

Ткачук М. А., д-р техн. наук; Субботіна В.В., д-р техн. наук; Ткачук М. М., д-р техн. наук; Грабовський А. В., д-р. техн. наук; Кравченко С. О., д-р. техн. наук; Васильєв А. Ю., канд. техн. наук; Сериков В. І., канд. техн. наук; Кохановська О. В.; Леценко В. М.

РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОВЕРХОНЬ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ: ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОГО ЗМІЦНЕННЯ

Вступ. Проблема створення високонадійної цивільної і військової техніки та забезпечення її високих технічних і тактико-технічних характеристик при використанні найменш витратних, енергоефективних та екологічно безпечних методів виробництва і обробки, безумовно, є дуже важливою для України та інших країн. Як відомо, значна частина машинобудівних конструкцій працює у важких умовах одночасної дії багатьох чинників – високих і неоднорідно розподілених напружень, циклічних навантажень, що викликають втому матеріалу виробу; важливі також і такі чинники як підвищені та високі температури, наявність тертя, результатом якого є зношування контактуючих поверхонь, вплив агресивного середовища тощо. У зв'язку з цим при їх виготовленні необхідний пошук таких технологій, які би дали можливість задовольнити якщо не всі, то принаймні найважливіші вимоги до характеристик матеріалу. Зокрема, гостро стоїть питання підвищення ресурсу транспортної військової та цивільної техніки, яке у першу чергу впирається у збільшення довговічності двигунів та інших визначальних елементів їх конструкцій.

За статистикою двигуни транспортних засобів мають досить обмежений термін служби, що призводить до величезних збитків. Однією з основних причин їх недостатньої довговічності є, наприклад, зношування шийок колінчастих валів. Матеріальні втрати внаслідок тертя і зношування в машинобудуванні розвинених держав досягають 4–5 % національного доходу. Згідно з відомими даними, опір тертю поглинає в усьому світі 30–40 % енергії, що виробляється протягом року. Витрати на ремонт і технічне обслуговування машин іноді в кілька разів перевищують їх вартість. Двигуни транспортної техніки за весь термін служби ремонтують до 5 разів. Ресурс двигуна після ремонту порівняно з ресурсом нового двигуна складає 30–50 %, хоча за технічними умовами повинен бути не нижче 80 %. Як показує практика, близько 75 % деталей після розбирання агрегатів, які надійшли в капітальний ремонт, мають великий залишковий ресурс і можуть бути використані повторно після відновлення з витратами, які не перевищують 40–60 % вартості нових деталей.

Отже, проблема підвищення зносостійкості деталей транспортних засобів та трибосистем в цілому є актуальною і вимагає всебічного підходу і вивчення. При цьому технологічний процес виготовлення, ремонту і відновлення деталі (агрегату) передбачає не тільки досягнення необхідних геометричних параметрів, але і, головним чином, усунення або уповільнення руйнівних процесів, які природно протікають на поверхні деталі. Тому при досить великій кількості способів актуальною проблемою досі є пошук нових ефективних технологій, що забезпечують підвищення ресурсу робочих поверхонь.

Вирішення цієї проблеми дасть можливість значно підвищити надійність, технічні та тактико-технічні характеристики форсованих двигунів, військової та цивільної техніки

і взагалі забезпечити конкурентоспроможність машинобудівної продукції України на світовому ринку.

У роботі на розвиток результатів [1-4] описана розробка науково-технічних основ підвищення ресурсу та забезпечення високої надійності, довговічності, технічних та тактико-технічних характеристик форсованих двигунів, деталей і вузлів військової та цивільної техніки за рахунок дискретно-континуального зміцнення.

1 Розроблення технології формування зносостійких поверхонь металевих виробів – дискретно-континуального зміцнення.

1.1 Аналіз впливу ресурсу колінчастого вала на строк служби двигунів транспортної техніки.

Відмови деталей транспортної техніки при нормальних умовах експлуатації відбуваються внаслідок різних видів зношування, корозії, ерозії, кавітації, старіння матеріалу тощо.

Сучасний стан теорії робочих процесів машин, наявність досконалої експериментальної техніки для визначення робочих навантажень і високий рівень розвитку прикладної теорії пружності при існуючих уявленнях про фізико-механічні властивості матеріалів дають можливість забезпечити достатню міцність деталей машин у нормальних умовах експлуатації. У той же час найбільш поширеною причиною відмов транспортних засобів та їх виходу з ладу є не поломка, а зношування і пошкодження робочих поверхонь. Так, практика експлуатації машин і досвід свідчать про те, що в 80 випадках із 100 вони виходять з ладу через відмови вузлів тертя, пов'язаних із зношуванням.

Основні техніко-економічні показники двигунів транспортних засобів, що експлуатуються в Україні, як правило, знаходяться на рівні більшості зарубіжних аналогів. Ресурс до першого капітального ремонту, встановлений заводом-виробником, повинен становити 8000-9000 годин. Тобто при середньорічному напрацюванні 1000 годин двигун повинен працювати без капітального ремонту 8–9 років. Цей термін практично дорівнює амортизаційному терміну служби транспортної техніки, тобто нормативним по надійності. Однак, в реальних умовах експлуатації потужнісно-економічні показники двигунів значно гірші. Зокрема, фактичні середні напрацювання до ремонту для двигунів КамАЗ-740 становлять 110-160 тис. км, а між ремонтами - 50-70 тис. км, хоча ГОСТ 23465-79 встановлює їх ресурс до капітального ремонту не менше 350 тис. км для двигунів із робочим об'ємом до 11 л і 200 тис. км - для двигунів сільськогосподарського призначення такого ж об'єму. Таким чином, напрацювання двигунів до ремонту істотно нижче нормативного.

Характер розподілу відмов нових і відремонтованих двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) із ростом напрацювання показує, що найбільша їх інтенсивність спостерігається в початковий період експлуатації. Збільшення відмов відзначено при напрацюваннях 100-300 год., а потім спостерігається зниження їх кількості (рис. 1).

Для нових двигунів це пояснюється недосконалістю технології їх виготовлення, зокрема неправильним вибором зміцнювальних операцій обробки, а також порушенням умов експлуатації деталей.

Причинами недостатнього ресурсу двигунів після ремонту є: низька культура ремонтного виробництва; неефективна технологія ремонту деталей; низька якість обробки поверхонь тертя; відсутність сучасних технологій та обладнання, що забезпечують високі фізико-механічні властивості матеріалу відремонтованих деталей; недостатня спеціалізація виробництва на ремонтних підприємствах у порівнянні з її рівнем на заводах-виробниках серійної продукції.

