їх викінчувальної обробки. Окрім того поверхневий «активний» шар валу неоднорідний за механічними характеристиками і має складну будову [6]. На металевих поверхнях крім забруднень утворюються тонкі плівки молекул, адсорбованих з атмосфери, а також кисневі та інші плівки, які виникають в результаті хімічних реакцій поверхонь з навколишнім середовищем. Може виникати також капиллярна адгезія – притягання поверхонь.

Залежно від різних умов експлуатації і навантажень між поверхнями шийки валу і підшипника можуть виникати такі види тертя [7]:

- рідинне тертя з достатньою товщиною плівки масла між поверхнями тертя;
- сухе тертя, коли поверхні покриті твердими плівками, менш міцними, чим основний матеріал;
- граничне тертя, коли поверхні покриті рідкими плівками недостатньої товщини;
- змішані види тертя (напівсухе), коли в одних точках контакту виникає сухе тертя, а в других – граничне; напіврідинне, коли в одних точках контакту має місце граничне тертя, а в других – рідинне;
- зовнішнє тертя, коли поверхні безпосередньо дотикаються на ділянці контакту;
- внутрішнє (чистове) тертя, коли поверхні при дотику прихвачуються – зварюються і їх відносне подальше переміщення пошкоджує поверхні ковзання.

Дослідженням [2] встановлено, що несуча здібність масляної плівки залежить в основному від температури підшипника.

Температура, як відомо, залежить від коефіцієнту тертя, який забезпечується мінімальною шорсткістю поверхонь та іншими геометричними відхиленнями поверхонь, а також фізичними властивостями матеріалу контактуючих поверхонь. Тому дослідження та удосконалення методів отримання високої якості поверхонь тертя спряжень «шийки колінчастого валу – вкладиш» може збільшити цей ресурс спряження [9].

При певній швидкості відносного руху з-за безпосереднього тертя на виступах виділяється кількість тепла, яка не встигає відводитися. Ділянки поверхонь перегріваються, що і призводить до їх точкового плавлення, приварювання і навіть відриву частинок. Іноді бабітові підшипники навіть виплавлялися.

Наближення геометрії поверхонь вкладишів до валу в зоні тертя для попередження утворення ділянок підвищеного питомого тиску може значно зменшити знос спряжень. Таким чином підвищення геометричних і механічних характеристик поверхонь тертя та зменшення коефіцієнту тертя в процесі приробки поверхонь до експлуатації можуть значно підвищити ресурс колінчастого валу.

Аналіз останніх досліджень. В наступний час розвитку технологій обробки доцільність операції обкатування рухомих спряжень ставиться під сумнів [2, 35]. Її заміна спеціалізованими технологічними методами обробки може значно підвищити надійність і працездатність поверхонь тертя в багато разів.

За даними досліджень геометрична неоднорідність, тобто наявність поверхневого мікрорельєфу у вигляді хвилястості або шорсткості призводить до дискретного характеру

механічної взаємодії між поверхнями тертя. На плямах фактичного контакту виникають концентрації механічних напружень, які і призводять до прискорення зносу поверхневого шару. При деяких режимах і умовах виникає фрикційний контакт між плямами поверхонь [6].

Виступи мікронерівностей в умовах появи сухого тертя нагріваються і деформуються, в результаті виникають локальні зміни мікроструктури [10] на поверхнях тертя.

В процесі обкатування на виступах мікронерівностей перевищення питомого навантаження і температури вище певних границь може призводити також до прихвачування виступів до валу та утворення мікробибоїн на поверхні підшипника [11]. Можуть приварюватися і стиратися або відламуватися тверді включення, які утворюють подряпини в напрямку відносного руху поверхонь, виникало навіть повертання вкладишів відносно їх гнізд.

При механічній взаємодії поверхні стають більш реакційно здатними, що призводить до трибохімічних реакцій [10]. Вуглеводні мастила при температурі 80°C втрачають протизносні властивості з-за посилення десорбції поверхнево-активних речовин та зниження в'язкості. Тому найбільш раціональний стан в зонах дискретного контакту поверхонь досягається тоді, коли контактне навантаження розподіляється більш рівномірно і відсутні пікові напруження.

Встановлено, що від фінішної обробки деталей дизелів залежить не тільки початкова, а і наступна інтенсивність зношування при експлуатації [12]. Згладжування мікронерівностей (зменшення Ra , Rz , $Rmax$ та збільшення tp) зменшує коефіцієнт тертя та підвищує зносостійкість поверхонь [14]. Викінчувальна обробка поверхонь тертя повинна зменшувати висоту нерівностей профілю шорсткості, відхилення від правильності геометричної форми і розташування поверхонь та збільшувати відносну опорну довжину профілю шорсткості. При цьому зазор повинен наближатися до мінімального значення, яке б забезпечувало мінімальну товщину масляного шару для рідинного тертя. Така обробка збільшить дійсну площину поверхонь контакту між дотичними поверхнями, що зменшить питомий тиск між ними та дасть можливість поверхням тертя передавати і сприймати більші експлуатаційні навантаження. При експлуатації середньооберткових двигунів маневрових тепловозів часто виникають відкази з-за виходу з ладу підшипників колінчастого валу [15]. В роботі вказується, що температура мастила на корінних підшипниках досягає $94...97^{\circ}\text{C}$, а на шатунних $103...107^{\circ}\text{C}$.

Колінчасті вали часто працюють в особливо тяжких умовах [15], таких як пуск і зупинка, швидкий набір потужності, робота на малих обертах холодного ходу та ін. При таких умовах має місце режим граничного змащування, при якому масло на поверхнях тертя знаходиться у тільки вигляді адсорбованої плівки. Рухливість молекул різко падає, підвищується коефіцієнт тертя ковзання та виділення з-за цього теплоти.