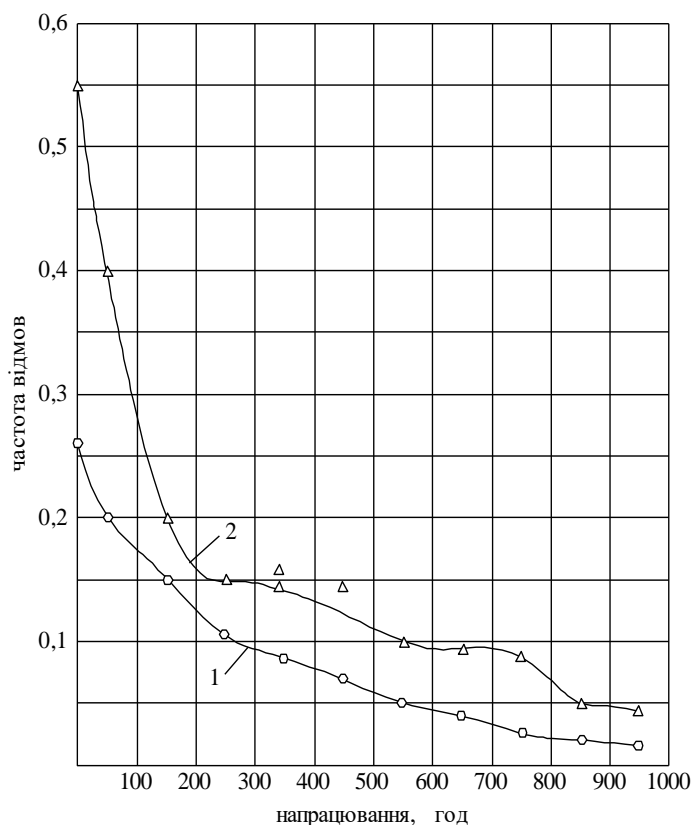


Рисунок 1 – Розподіл відмов двигуну у початковий період експлуатації:
1 – новий ДВЗ; 2 – відремонтований ДВЗ

У цілому, сучасне ремонтне виробництво за рівнем організації та технічного оснащення ще не повністю відповідає вимогам забезпечення високих показників якості. Так, показник безвідмовності та ресурсу капітально відремонтованих двигунів становить 50-60% від відповідних значень нових. При цьому, найбільш частим ресурсним відмовою ДВЗ є вихід з ладу в результаті зношування і подальшого руйнування деталей кривошипно-шатунного механізму (КШМ), тобто пари тертя "шийка колінчастого вала - вкладиш підшипника ковзання" і циліндро-поршневої групи (ЦПГ). Узагальнені дані наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Кількісна оцінка ресурсних відмов двигунів

Відмова	Кількість, %				
	СМД-62	ЯМЗ-238НБ	ЯМЗ-240Б	Д-240	КамАЗ-740
Вихід з ладу деталей КШМ	67	55	45	40	56
Зношування деталей ЦПГ	14	20	35	44	24
Прорив поршня	14	15	15	10	8
Прорив шатуна і його болтів	1	10	5	6	9
Прорив болтів кріплення маховика	-	-	-	-	3

Аналіз динаміки зміни зазорів у трибосистемах двигунів транспортних засобів свідчить, що інтенсивний характер збільшення зазору, поряд з деталями ЦПГ, мають і деталі КШМ, тобто шийка колінчастого вала - вкладиш підшипника ковзання. Залежності зазору в КШМ від напрацювання представлені на рис. 2. Порівняння швидкості зношування з'єднань свідчить, що після ремонту вона в 1,5-2,0 рази вище, ніж у нових двигунів.

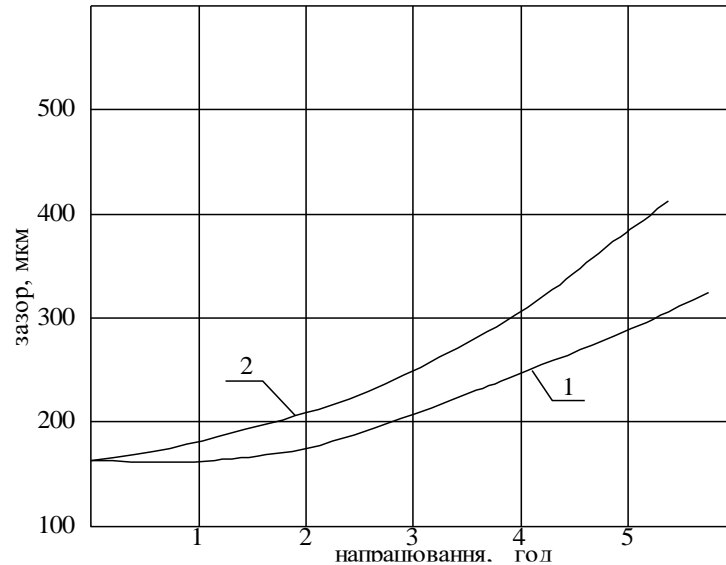


Рисунок 2 – Динаміка зміни зазорів в з'єднанні "вкладиш - шийка колінчастого вала" нового (1) і відремонтованого (2) двигуна

Основною причиною передчасного виходу з ладу деталей двигунів після капітального ремонту, зокрема, трибосистеми "шийка колінчастого вала - вкладиш підшипника ковзання", є технологія і якість зміцнення корінних і шатунних шийок колінчастих валів. Статистичні дані величини зношування корінних і шатунних шийок для вантажних і легкових автомобілів представлені на рис. 3.

Ці дані свідчать про те, що зношування корінних і шатунних шийок колінчастого вала як для легкових, так і для вантажних автомобілів із кожним ремонтним розміром зростає, і, як наслідок, двигун виходить з ладу значно раніше встановленого часу. Якщо не враховувати якість механічної (фінішної) обробки деталі після її відновлення, похибки збирання і вважати, що автомобіль експлуатується в нормальних умовах, то причиною цього є неефективність технології зміцнення шийок колінчастого валу.

Підтвердженням цього припущення є колінчасті вали двигунів КамАЗ-740 і 5Д49. Відповідно до робочих креслень колінчасті вали цих двигунів (№ 740.1005020 № 2-9ДГ.8.01-1) виготовляються відповідно із сталей 42ХМФА і 38ХНЗМА і після механічної обробки зміцнюються азотуванням на глибину $h = 0,25 - 0,4$ мм. При цьому, відповідно до вимог на встановлені ремонтні розміри для цих деталей, різниця між номінальним і останнім ремонтним розміром (КамАЗ-740 - 4 pp., 5Д49 - 12 pp.) становить 1–3 мм, що значно перевищує глибину зміцненого азотованого шару. Однак, згідно з прийнятою технологією ремонту колінчастих валів, не передбачається після кожного ремонтного розміру шийок виконувати операцію зміцнення азотуванням. В результаті значна кількість деталей, які підлягають відновленню, не ремонтується, що призводить до величезних економічних втрат у галузі машинобудування.

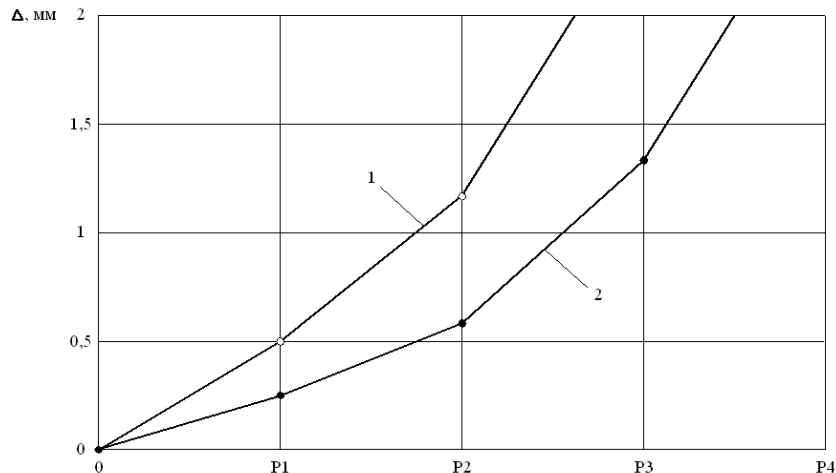


Рисунок 3 – Залежність зношування шийок колінчастого вала від кількості ремонту: 1 – вантажні автомобілі; 2 – легкові автомобілі; P - номер ремонтного розміру на деталь

Поряд із проблемою підвищення ресурсу пари "шийка колінчастого вала - вкладиш підшипника ковзання", велике значення має зменшення втрат потужності на подолання тертя в самому двигуні. При експлуатації двигуна частина потужності витрачається на внутрішні механічні процеси, зокрема, на подолання тертя у всіх трибосистемах, однією з яких є пара "шийка колінчастого вала - вкладиш підшипника ковзання". У цьому з'єднанні втрачається близько 16-19 % потужності.

Таким чином, з вищевикладеного випливає, що проблема підвищення зносостійкості корінних і шатунних шийок колінчастих валів, а отже, в цілому ресурс роботи пари тертя "шийка колінчастого вала - вкладиш підшипника ковзання", є актуальною і ключовою на теперішній час. При цьому, розглядаючи проблему вибору способу зміцнення поверхонь корінних і шатунних шийок колінчастих валів, необхідно вирішити такі завдання: – не допустити знеміцнення основного металу при кінцевій зміцнювальній обробці шийок валу як на стадії виготовлення, так і на стадії ремонту; – підвищити зносостійкість корінних і шатунних шийок колінчастого вала; – знизити коефіцієнт тертя в трибосистемах "шийка колінчастого вала - вкладиш підшипника ковзання"; – зменшити зношуваність корінних і шатунних шийок колінчастого вала по відношенню до вкладишів підшипників ковзання.

1.2 Особливості зношування поверхонь шийок колінчастих валів двигунів транспортних засобів.

Підвищення техніко-економічних показників силових агрегатів (двигунів) на сучасному етапі розвитку техніки характеризується інтенсифікацією їх експлуатаційних режимів. Це призводить до підвищення робочих температур, тиску і навантажень на конструктивні елементи і деталі.

Колінчастий вал є найбільш складною в конструктивному відношенні і найбільш напруженою деталлю двигуна, що працює в широкому діапазоні навантажень і швидкостей обертання. Основною і постійно діючою причиною зміни технічного стану колінчастого валу і трибосистеми "шийка колінчастого вала - вкладиш підшипника ковзання" є зношування корінних і шатунних шийок. Зношування шийок колінчастих

валів збільшує зазор між шийкою і вкладишем підшипника кочення. Це в свою чергу призводить до зниження тиску оливи і, зі збільшенням зазору, - до зростання динамічних навантажень, які поступово набувають ударного характеру. В результаті інтенсифікується процес зниження тягового зусилля, допустимої швидкості руху, ККД та інших технічних характеристик, а отже, істотно підвищується зношування поршневих пальців, поршня, верхніх головок шатуна тощо.

Нерівномірне зношування корінних і шатунних шийок колінчастого вала по його довжині призводить до утворення завищеною ступінчастості між суміжними шийками, що викликає збільшення згинальних навантажень на колінчастий вал і може бути причиною його руйнування. При цьому зношування корінних шийок або вкладишів підшипника ковзання в межах 0,05-0,08 мм вже небезпечний, оскільки може призвести до поломки колінчастого валу.

Вивчення характеру і причин руйнування колінчастих валів засвідчило, що майже у всіх випадках вони пов'язані з інтенсивним зносом шийок, і лише невеликий відсоток від загальної кількості відмов зумовлений дефектами матеріалу деталі.

Це повною мірою підтверджує висновки більшості вчених про те, що саме руйнування поверхонь деталей машин при контактній взаємодії, як правило, передує руйнуванню основи. Тому в загальній проблемі надійності і довговічності машин прийнято розрізняти "об'ємну міцність" і "міцність поверхневого шару". Переважна більшість відмов (до 80%) відбуваються в результаті поверхневого руйнування і, насамперед, зношування.

У реальних умовах експлуатації, крім зношування, відбувається ще одне шкідливе явище - розвиток втоми металу, причому має місце як втома матеріалу в об'ємі матеріалу деталей, так і в поверхневому шарі (контактна втома). Як правило, зношування і втома розвиваються спільно і взаємопов'язано. Це призводить до появи комплексного зносовтомного пошкодження вузлів силових систем. У табл.2 наведені приклади характерних силових систем і вказані домінуючі процеси їх пошкодження в експлуатаційних умовах.

Таким чином, довговічність і ресурс роботи колінчастих валів визначаються двома параметрами: втомною міцністю і зносостійкістю.

Таблиця 2 – Типові силові системи "тверде тіло – тверде тіло" і характер їх комплексного ушкодження в умовах експлуатації

Тип силової системи	Провідні процеси пошкодження в умовах експлуатації	Комплексне пошкодження
Шийка колінчастого валу – вкладиш підшипника ковзання	зношування, втома	фрикційно-механічна (контактна) втома
Колесо – залізнична рейка	втома, зношування, відшарування	контактно-механічна втома
Шліцьовий вал – муфта	втома, зношування при фретинг- корозії та при фретингу	фретинг-втома

Якщо проблема підвищення втомної міцності колінчастого валу і в загальному всіх елементів трибосистем двигуна вирішується переважно на стадії його проектування, то

зносоустійкість деталей і пар тертя залежить від багатьох чинників, починаючи з конструкції колінчастого вала, методів його зміцнення і закінчуючи режимами роботи двигуна, якості застосовуваних автоексплуатаційних матеріалів і зовнішніх умов роботи (рис. 4).

Аналіз впливу різних чинників у загальному процесі зношування деталей двигуна є складним завданням. Зношування, що виникає при роботі трибосистем, характеризується видаленням матеріалу з контактуючих поверхонь у результаті механічних і хімічних процесів. Натепер досить добре вивчені окремі види і закони зношування, однак сформулювати та узагальнити все різноманіття явищ, які відбуваються в поверхневому шарі, неможливо.