По даним [15] надійність підшипникового вузла колінчастого валу з м'яким (бабітовим) антифрикційним підшипником дуже залежить від температури поверхонь тертя. Експлуатація середньооберткового дизеля з температурою масла на вході в нього вище 80°C недопустима з-за корозійного руйнування підшипника.

Важливу роль при цьому має зменшення зазору в підшипнику. Так виключення з технологічного процесу гіперболічної розточки вкладиша [15, 16] призводить до зменшення температури поверхонь тертя на $11...13^{\circ}\text{C}$. Пояснюється це тим, що підвищується гідродинамічний тиск масла в зазорі.

За принципом Шарпі мікроструктура підшипника ковзання повинна складатися з зносостійких твердих включень та м'якої основи, яка сприятиме релаксаційній зміні геометрії поверхні підшипника відповідно до погрішностей спряженого валу [17]. М'яка основа під дією значних місцевих питомих навантажень, викликаних погрішностями форми, розташування та іншими дефектами поверхні валу при цьому буде змінювати геометричну форму поверхні підшипника відповідно до діючих сил і питомий тиск на всіх ділянках

поверхні буде вирівнюватися. Рівномірний в певних межах питомий тиск буде сприяти нормальній роботі підшипника. Класичну будову за цим принципом має бабіт Б83.

На практиці ділянки контактної взаємодії, як правило, дискретні, тобто складаються з сукупності п'ятен контакту [6]. Фактичні тиски на п'ятнах контакту залежать від макро- і мікрогеометрії поверхонь. Самою розповсюдженою причиною дискретності є шорсткість контактуючих поверхонь.

Слід також відмітити, що з-за геометричних відхилень ділянки поверхонь підшипника на які діє високий питомий тиск швидко нагріваються. В бабіті, наприклад Б83, при температурі вище 110°C твердість зменшується [18], що може сприяти релаксації при достатньо високих місцевих питомих навантаженнях. При обкатуванні металеві частинки, які зрізаються з виступів шорсткості, попадають в мастило, втискаються і занурюються в м'яку основу вкладишів.

Дослідниками пропонуються різні методи підвищення геометричної якості поверхонь тертя для підвищення їх зносостійкості. Утворюють на поверхні підшипника тонкий поверхневий шар з міцністю менше основного матеріалу [19] виконують біметалізацію робочої поверхні тертя фрикційним латунюванням під впливом сил тертя з притиранням в робочій орієнтації [20], та ін.

Механічні характеристики поверхонь підвищують наприклад, нанесенням на поверхні твердих порошків плазмовим струменем газу високої температури. Але після цього необхідна механічна обробка твердої поверхні з неоднорідними геометрією та механічними властивостями.

Останнім часом приділяється увага створенню нових технологій зміцнення і підвищення зносостійкості поверхонь, за якими не здійснюється високий температурний вплив на відновлювану деталь і значно підвищується ресурс та довговічність двигунів і агрегатів спеціальної техніки [21, 35].

Кожен з приведених методів не є системним, тобто не сприяє одночасному підвищенню геометричних і механічних характеристик поверхонь та зменшенню коефіцієнта тертя.

Доведено, рідке штампування порівняно з литтям в кокіль та гарячим штампуванням має переваги обох способів: дозволяє отримати бездефектні, щільні заготовки з дрібнодисперсною мікроструктурою та забезпечує скорочення витрат матеріалу [13, 22, 23].

Постановка завдання. Метою наукової роботи є розробка і дослідження системного підвищення зносостійкості шийок і вкладишів колінчастого валу - рідкопластичним формуванням поверхонь та безтермічною нано-алмазно-дисульфідмолібденовою приробкою вкладишів до валу.

Виклад основного матеріалу. Для заливання вкладишів підшипників колінчастих валів тихохідних ДВЗ використовують бабіти Б83, Б83С, Б88, БК2, БН [17, 31]. Бабіти за структурою відповідають правилу Шарпі, тобто містять тверді включення, які забезпечують стабільність геометричних розмірів підшипника та м'яку основу, яка у початковий період роботи посилено зношується утворюючи на робочій поверхні вкладиша сітку капілярів по яких циркулює мастило. Бабіти відзначаються малою твердістю та малим коефіцієнтом тертя у парі зі сталлю, добре утримують на поверхні мастило. Олов'яні бабіти Б83, Б83С, Б88 порівняно з свинцевими мають вищу корозійну стійкість і теплопровідність, менший температурний коефіцієнт лінійного розширення, але зношують вал у 2...3 рази менше. Їх недоліками є низька робоча температура (до 120°C) та погані експлуатаційні властивості в умовах сухого тертя [17].

Олов'яні бабіти використовують також як підшипники відповідального призначення для парових турбін, турбокомпресорів, електродвигунів тощо.

Найбільш раціональний стан в зонах дискретного контакту поверхонь досягається тоді, коли контактне навантаження розподіляється більш рівномірно і відсутні пікові напруження. Для досягнення такого стану необхідне прироблення поверхонь деталей, але не обкатуванням, при якому виникають негативні явища, а на основі сучасних технологій доведення поверхонь. Перспективними є нанотехнології та інші, які можуть покращувати не

тільки геометричні характеристики поверхонь спряжень, а й склад та механічні властивості у тонкому поверхневому шарі матеріалу поверхонь. Однією з таких технологій є шаржування алмазними пастами.

Доводочна обробка спряжених поверхонь в підшипниках ковзання повинна зменшувати висоту нерівностей профілю шорсткості, відхилення від правильності геометричної форми і розташування поверхонь та збільшувати відносну опорну довжину профілю шорсткості при мінімальному зменшенні запасу на знос. Така обробка збільшить дійсну площину контакту між дотичними поверхнями, що зменшить питомий тиск між ними та дасть можливість передавати і сприймати більші експлуатаційні навантаження при збільшенні ресурсу роботи підшипника.