Зносоустійкість необхідно розглядати як характеристику складної трибологічної системи, оскільки вона не є такою ж характеристикою матеріалу, як, наприклад, тимчасовий опір.



Рисунок 4 – Чинники, що впливають на інтенсивність зношування трибосистем двигуна

При контакті двох пов'язаних поверхонь і їх відносному переміщенні в поверхневих шарах виникають механічні та молекулярні взаємодії, які, зрештою, і призводять до руйнування мікрооб'ємів поверхонь, тобто до їх зношування.

Провідним процесом зношування трибосистеми "шийка колінчастого вала - вкладиш підшипника ковзання" є механічне зношування, в яке, згідно ДСТУ 2823-94, входять абразивна і втомісна складові. Супутніми видами зношування є адгезійне (зношування при заїданні), зношування при фретингу, механіко-хімічне, одним із видів якого є зношування при фретинг-корозії. Залежно від умов роботи двигуна за певних умов

кожен із перелічених видів може стати провідним у процесі руйнування. На рис. 5 показана поверхня шийки колінчастого вала двигуна 5Д49, на якій видно кільцеві риси, що характеризують абразивне зношування деталі.



Рисунок 5 – Кільцеве (абразивне) зношування шийки колінчастого вала двигуна типу 5Д49

Абразивні частинки потрапляють в робочу зону пари тертя з повітря, разом з паливними і мастильними матеріалами, а також при складанні вузла.

Забруднені мастильні матеріали суттєво впливають на інтенсивність процесу зношування шатунних і корінних шийок колінчастих валів, в результаті чого зношування може відбуватися навіть при рідинному терті.

Як було раніше зазначено, колінчастий вал є найбільш напруженою деталлю двигуна, сприймає періодичні навантаження від сил тиску газів в циліндрах, сил інерції мас, що рухаються зворотно-поступально, і їх моментів. Протягом кожного робочого циклу (720° для чотири- і 360° для двотактного двигуна), сили, що діють на колінчастий вал, безперервно змінюються за величиною і напрямком. Це в сукупності призводить до того, що трибосистема "шийка колінчастого вала – вкладиш підшипника ковзання" двигунів працює в широкому діапазоні динамічних навантажень і швидкостей тертя.

У результаті таких умов роботи деталі на поверхні корінних і шатунних шийок колінчастих валів відбуваються втомні процеси.

Під терміном «втома» зазвичай розуміють особливий тип руйнування, що викликається повторно діючими циклами, амплітудне значення яких не перевищує межі пружності матеріалу. Воно є результатом поступового накопичення пошкоджень на поверхні, які призводять до утворення піків напружень і в кінцевому підсумку – до відшарування часток металу або його оксидних плівок при багаторазовому навантаженні, зміні геометричних параметрів виробів і виходу їх із ладу.

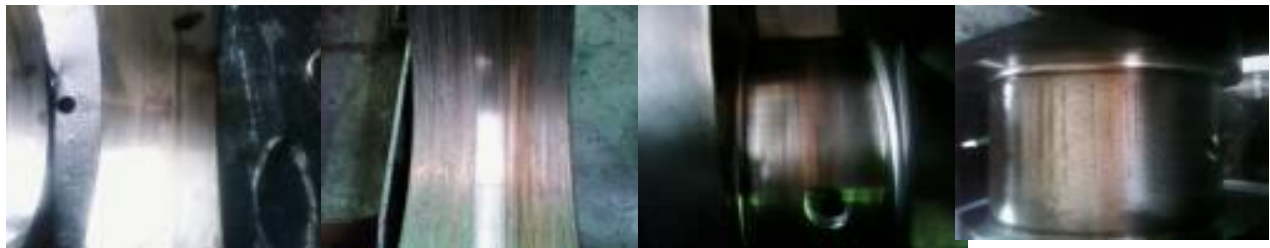
Як уже зазначалося, втома зношування, поряд з абразивним, є одним із найбільш поширених механізмів руйнування поверхонь деталей силових систем. Дослідження поля пружнопластичних напружень у підповерхневих зонах контактних поверхонь та урахування взаємодії дислокацій між собою і з поверхнею дало змогу ввести термін "зношування відшаруванням". Утворення втомних мікротріщин відбувається в місцях скупчення дислокацій на поверхні виробу або на певній відстані від поверхні, залежно від співвідношення модулів зсуву самого металу і його поверхневого шару. Розтягувальні напруження розкривають мікротріщини, і в них затікає змащувальна речовина. При зміні розтягувальних напружень на стискні тріщини закриваються, а змащувальна речовина створює високий тиск, під впливом якого відбувається подальший розвиток тріщин.

З'єднуючись, вони утворюють сітку втомних тріщин, що призводить до руйнування поверхні.

Утворення втомних тріщин спостерігається як в умовах обмеженого, так і інтенсивного змащування (рис. 6, 7).



Рисунок 6 – Втомні тріщини на шийці колінчастого вала двигуна типу 5Д49 в умовах обмеженого змащування



Вкладиш: зношування припрацьованого покриття

Перенос матеріалу вкладиша на шийку

Мікротріщини



Технологічні дефекти: відшарування припрацьованого покриття та його зношування

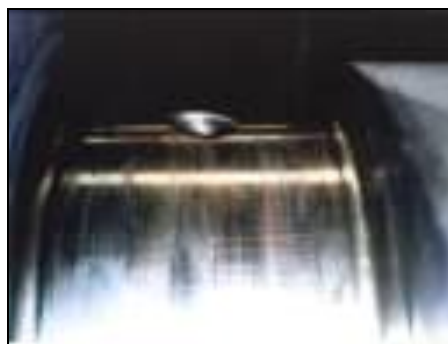


Рисунок 7 – Втомні тріщини на шийці колінчастого вала двигуна типу 5Д49 в умовах інтенсивного змащування та інші дефекти

При цьому виключно важливу роль відіграє дискретність (локальність) поверхневих деформацій. Це достовірно підтверджується природою мікронеоднорідного деформованого стану металів як у пружній, так і в пластичній зонах. Тому основним видом фрикційних зв'язків матеріалів, що виникають при терті в з'єднанні «шийка колінчастого вала – вкладиш підшипника ковзання», є пружнопластична деформація як результат зношування мікрорельєфів контактуючих поверхонь. При терті двох поверхонь зони контакту постійно змінюються, а окремі мікронерівності піддаються багаторазовому навантаженню, в результаті чого і виникають умови для втомного руйнування поверхневого шару.

При будь-якому виді зношування робота пари тертя складається з трьох стадій: припрацювання, усталеного зношування, протягом якого його швидкість постійна, і катастрофічного зношування.