Ресурс роботи підшипника визначається часом його надійної роботи, що досягається при рідинному терті, тобто коли спряжені поверхні роз'єднані шаром мастила і тертя між металевими поверхнями замінюється тертям в мастильній рідині. Для забезпечення рідинного тертя необхідно, щоб поверхні спряжених деталей не зачіплювалися, тобто щоб шар мастила не мав розривів. Це можливо, коли найменша товщина утворюваного масляного шару h_{min} (рис.1, а) буде відповідати умові [24]

$$h_{min} \geq h_{p.m} \geq Rz_1 + Rz_2 + \Delta_\phi + \Delta_p + \Delta_{def} + \Delta_\delta, \quad (1)$$

де $h_{p.m}$ – товщина масляного шару, при якому забезпечується рідинне тертя;

Rz_1, Rz_2 - висоти нерівностей спряжених поверхонь;

Δ_ϕ, Δ_p – погрішності форми і розташування спряжених поверхонь;

Δ_{def} – величина, яка враховує вплив деформацій деталей підшипникового вузла при його роботі;

Δ_δ - добавка, яка враховує відхилення навантаження, швидкості, температури від розрахункових, а також механічні включення в маслі та інші невраховані фактори.

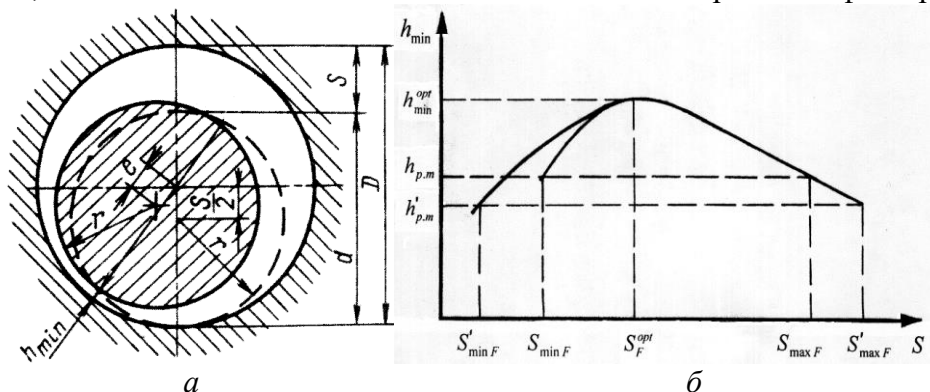


Рис. 1 Найменша товщина масляного шару h_{min} на схемі підшипника (а) та характер її залежності від зазору S в процесі зносу підшипника (б)

На найменшу товщину масляного шару h_{min} на ділянці максимального зближення спряжених поверхонь при сталому режимі роботи підшипника впливає величина діаметрального зазору S (рис. 1, б). Після звичайної технології обробки в процесі зносу підшипника, тобто при збільшенні функціонального зазору від мінімального $S_{min F}$ до максимального значення $S_{max F}$ товщина масляного шару h_{min} спочатку швидко збільшується, а після досягнення максимального значення поступово зменшується з-за збільшення амплітуди коливань валу в отворі підшипника. Рідинне тертя можливе тільки в певному діапазоні функціональних діаметральних зазорів, наприклад, від $S_{min F}$ до $S_{max F}$, які визначаються за такими формулами [24]

$$S_{min F} = \frac{k\mu_1 \omega d^2 - \sqrt{(k\mu_1 \omega d^2)^2 - 16ph_{p.m}^2 m\mu_1 \omega d^2}}{4ph_{p.m}} \text{ мкм}, \quad (2)$$

$$S_{\max F} = \frac{k\mu_2\omega d^2 + \sqrt{(k\mu_2\omega d^2)^2 - 16ph_{p,m}^2 m\mu_2\omega d^2}}{4ph_{p,m}} \text{ МКМ}; \quad (3)$$

де k і m – коефіцієнти постійні для даного значення відношення довжини підшипника l до діаметру валу d ;

μ_1, μ_2 – динамічна в'язкість мастила, в умовах роботи підшипника відповідно при мінімальному та максимальному функціональних зазорах, Па·с;

ω – кутова швидкість, рад/с;

p – середній тиск на одиницю площі проекції опорної поверхні підшипника, Н/м².

В числі цих факторів – частота обертання валу n . З приведених формул (1, 2, 3) слідує, що при зменшенні n зменшуються відповідно величини $S_{\min F}$ і $S_{\max F}$, які розраховані для числа обертів валу, яке відповідає нормальній функції виробу. В процесі роботи виробу зазор S є постійною величиною, яка поступово змінюється тільки в більшу сторону в процесі зносу поверхонь тертя, в тому числі при обкатуванні. Таким чином при збільшенні числа обертів валу від нуля до мінімального функціонального значення або навпаки, при зменшенні в цьому ж інтервалі, робота підшипника не відповідає умовам рідинного тертя.

З формул (2) і (3) та характеру залежності (рис. 1, б) $h_{\min} = f(S)$ видно, що при зменшенні $h_{p,m}$ найменший функціональний зазор $S_{\min F}$ зменшується (2), а найбільший – $S_{\max F}$ збільшується (3). Тобто геометрія поверхонь має значний вплив на довговічність посадки з зазором і для збільшення ресурсу підшипника можна розширити інтервал $S_{\max F} - S_{\min F}$ до $S'_{\max F} - S'_{\min F}$ за рахунок зменшення геометричних погрешностей: $R_{z1}, R_{z2}, \Delta\phi, \Delta p$ та зниження таким чином $h_{p,m}$ до значення $h'_{p,m}$.

З-за розширення інтервалу функціональних зазорів збільшиться запас на знос, а з-за зменшення геометричних відхилень і шорсткості поверхонь зменшаться також інтенсивність зносу до S_{opt} та коефіцієнт тертя, що значно збільшить ресурс роботи спряження. $h_{p,m}$. Це підтверджується результатами багатьох експериментальних досліджень [14, 32, 33].

Таким чином аналіз формул (1, 2, 3) показує, що зменшення числа обертів валу потребує зменшення і функціонального зазору, що в реальних умовах можливо тільки на стадії виготовлення, обробки та приробки поверхонь валу і вкладишів.

На рис. 2 приведені криві інтенсивності збільшення зазору S в спряженні протягом часу роботи τ . Верхня крива відповідає сталому режиму роботи спряження, який включає час на обкатування [2]. Крива збільшення зазору має три явно виражені ділянки часу: початкова до $\tau_{обк}$, яка характеризує процес прироблення спряження в процесі обкатування; проміжна ділянка $\tau_{обк} - \tau$, яка найбільша по тривалості і відповідає періоду нормальної роботи з'єднання; кінцева більше τ , яка відповідає періоду руйнування з'єднання унаслідок зношення його понад допустимої границі.

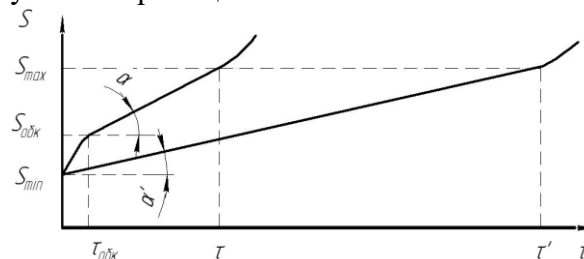


Рис. 2 Інтенсивність збільшення зазору (S) в спряженні протягом часу (τ)

Початковий період роботи спряження $\tau_{обк}$ характеризується інтенсивним зношуванням за порівняно малий період часу - це час прироблення деталей. Зношування у цей період в основному залежить від технологій обробки поверхонь.

Зменшити знос у цей період або навіть виключити його можна притиранням поверхонь після фінішної обробки. Це сприятиме комплексному зменшенню всіх геометричних

відхилень, а таким чином збільшить ресурс валу. Ділянка періоду нормальної роботи з'єднання і тривалість роботи спряження τ значно збільшиться тому що при тих же механічних характеристиках поверхонь цей період почнеться не з зазору $S_{обк}$, а з S_{min} . В результаті ресурс підшипника значно збільшиться.

Слід відмітити, що зрізані вершини виступів шорсткості сталюого валу у вигляді включень втискуються тільки в поверхню бабітового вкладишу. Включення можуть розривати масляну плівку, в результаті тертя приварюватися до поверхні валу, а потім відриватися від неї з мікрочастинками валу. Усунення обкатування з утворенням вільних включень явища сприятиме збереженню поверхонь спряження від пошкоджень в результаті прихвачувань.

Таким чином підгонка геометрії поверхонь спряження притиранням, яка усуває погрішності обробки виконаної за принципом взаємозамінності може значно збільшити термін роботи валу. Окрім того притирання збільшує опорну довжину профілю, що дозволяє збільшити несучу здатність шийок валу [2, 24].

Наступним етапом системного підходу до збільшення ресурсу підшипника є підвищення зносостійкості зміною властивостей матеріалу в контактуючих поверхневих шарах спряження та зменшення коефіцієнту тертя.

На рис. 1 нижня крива показує, що при підвищенні зносостійкості поверхонь та зменшенні коефіцієнту тертя зменшується інтенсивність збільшення зазору в процесі нормальної роботи спряження, що характеризується кутом $\alpha' < \alpha$. В результаті час роботи спряження значно збільшується, від τ до τ' .

Важливим фактором підвищення зносостійкості і зменшення коефіцієнту тертя є збільшення твердості контактуючих поверхонь та утворення на них тонкого шару твердого мастила, що попереджує можливість фрикційного ефекту при розриві масляного шару.

Існують різні методи підвищення твердості поверхневого шару валів, наприклад, плазмове напилювання поверхні валів порошковими матеріалами, що мають високу твердість. [34]. Були спроби насичення таким же методом самого твердого – алмазного порошку, але це не дало результатів. Дослідження показали, що алмазні порошки не можливо наносити методами високотемпературного напилення, тому що при температурах вище 1000°C вони графітизуються, а в плазмовому потоці окислювального струменя повністю вигоряють.

Відома властивість алмазного порошку насичувати поверхні металевих деталей методом шаржування. Використовують шаржування при виготовленні алмазних притирів. Запатентований метод алмазного шаржування для зменшення коефіцієнту тертя при виготовленні отворів дорнуванням у деталях з титанових сплавів [35]. Результати досліджень показують, що використання сумішей з алмазною пастою для доведення поверхонь тертя сталюих деталей паливної апаратури дизельних двигунів підвищує їх несучу здібність на 30...35%, зменшує коефіцієнт тертя на 30% та підвищує їх довговічність при роботі в середовищі дизельного палива [36].

З цього виходить, що найбільш придатним для насичення поверхонь алмазними порошками є метод шаржування. Алмазним шаржуванням можна насичувати як бабітові так і сталюі поверхні тертя, в результаті чого підвищується зносостійкість не тільки валу, а й підшипника [2]. Нано-частинки алмазу мають розмір, ближчий до структурних складових, та у відзнаку від продуктів зносу (сталюих частинок зносу) насичують обидві поверхні спряження. Ці частинки, порівняно зі сталюими, не мають властивості прихвачуватися приварюванням до поверхні валу, не реагують з навколишнім середовищем. Вони втискуються в поверхні, підвищуючи не тільки їх зносостійкість, а й зменшуючи коефіцієнт тертя. Поверхні виступів алмазних частинок при розриві масляної плівки в умовах сухого тертя перетворюються в графіт і таким чином також попереджують виникнення задирів та зменшують коефіцієнт тертя.

Слід відзначити, що дрібнодисперсні нано-алмазні частинки (рис. 3) [28] виключають прихвачування до валу і утворення задирок на поверхнях тертя та мають високу теплопровідність.