Під час припрацювання третьові поверхні інтенсивно зношуються, збільшується реальна площа їхнього контакту. Тривалість цього періоду обумовлена якістю поверхні і режимом роботи і, як правило, дорівнює 1,5-2 % ресурсу вузла тертя. На цій стадії важливе значення має вихідна шорсткість поверхонь тертя. Чим більше висота мікронерівностей, тим менше площа фактичного контакту сполучених тіл і вище питомий тиск у плямі контакту. Це може призвести до підвищення температури в місці контакту, знеміцнення матеріалу і прискореного зношування. Оптимальна шорсткість, тобто шорсткість, яка викликає мінімальне зношування на стадії припрацювання, залежить від умов роботи деталі. Тому для конкретної пари в залежності від умов експлуатації, як правило, експериментально встановлюється фінішна оптимальна шорсткість, що забезпечує припрацювання з найменшим зносом за найкоротший час.

Після припрацювання з переходом до стадії стійкого зношування встановлюється рівноважна шорсткість, яка зберігається при подальшій експлуатації незмінною. При цьому, якщо вихідна шорсткість перевищує оптимальну, відбувається її зменшення, якщо ж шорсткість менше оптимальної, то з часом вона збільшується.

Саме друга стадія характеризує довговічність пари, що працює в умовах тертя. У цей період встановлюється динамічна рівновага між процесами зміцнення і знеміцнення поверхневих шарів, у яких спостерігається формування нових структур. Поверхневий рельєф, який при цьому утворюється, і характер нових структур обумовлюють зносостійкість. Вони, в свою чергу, залежать не тільки від матеріалів пари і їх вихідної структури, а й від процесів, які відбуваються на стадії припрацювання. Тому початковий період зношування є дуже відповідальним, і від нього багато в чому залежить зносостійкість реальної пари тертя.

Забезпечення високої зносостійкості - це насамперед зменшення зношування на стадії припрацювання, уповільнення цього процесу на стадії стійкої експлуатації, тобто подовження другої стадії, і за рахунок підвищення довговічності.

Це завдання вирішується раціональним вибором матеріалів деталей, що працюють в контакті (пар тертя), і способу їх обробки. При цьому треба враховувати, що зносостійкість залежить не тільки від властивостей поверхневого шару виробу, але також і від умов експлуатації (питомого тиску, температури, швидкості руху, мастила тощо). Не існує універсального зносостійкого матеріалу. Матеріал, стійкий до зношування в одних умовах, може катастрофічно швидко виходити з ладу при зміні умов експлуатації.

Дуже велику роль у забезпеченні необхідної зносостійкості відіграє матеріал вкладиша. Для пари «колінчастий вал – вкладиш» використовують антифрикційні олов'яно-фосфорні, алюмінієві, нікель-кремнієві бронзи. Однак у машинах великої

потужності у важконавантажених парах тертя застосовувана номенклатура матеріалів зведена до мінімуму, оскільки не всі матеріали задовольняють вимогам високих питомих навантажень і швидкостей ковзання.

1.3 Застосування дискретного зміцнення для поверхонь деталей.

Аналізуючи наведені вище способи зміцнення та відновлення ресурсу корінних і шатунних шийок колінчастих валів, слід виділити загальні для них недоліки: стандартні зміцнювальні способи і традиційні технології отримання зносостійких покриттів у більшості своїй не забезпечують необхідного рівня зносостійкості і втомної міцності деталей одночасно; зміцнювальні покриття не володіють високою міцністю зчеплення з деталлю; стандартні зміцнювальні процеси досить енергоємні; процеси, пов'язані з нанесенням покриттів, викликають розігрів основного металу, що призводить до його знеміцнення, і можуть супроводжуватися утворенням тріщин внаслідок різкого градієнта температур; технології, що використовують об'ємну термічну обробку, супроводжуються деформаціями деталей, для усунення яких необхідні збільшені припуски під механічну обробку. Таким чином, існуючі способи ремонту колінчастих валів не дають можливості отримати необхідний рівень експлуатаційних характеристик трибосистем, що зумовлює значно менший ресурс відновлених деталей порівняно з вимогами держстандартів. Відмічене відноситься не тільки до відновлення валів, але й до їх виготовлення, оскільки існуючі технології їх зміцнення теж не забезпечують необхідного поєднання властивостей серцевини та поверхні деталей, про що йшла мова вище.

Останніми роками активний розвиток отримали процеси дискретної обробки поверхонь, які дають можливість отримати на них чергування в заданій послідовності (дискретно) високоміцних і пластичних мікроділянок, аналогічно до природних композиційних матеріалів, армованих твердими та міцними фазами. Як відомо, така структура забезпечує високу конструкційну міцність матеріалу, тобто дає змогу одночасно отримати високі показники міцності, пластичності, в'язкості руйнування. Для пар тертя завдання значно ускладнюється, оскільки необхідно не просто підвищити конструкційну міцність матеріалу вала, а й забезпечити високі трибологічні характеристики поверхонь (шийок), що працюють у контакті з контртілом (вкладишем), і при цьому не збільшити зношувальної здатності матеріалу шийки, тобто не призвести до прискореного зношування вкладиша.

Останнім часом інтенсивне поширення набули кластерні покриття. Суть методу нанесення кластерних покриттів полягає в тому, що на функціональні поверхні виробу методом електрохімічного осадження наноситься покриття з хрому або нікелю з ультрадисперсними зносостійкими частинками карбїду кремнію та/або алмазу (4-6 нм). Подібна структура може утворитися також при локальному впливі на матеріал механічних, теплових, магнітних та інших полів, які ініціюють в його різних ділянках фазові та структурні перетворення.

Ефективне застосування в різних галузях техніки для підвищення зносостійкості деталей отримав спосіб створення поверхонь з рівномірно розташованими мікрозаглибинами. Він досить успішно використовується в циліндрах двигунів, підшипниках, плунжерах тощо. Мікрозаглибини, головним чином, зумовлюють контактні здатності поверхні - покращують змащування, підвищують опір адгезії і корозії, скорочують період припрацювання. На відміну від термічного впливу на «шорсткість», для таких поверхонь введено поняття «мікрорельєф і макрорельєф» поверхні, що характеризує наявність у поверхневому шарі дискретних або неперервних заглиблень. До найбільш досліджених методів створення рельєфу належить вібраційне прокатування

(пластична деформація). Мікро- та макрозаглибини на поверхні деталі можна розглядати як резервуари, де зосереджується мастило. Для порівняльної оцінки маслосатримувальної здатності поверхонь із рельєфом запропонований термін «маслоємність». Розвинена система заглиблень забезпечує можливість проникнення мастильного середовища у зону тертя, сприяє утворенню вторинних структур. Рівномірний мікро- та макрорельєф забезпечує локалізацію абразивних частинок середовища і продуктів зношування, знижує ймовірність заклинювання пари тертя. Циркулююча в заглибленнях олива поліпшує охолодження контактної поверхні.