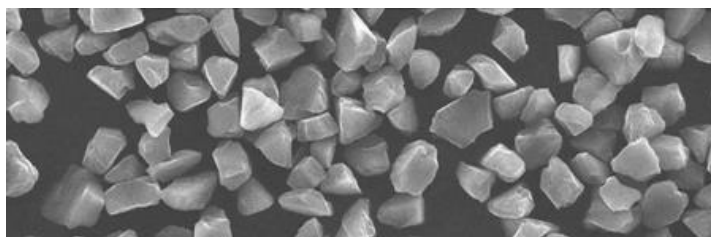


Рис. 3 Дрібнодисперсні нано-алмазні частинки

Експериментально доведено, що алмазні нано-частинки між поверхнями тертя суміші з мастилом можуть діяти як шарики у підшипниках кочення і таким чином теж зменшувати коефіцієнт тертя [30]. Тому нано-алмазні порошки у невеликій кількості іноді навіть вводять у присадки до масел для підвищення зносостійкості.

Додавання при шаржуванні дисульфиду молібдену, що має здатність утримуватися на поверхнях тертя, дозволяє значно зменшити коефіцієнт тертя [14]. Дисульфід молібдену MoS_2 відомий як тверде мастило: зменшує коефіцієнт тертя; попереджує утворення в парах тертя задирів і прихватів навіть при ударних навантаженнях та температурах до 400°C ; має високу адгезію до металевих поверхонь, утворюючи на поверхнях тертя захисний шар; заповнює мікровпадини шорсткості, підсилюючи цим опірність до навантажень.

На рис. 4 приведена молекулярна модель будови дисульфиду молібдена у вигляді пластинчастих кристалів [29]. На гранях кристалів розташовані активні центри, які являють собою атом молібдена, розташований у вершині трьох рівнобедрених трикутників, основою кожного з яких є два атоми сірки (виділено). При цьому атоми молібдену знаходяться між двома шарами атомів сірки. Тому в умовах тертя пластинчасті кристали вільно рухаються відносно один одного, що призводить до високого змащувального ефекту.

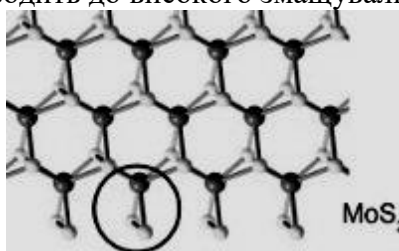


Рис. 4 Молекулярна модель будови дисульфиду молібдена:
темні складові – атоми молібдену; світлі складові – атоми сірки

Доведено, що в процесі шаржування алмазною пастою змінюється мікрорельєф і механічні властивості поверхонь спряження. Мікронерівності округлюються, їх висота зменшується (рис.5) відповідно до кратності притирань [30].

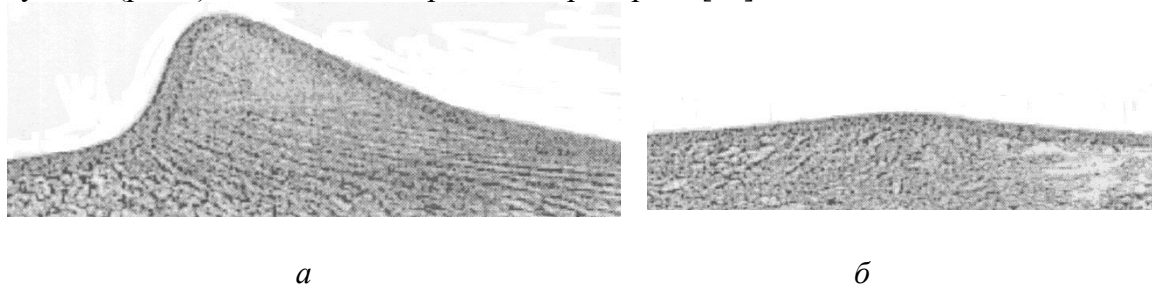


Рис. 5 Мікрорельєф поверхні після нано-алмазного притирання:

a – однократного; *б* – багатократного

Окрім того у процесі шаржування алмазною пастою в суміші з дисульфідом молібдену та мастилом при стиснутих поверхнях спряження виникає розддрібнення алмазних частинок до нано-розмірів та їх шаржування в обидві поверхні. Утворюється зміцнена наклепана зона,

насичена зануреними твердими алмазними включеннями. Поверхні обох деталей спряження стають полірованими з дисульфід-молібденовим покриттям і поверхневим шаром спряжень зміцненим нано-алмазними включеннями за принципом «Шарпі».

Нано-алмазні включення поверхневого шару є діелектриками, мають малу реакційну здатність, а тому виключають можливість адсорбції поверхнево-активних речовин працюючими поверхнями і таким чином служать нейтралізаторами “водневого зносу”.

Перед шаржуванням для підгонки поверхонь тертя бабітових вкладишів до геометричних параметрів полірованих шийок валу пропонується використовувати метод напіврідкого формоутворення робочої поверхні вкладишів полірованим валом таким чином [19].

Вкладиші виготовляються з припуском на величину осадки, яка необхідна для індивідуальної підгонки притиранням з одночасним шаржуванням геометричної форми поверхні кожної пари вкладишів до відповідної шийки валу. Після складання з натягом роз’ємної головки шатуна з валом бабіт підшипника переводиться у напіврідкий стан підігріванням головки. Формоутворення робочої поверхні вкладиша виконується поступовим затягуванням болтів кришок підшипника. При цьому поверхні вкладишів відтворюють форму поверхні шийки попередньо полірованого валу – ліквідуються відхилення форми робочої поверхні і її розташування відносно поверхні валу.

Окрім геометричної форми поверхні цим способом можна скорегувати дійсний лінійний розмір замикаючої ланки кривошипно-шатунного механізму компресора або двигуна (відстань від торця поршня до торця головки циліндрів), що дуже важливо для отримання їх заданих експлуатаційних характеристик.

В процесі напіврідкого пластичного формування обробкою тиском вкладишів можна зменшити погіршеність дійсного розміру замикаючої ланки зміщенням осі нижньої головки шатуна відносно осі шийки валу за допомогою спеціального пристосування фіксуючого поршень в заданому положенні.

На технологічний процес формування та отримувану посадку спряження вкладишів з валом впливають температури сплаву, валу та корпусу підшипника.

Щоб визначити температуру нагрівання сплаву до рідкопластичного стану проаналізуємо перетворення в одному з бабітів при кристалізації та плавленні [35].

Найкращий з бабітів - Б83 є сплавом олова (83%Sn) із сурмою (10...12%Sb) та міддю (5,5...6,5%Cu), температура його розплавлення 380°C [25]. У процесі кристалізації практично вся мідь при найвищій температурі утворює з оловом тверду інтерметалічну сполуку Cu_3Sn у формі каркасу з зірочок та ланцюжків, які далі попереджують ліквідацію за питомою вагою (рис.6). Утворюючи Cu_3Sn мідь зв’язує 3,75%Sb (рис. 7). Якщо привести залишок рідини L до 100%, то в рідині залишається 12,2% Sb. Подальшу кристалізацію сплаву, який містить 12,2% Sb можна розглядати за діаграмою подвійної системи Sn-Sb (рис. 6, критичні точки 1 і 2).

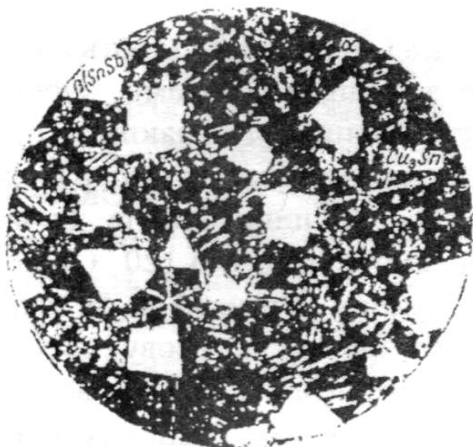


Рис. 6 Мікроструктура бабіту Б83

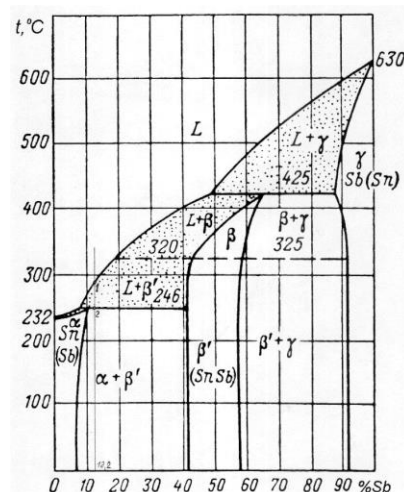


Рис. 7 Діаграма стану системи Sn-Sb

В точці 1 утворюються центри кристалізації фази β' , з яких при охолодженні сплаву до точки 2 ростуть тверді включення SnSb кубічної форми при зменшенні вмісту Sb в рідині. В точці 2 залишок рідини має близько 8,5%Sb і в процесі перитектичного перетворення утворює механічну суміш, яка складається з м'якої основи - твердого розчину α та твердих включень β' .

В процесі нагрівання відбувається зворотній процес. При температурі 246°C (точка 2) плавиться твердий розчин α та незначна кількість β' , що складає близько 30% всього сплаву. Решта сплаву, каркас з Cu_3Sn та кубічні включення SnSb знаходяться в твердому стані. При подальшому нагріванні до температури 285°C (точка 1) кубічні включення поступово зменшуються і повністю розплавлюються.

Враховуючи, що якість бабіту покращується при роздрібненні твердих включень, можна рекомендувати температуру для напіврідкого деформування в межах 250...270°C, при якій зберігається каркас з Cu_3Sn . Охолодження від цих температур буде сприяти отриманню дрібних кубічних включень.

Від вибору деталі - валу або корпусу підшипника, яка нагрівається або різниці їх температур, залежить характер отриманого з'єднання – від посадки з зазором (нагрівається вал - оправка) до посадки з натягом (нагрівається головка шатуна).

Так, в дослідях, при нагріванні головки шатуна в процесі формування геометрії вкладишів на оправці після охолодження у з'єднанні утворювався натяг, величина якого використовувалася як припуск на внутрішній діаметр вкладишів для їх притирання до шийки валу. Це дозволило отримати мінімальний зазор в спряженні та зменшити шорсткість поверхонь.

Після формування поверхонь вкладишів виконувалось їх притирання безпосередньо до полірованої поверхні колінчастого валу дрібнодисперсною нано-алмазною пастою у суміші з мастилом, яке містить дисульфід молібдену, при обертанні валу і легко затиснутої болтами шатунної кришки підшипника. Кришка періодично підтягувалася до повного затягнення і легкого обертання валу в шатунній шийці. Потім поверхні спряження промивалися бензином і змащувалися мастилом з дисульфідом перед складанням.

Слід відзначити, що в компресорах і двигунах з від'ємним картером операції рідкопластичного формування і притирання краще виконувати на кривошипно-шатунному механізмі змонтованому з поршнями в блоці циліндрів. Це дозволяє звести до мінімуму відхилення від паралельності верхньої і нижньої головок шатуна та за допомогою простого пристосування відрегулювати верхнє положення поршня в в двигуні або компресорі.

Експериментальне випробування проводилося на автомобільному повітряному двоциліндровому компресорі ЗИЛ 431410 – (130). Шаржування поверхонь спряжень шийок колінчастого валу і вкладишів виконувалась сумішню алмазної пасті АСМ 7/5 ГОСТ 25593-83 і дисульфиду молібдену ДМИ-7 ТУ 48-19-133-90 з мастилом [35]. Для шаржування вкладиші виготовлялися з припуском, який забезпечував посадку з натягом перед шаржуванням. Процес шаржування проводився при обертанні валу в компресорі без головки циліндрів і кришки піддону на спеціальному пристосуванні, обладнаному електродвигуном і редуктором. Суміш алмазної пасті і мастила з дисульфідом молібдену наносилася на поверхні шийок валу і вкладишів нижньої головки шатунів. Кришки головок шатунів затягувалися до утворення невеликого натягу, який забезпечував процес прироблення і одночасного шаржування поверхонь при обертанні валу з частотою $1...2\text{с}^{-1}$ до повного зникнення натягу. Далі кришки шатунів знімалися, повторно покривалися сумішню, підтягувалися і повторно притиралися. Процес повторювався до повного затягування кришок і усунення натягу, після чого деталі промивалися, змащувалися мастилом з дисульфідом молібдену, перевірялися на відсутність натягу і складалися. Після такої обробки шатуни повинні легко обертатися на шийках валу.