Дослідження проф. Б.А. Ляшенко (Інститут проблем міцності ім. С. Писаренка НАН України) в області адгезійного та когезійного зношування поклали початок розвитку нових технологій нанесення дискретних зносостійких покриттів на деталі електроіскровим легуванням [4]. Основна суть створення зносостійких дискретних покриттів полягала в нанесенні на робочу поверхню деталі дискретного (острівкового) покриття та його подальшому пластичному деформуванню. Незважаючи на значне збільшення зносостійкості матеріалу деталей з дискретними покриттями, цьому методу також притаманні недоліки. Так, деталі з дискретними покриттями відрізняються підвищеною зношувальною здатністю через високу шорсткість поверхні зміцнених деталей.

Протягом останніх десятиліть у різних галузях науки і техніки робилися спроби розробки нових нетрадиційних способів зміцнення деталей, які були б позбавлені багатьох недоліків класичних технологій. Таким новим процесом може стати спосіб формування зносостійкого поверхні деталі, в основі якого лежить дискретне зміцнення електроіскровим методом (патент № 79336, Україна).

Виходячи зі сказаного, розробка науково-технологічних основ підвищення ресурсу двигунів і відповідальних деталей силових вузлів за рахунок використання дискретного зміцнення і споріднених технологій є перспективним напрямком підвищення їхніх триботехнічних характеристик.

1.4 Дискретне електроіскрове зміцнення поверхонь важконавантажених елементів машин.

Фізико-хімічна сутність процесу електроіскрової обробки. Електроіскрова обробка (ЕІО) характеризується комплексом унікальних переваг: простота технології, що не вимагає вакууму або спеціального середовища; низька енергоємність (менше 1 кВт); відсутність розігріву виробу на велику глибину, що забезпечує збереження властивостей серцевини, отриманих в процесі попередньої термічної (хіміко-термічної) обробки; велика сила зчеплення нанесеного металу з основою; невеликі габарити обладнання; екологічна безпека. Суть методу ЕІО полягає в перенесенні металу з анода на катод (оброблюваний виріб) в момент іскрового розряду між ними. Це призводить до зміни хімічного складу та фізико-механічних властивостей матеріалу основи в полум'ї розряду. При відповідному підборі електрода і умов ЕІО досягається зміцнення обробленої поверхні. Здійснюючи розряди в окремих місцях виробу, забезпечують дискретне зміцнення. Незважаючи на короткочасність іскрових розрядів (10^{-6} – 10^{-3} с), ЕІО є складним процесом, що включає ряд фізико-хімічних явищ, пов'язаних один з одним і протікаючих одночасно. Узагальнена модель процесу ЕІО описує закономірності таких основоположних явищ як ерозія електродів, формування на них модифікованих шарів, їх взаємозв'язок. Відповідно до цієї моделі, іскровий розряд, що створює плазмовий шнур з температурою $3-7 \cdot 10^3$ К, створює термомеханічне вплив на поверхню електродів. У місцях формування анодних і катодних плям розряду утворюються об'ємні джерела теплоти, що призводять до появи ерозійних

лунок. У лунках можна виділити три зони: випаровування, плавлення і виникнення напруженого стану. Розмір перших двох зон визначається, в основному, тепловою складовою іскрового розряду і збільшується зі зниженням температур плавлення і кипіння, а також коефіцієнта теплопровідності матеріалу. Зона ж напруженого стану є наслідком хвилі термічного і термомеханічного напруження в результаті імпульсного нагріву, реактивного впливу плазми і її розширення в момент спаду струму в імпульсі.

Детальні дослідження ЕЮ, в тому числі механізму іскрового розряду, до 60-х років ХХ сторіччя стримувалися відсутністю способів вивчення процесів тривалістю 10^{-8} – 10^{-9} с. Прорив у техніці реєстрації наносекундних процесів, що стався в 60-х роках, дав змогу дослідити деякі деталі механізму електричного розряду. Було встановлено явище вибухоподібної електронної емісії при електричному пробі міжелектродного проміжку. При зближенні двох електродів між ними наростає густина електричного поля. На виступах утворюється градієнт напруженості, де електричне поле локально посилюється в 10–100 разів, досягаючи величин 10^5 – 10^6 Вт·см⁻¹ і більше. Такі ділянки є джерелами автоелектронної емісії, густина струму якої може зрости до 10^9 А·см⁻² і вище. Це призводить до швидкого розігріву поверхні, реалізується мікробибух у рідко-паровій фазі, наслідком якого є вибухоподібна електронна емісія, тобто випускання електричного струму з поверхні. Подальша емісія електронів здійснюється у вигляді екстонів – лавиноподібних порцій автоелектронів у кількості 10^{11} – 10^{12} і зазвичай триває протягом 10^{-9} – 10^{-8} с, а потім припиняється внаслідок розширення області емісії, тепловідведення вглиб матеріалу, вносу тепла за межі цієї області, випаровування і викиду рідкого металу.

Крім струму автоелектронної емісії з мікровиступів, мікробибух і збудження вибухоподібної електронної емісії може виникнути і з інших причин: при ударі об поверхню осколка прискореного матеріалу, при дії пучка заряджених або нейтральних частинок, наприклад, іонів тощо.

Описані процеси розвиваються на поверхні обох електродів. Оскільки при ЕЮ деталь є катодом, зупинимось більш детально на змінах саме на цьому електроді.

Масоперенос продуктів електроерозії з анода на катод характеризується коефіцієнтом масопереносу K_t , який є відношенням величини сумарного приросту катода $\sum \Delta k$ до сумарної ерозії анода $\sum \Delta a$ за час обробки t

$$K_t = \sum \Delta k / \sum \Delta a.$$

Максимальна величина коефіцієнта масопереносу є однією з умов ефективності процесу ЕЮ. Якщо електроерозія матеріалу катода перевищує приріст маси за рахунок перенесення матеріалу з анода ($\sum \Delta k < \sum \Delta a$), відбувається не осадження легуючого матеріалу, а переважне розпорощення металу самої деталі. Така ситуація реалізується при ЕЮ легкоплавких металів, у тому числі алюмінію, традиційними електродними матеріалами – тугоплавкими металевими сплавами і композитами системи "металоподібна тугоплавка сполука – металева зв'язка". Максимальний коефіцієнт масопереносу K_t досягається при використанні як анода сталей і титанових сплавів – 60–90 %.

Із наведених даних можна зробити висновок, що існуюча на сьогодні фізико-хімічна модель процесу ЕЮ досить схематична, і її розробка поки ще далека від свого завершення. Її основні положення були сформульовані на основі досліджень систем «метал-метал». Набагато рідше зустрічаються роботи, в яких як анод використані системи «метал-кераміка».

Враховуючи постійно зростаючий інтерес науки і промисловості до використання зносо- та корозійностійких керамічних і металокерамічних матеріалів, а також перспективність методу ЕЮ в нинішніх економічних, енергетичних та екологічних реаліях, подальше дослідження явищ, пов'язаних з масопереносом при електроіскровому розряді, безумовно, є необхідним і актуальним.