Притирання за такою технологією дозволило окрім шаржування отримати мінімальний зазор в спряженнях та згладити шорсткість поверхонь. Після такої доводочної обробки

компресор був випробуваний при роботі в умовах високих навантажень, при ступеню стискання 6...12. Після близько 2000 годин експлуатації були перевірені поверхні спряжень “підшипник нижньої головки шатуна - шатунна шийка колінчастого валу”. На поверхнях шийок валу і підшипника слідів зносу, прихвачувань та інших пошкоджень виявлено не було, шийка валу оставалась полірованою, а поверхня вкладишів не мала занурених включень продуктів зносу.

Пояснити отриману беззносність поверхонь можна тим, що при алмазному шаржуванні тверді алмазні частинки спроможні проникати в поверхні як вкладишів і так валу, що підвищує зносостійкість не тільки вкладишів, а й валу. У відзнаку від такого шаржування при обкатуванні утворювані продукти зносу проникають тільки в поверхню вкладишів, що приблизно в два рази збільшує знос валу порівняно з вкладишами [26]. Окрім того алмазні частинки при зануренні під дією механічного втискування орієнтуються відповідно до поверхонь дотику [35].

Така доводочна обробка спряження наближає геометрію поверхні підшипника до поверхні полірованого валу, згладжує виступи шорсткості та підвищує механічні властивості контактуючих поверхневих шарів підшипника і валу утворенням в їх структурі алмазних включень. Це зменшує коефіцієнт тертя, збільшує запас на знос та зносостійкість поверхонь, тобто підвищує ресурс роботи спряження у відміні від обкатування.

Аналогічна обробка може виконуватися при ремонті бронзових вкладишів компресорів та швидкохідних дизелів після накатування та послідовного наплавлення бабітом [26]. Такі бронзо-бабітові вкладиші добре відводять тепло, не виплавляються при перегріві підшипника і одночасно мають переваги бабітових вкладишів перед бронзовими за корозійною стійкістю та за податливістю у вигляді релаксаційних змін форми ділянок поверхні вкладишу при дії локальних напружень, які перевищують допустимі.

Занурення твердих включень та зміни деяких ділянок форми поверхні вкладишу відповідно до форми валу сприяють вирівнюванню і зменшенню максимальних місцевих тисків на поверхні, а таким чином збільшують ресурс спряжених деталей.

Висновки. Рідкопластичне формування поверхні бабітових вкладишів полірованою поверхнею валу з отриманням припуску на притирання з шаржуванням дозволить максимально наблизити геометричні параметри поверхні вкладишів у вигляді заготовок до відповідних параметрів шийки валу. Обробка спряжених поверхонь притиранням з одночасним шаржуванням нано-алмазно-дисульфідмолібденовою сумішшю дозволить:

- підвищити геометричну якість поверхонь тертя (зменшити шорсткість та відхилення форми і розташування поверхонь, збільшити опорну довжину профілю шорсткості);
- зменшити коефіцієнт тертя з-за наявності на поверхні твердого мастила – дисульфиду молібдена, а в поверхневому шарі занурених і прироблених алмазних зерен. Це знизить температуру контактуючих робочих поверхонь та зменшить механічні втрати енергії на тертя;
- підвищити твердість і зносостійкість поверхонь тертя з-за наявності в мікроструктурі поверхні нано-алмазних складових;
- отримати в поверхнях тертя однорідні зносостійкі нано-алмазні структурні складові, вершини яких в екстремальних умовах (при 1000°C) перетворюються в графіт, а тому поверхні не прихвачуються, а утворений графіт служить високотемпературним твердим мастилом. В результаті зменшується коефіцієнт тертя, а поверхні за геометричною формою вигладжуються і приробляються одна до другої;
- підвищити хімічну стійкість і теплопровідність поверхонь вкладишів;
- колінчастий вал не потребує гартування поверхонь тертя, а тому не потребує правки після чистової обробки.

Таким чином рідкопластичне формування поверхні заготовок бабітових вкладишів та наноалмазне, в суміші дисульфідмолібденовим мастилом, насичення поверхонь валу і вкладишів шаржуванням при стиску поверхонь спряження може значно збільшити

зносоустійкість колінчастих валів двигунів внутрішнього згорання, компресорів та ін. машин, а тому є перспективним.

Список використаних джерел

1. Сергеев Д.И. Техническая эксплуатация судовых дизелей. – М.: Транспорт, 1969. – 176 с.
2. Ошовський В.Я. Виробничі технології як альтернатива обкатування деталей ДВЗ // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград: КНТУ, 2013. – Вип. 43, ч. 1. - С.320-325.
3. Лобанов В. К., Чуйкова Е. В. Материаловедческие аспекты выбора технологии изготовления поршней ДВС // Вестник ХНАДУ. 2009. №46.
4. Шимчук С.П. Метод дослідження протизносних властивостей мастильних матеріалів при радіальних коливаннях валу: Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук Київ – 2008. 6с.
5. Леонтьев Л.Б., Шапкин Н.П., Леонтьев А.Л., Токликишвили А.Г. Исследование влияния состава триботехнических материалов на эксплуатационные свойства сопряжения «вкладыш – шейка коленчатого вала» // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-4. – С. 735-739.
6. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. – М.: Наука, 2001. – 478с.
7. Крагельский И. В., Виноградова И. Э. Коэффициенты трения: справ. пособие. - М.: Машгиз, 1962. - 220 с.
8. Андрусенко О. Е., Матвеев Ю. И. Требования к материалам антифрикционного слоя, используемым при восстановлении подшипников скольжения коленчатых валов // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. 2009. №1. С.50-55.
9. Ошовський В.Я., Григурко І.О., Капура І.А. Рідкопластичне формування поверхонь бабітових вкладишів // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загально державний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград: КНТУ, 2014. – Випуск 44. - С.248-251.
10. Шевеля В.В., Олександренко В.П. Трибохимия и реология износостойкости: Монография. – Хмельницкий: ХНТУ, 2006. – 278 с.
11. Алиев А.А., Булгаков В.П., Приходько Б.С. Качество поверхности и свойства деталей машин // Вестник АГТУ. 2004. №1. - С.8-12.
12. Коченов В. А. Конструирование приработанных трибосопряжений двигателей внутреннего сгорания / Коченов В. А., Казаков С. С. // Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология. - 2010. - №2. - С. 134-138.
13. Батышев А.И. Совмещенные способы литья и прессования. - М., 1971.
14. Цветков Ю.Н., Тарасов В.М. Повышение эффективности дизелей нанесением на поршни твердого смазочного покрытия, содержащего дисульфид молибдена // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова . 2010. №1 (5). С.45-52.
15. Чуфистов Е. А., Родайкин Н. В., Чуфистов О. Е. Конструкторско-технологическое повышение надежности подшипниковых узлов коленчатых валов среднеоборотных дизельных двигателей // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Технические науки. 2009. №2. С.156-165.
16. Родайкин, Н. В. Экспериментальное исследование влияния температур масла на работоспособность подшипников коленчатого вала среднеоборотного дизеля / Н. В. Родайкин, Е. А. Чуфистов // Современные технологии в машиностроении : сборник статей XII Международной научно-практической конференции. - Пенза : Приволжский Дом знаний, 2008. - С. 213-216.

- 17.Металознавство: Підручник / О.М. Бялик, В.С.Черненко, В.М.Писаренко, Ю.Н.Москаленко. - 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: ІВЦ “Видавництво “Політехніка””, 2002. – 384 с.
- 18.Дизели: справочник / В.А.Ваншейдт, Н.Н.Иванченко, Л.К.Коллерова. – 3-е изд. перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1977. – 480 с.
- 19.Гаркунов Д.Н. Триботехника. Износ и безызносность. 4-е изд. М.:МСХА, 2001.616с.
- 20.Паніна В.В., Дашивець Г.І. Підвищення зносостійкості гільз циліндрів двигунів / Науковий вісник ТДАТУ; Випуск 4, Том 1. – С.115-120.
- 21.Ткачук М.А., Кравченко С.О., Шпаковский В.В., Белов М.Л., Шейко О.І., Демиденко В.І., Д’яченко С.С., Посвятенко Е.К., Гончаров В.Г. Развитие методів зміцнення найбільш навантажених деталей □ шлях до підвищення технічних і тактико-технічних характеристик машин // Транспортне машинобудування; Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. №43 (1152). С. 116-122.
- 22.Лобанов В. К., Чуйкова Е. В. Материаловедческие аспекты выбора технологии изготовления поршней ДВС // Вестник ХНАДУ. 2009. №46.
- 23.Сергеев П.С. Штамповка жидких цветных металлов и сплавов. - Л.: Судпромгиз, 1957.
- 24.Якушев А.И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения: Учебник. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. - 343 с.
- 25.Гуляев А.П. Металловедение. – М.: Металлургия, 1978. – 648 с.
- 26.Воронцов И.А. и др. Технология ремонта быстроходных дизелей (типа В2-300 и Д6). – М.: Машиностроение, 1961. – 468 с.
- 27.Рохлін А.Г. Технология производства судовых дизелей. – Л.: Судостроение, 1968. – 344 с.
- 28.Nano промышленные алмазные шлифовальные абразивные порошки. – Електронний ресурс: <https://russian.alibaba.com/product-detail/nano-industrial-diamond-polishing-abrasive-powder-1470828287.html>
- 29.Молекулярная модель дисульфида молибдена / Химия: новости науки.- Електронний ресурс: <http://www.chemport.ru>
- 30.Барышников С.О. Нанотехнологии и работа двигателей внутреннего сгорания (постановка эксперимента) // Журнал университета водных коммуникаций. 2009. №3. - С. 33-42.
- 31.Двигатели внутреннего сгорания: Конструирование и расчёт на прочность поршневых и комбинированных двигателей /Под ред. А.С.Орлина, М.Г.Круглова. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.
- 32.Тарельник В.Б., Марцинковский В.С., Дзюба А.В. Новый способ улучшения прирабатываемости пары трения «вкладыш подшипника – шейка вала» // Компрессорное и энергетическое машиностроение, 2013. - №1(31). - С. 49-53.
- 33.Черноиванов В.И., Голубев И.Г. Восстановление деталей машин: Состояние и перспективы. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 376 с.
- 34.Кобяков О.С., Спиридонов Н.В. Исследование процессов формирования и триботехнических свойств износостойких композиционных газотермических покрытий, дисперсно-упрочнённых синтетическими алмазами и электрокорундом // Вестник БНТУ. – 2011. - №2. – С. 17-23.
- 35.Ошовський В.Я. Підвищення ресурсу колінчастого валу алмазно-дисульфідмолибденовою приробкою поверхонь тертя // Загально державний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, вип 46. – Кіровоград: КНТУ, 2016. – С. 279-286
- 36.Рыжов Ю.Э. Применение активной СОТС в доводочных пастах и финишной алмазно-абразивной обработке // Качество машин: Сб.трудов IV Междунар.науч.-техн.конф. Брянск, 2001. - 4.2. - С.118-120.