Чинники, що впливають на процес електроіскрової обробки, одержувану структуру і властивості. Серед основних чинників, що визначають ефективність процесу ЕЮ і властивості деталей, підданих цій обробці, можна назвати наступні:

- матеріал анода;
- склад міжелектродного середовища;
- характер структури, що утворюється в зоні розряду.

Фізико-хімічні критерії вибору електродних матеріалів. Електродні матеріали класифікують за різними критеріями: за типом хімічного зв'язку, призначенням створеного зміцненого шару, фізико-хімічною природою матеріалу, його міцністю. Ефективність масопереносу великою мірою визначається ковалентністю хімічного зв'язку.

Характеристикою ковалентності є критерій спрямованості зв'язку α^* , що характеризує опір кристалічної решітки руху дислокацій. За цим критерієм електродні матеріали підрозділяють на дві групи: зі слабкою спрямованістю міжатомних зв'язків ($\alpha^* \leq 1$) і з високим ступенем ковалентності ($\alpha^* > 1$). До першої групи входять, в основному, метали, які, у свою чергу, поділяються: за типом твердого розчину, що утворюється при взаємодії з матеріалом катода (необмежений чи обмежений); за температурою холодноламкості (вище або нижче 20°C). До другої групи матеріалів відносяться графіт, інтерметаліди та тугоплавкі сполуки.

Як зазначалося раніше, для систем «метал-метал» насамперед звертається увага на коефіцієнт переносу матеріалу з анода на катод. Для сталевих (чавунних) деталей найчастіше вибирають сталевий анод. Природно, що в кожному конкретному випадку матеріал анода може змінюватися залежно від складу матеріалу виробу, умов експлуатації і вимог до властивостей його поверхні. При цьому враховується співвідношення теплофізичних констант електродів (теплопровідність, температура плавлення). Однак існує і низка загальних рекомендацій. Насамперед, це забезпечення високої адгезії нанесеного матеріалу до основи і тріщиностійкості, що досягається при утворенні між матеріалами анода і катода обмежених твердих розчинів або інтерметалідів із низькою температурою холодноламкості.

Для металокерамічних і керамічних електродів велике значення має пористість. У загальному випадку ерозія матеріалу легуючого електроду зростає зі збільшенням пористості.

Склад міжелектродного середовища. Склад суттєво впливає на процес ЕЮ. На відміну від легування в інертних газах, в хімічно активних середовищах (повітряному, азот- та вуглецевмісному) продукти електроерозії взаємодіють у рідко-паровій та твердій фазах з елементами середовища. Висока температура плазми ($5 \cdot 10^3 - 10^4 \text{C}$) прискорює процес їх взаємодії. У результаті, незважаючи на короткочасність розряду, ЕЮ супроводжується утворенням різного роду хімічних сполук.

Якщо процес ведеться в повітряному середовищі, то це, головним чином, різні оксиди і в меншій кількості – нітридні фази. Такі сполуки формуються в першу чергу по межах зерен, що збільшує схильність до крихкого руйнування і підвищує поріг холодноламкості.

Для запобігання появи оксидів і нітридів і поліпшення властивостей поверхні деталі іноді процес ЕЮ проводять із введенням в зону розряду самофлюсуючих та стабілізуючих іскровий розряд добавок, а також мікролегуючих елементів.

Характер структури, що утворюється в зоні розряду. Це питання є найменш вивченим. Загальним явищем можна назвати очікуване подрібнення зерна в зоні оплавлення у зв'язку з короткочасністю процесу та надвисокою швидкістю охолодження. Конкретна ж структура в області розряду залежить і від складу матеріалів електродів (анода і деталі), і від режиму ЕЮ.

Цикл роботи електричної системи, генеруючої іскрові імпульси, може бути умовно виражений співвідношенням

$$T=t_{п}+t_{c}+t_{р}+t_{в},$$

де T – загальний час циклу; $t_{п}$ – підготовчий час; t_{c} – час утворення каналу наскрізної прохідності; $t_{р}$ – робочий час, коли система віддає накопичену енергію і, як наслідок, відбувається викид матеріалу анода; $t_{в}$ – час, за який система відновлює електричну міцність.

Шар, створений ЕЮ, формується протягом часу $t_{р}$. Решта складових ($t_{п}$, t_{c} , $t_{в}$) необхідні для відновлення системи до нового імпульсу. Таким чином, спосіб за своєю суттю є дискретним, і в цьому його перевага, оскільки:

- одиничний електроіскровий розряд забезпечує стабільність фізико-механічних властивостей окремої плями;
- зміна величини струму розряду $I_{р}$ дозволяє регулювати геометрію лунки і глибину проникнення в основу легуючих елементів;
- управляючи частотою імпульсів або швидкістю відносного переміщення анода і катода, можна варіювати кількість дискретних областей, зміцнених ЕЮ, на робочій поверхні деталі.

При розробці процесу ЕЮ слід враховувати і деякі його недоліки: товщина шару, що наноситься, і глибина легування обмежені; оброблена поверхня має велику шорсткість; продуктивність процесу невисока; на поверхні можливе формування каверн.

Внаслідок цього до теперішнього часу ЕЮ не знайшла широкого поширення в машинобудуванні і обмежувалася окремими спробами підвищення зносостійкості інструменту і деталей з конструкційних сталей, бронз і чавунів, якщо до якості поверхні виробу не пред'являлися високі вимоги.

1.5 Висновки-рекомендації щодо вибору параметрів технології дискретно-континуального зміцнення.

Проведений аналіз літературних джерел [5-11], а також результатів попередніх досліджень авторів роботи [1-4] дає змогу установити основні напрями обґрунтування параметрів технології дискретно-континуального зміцнення.

1. Визначення типу рекомендованого матеріалу для виготовлення анода.
2. Аналіз мікроструктури матеріалу зон дискретного зміцнення та основного матеріалу у прилеглих до цих зон областях. При цьому континуальне зміцнення передбачається здійснювати методом мікродугового оксидування [4].
3. Дослідження енерговитрат на здійснення дискретно-континуального зміцнення.
4. Розробка варіантів схем розміщення зон дискретного зміцнення на поверхні деталей.
5. Аналіз напружено-деформованого стану дискретно-континуально зміцнених

деталей із метою розробки рекомендацій щодо обґрунтування параметрів технологічного процесу, що розробляється.

Нижче наведені матеріали досліджень для встановлення шуканих параметрів і характеристик.

2 Розроблення варіантів нанесення зон дискретного зміцнення.

Спосіб дискретного електроіскрового зміцнення (ДЕЗ), що розглядається, відрізняється від описаної вище ЕЮ тим, що електророзряд здійснюється при зіткненні анода з деталлю. Іншими словами, процес включає елементи точкового зварювання. У результаті забезпечується зміцнення поверхонь тертя і поліпшення триботехнічних характеристик. Анод виконаний у вигляді диска певної товщини. Переміщаючи його відносно оброблюваної поверхні, отримують зміцнені ділянки у вигляді розташованих на певній відстані острівців або ліній довільної конфігурації (рис. 8).

У цій роботі надалі для визначеності використана схема острівцевого зміцнення. Дискретне покриття складається з двох частин: верхній прирощений шар, який знаходиться над поверхнею деталі, і шар, розташований під її поверхнею (рис. 9).

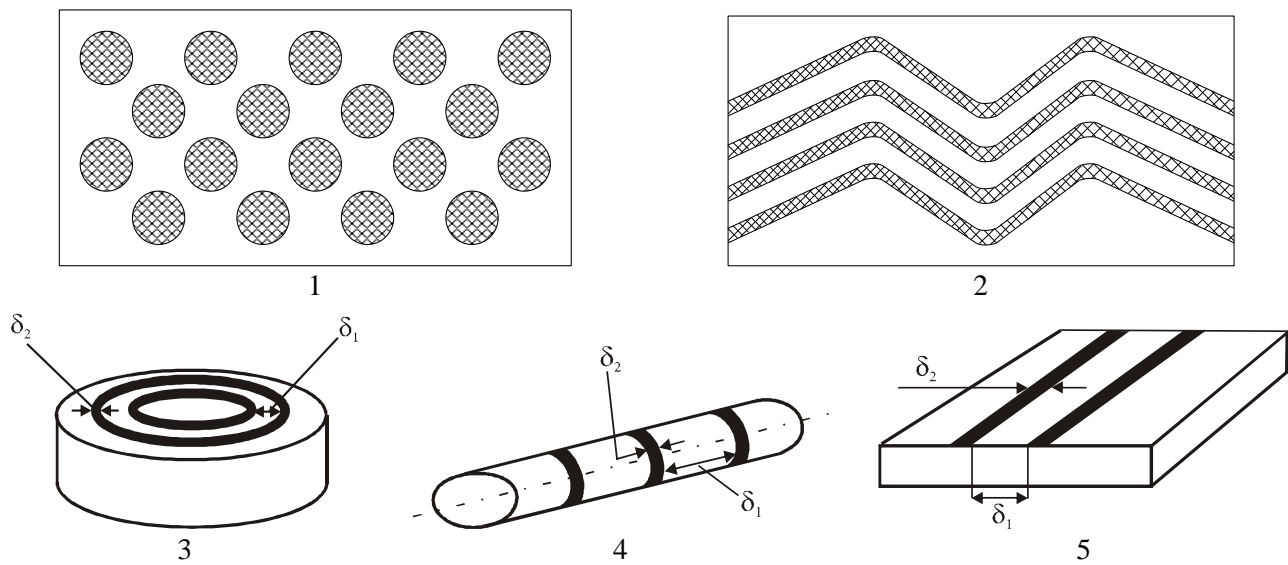


Рисунок 8 – Різновиди дискретних покриттів (схема): 1 – острівцеве; 2 – лінійне; 3 – концентричні кола; 4 – система циліндричних смуг; 5 – система паралельних смуг

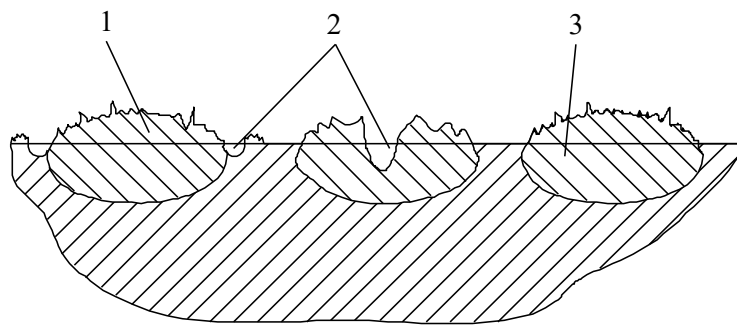


Рисунок 9 – Вид дискретного покриття (схема): 1 – верхній прирощений шар; 2 – каверна; 3 – зміцнений шар

Перенесений матеріал перемішується з основним. У процесі наступного охолодження в більшості випадків (якщо анодом являється метал) формуються пересичені тверді розчини із вкрапленнями дрібнодисперсних надлишкових фаз. Абсолютно природно, що ці зони відрізняються за механічними властивостями, зокрема, твердістю, від металу основи. При цьому поверхня прирощеної зони – нерівна, є гострі виступи, що чергуються з западинами (каверни), які є концентраторами напружень.

Після завершення нанесення дискретного покриття визначають максимальний приріст над поверхнею Δ_{\max} , максимальну глибину каверн S_{\max} і розраховують припуск h з умови видалення каверн

$$h \geq S_{\max} + \Delta_{\max}.$$

На рис. 10, *а* наведена схема шліфування поверхні, а на рис. 10, *б* – її вигляд до і після ДЕЗ.

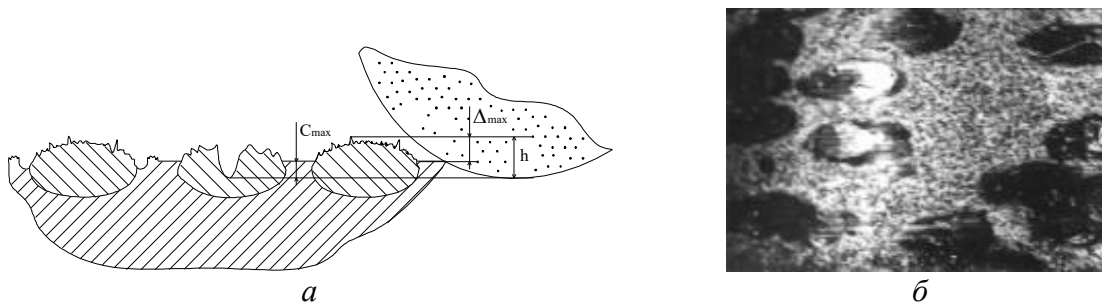


Рисунок 10 – Формування поверхні при шліфуванні:
а – схема, *б* – розташування дискретних зміцнених областей; $\times 10$

При зрізі зовнішнього шару на величину, дещо меншу максимальної глибини каверни, на поверхні допускається збереження неглибоких западин (рис. 11). Вони є ємностями для масла, за рахунок чого зменшується коефіцієнт тертя в початковий момент взаємного зміщення контактуючих деталей.

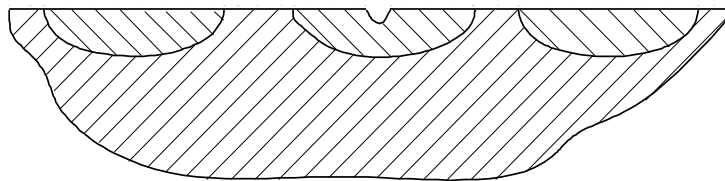


Рисунок 11 – Поверхня після шліфування при неповному видаленні каверн (схема)

Описаний спосіб ДЕЗ має досить високу продуктивність, забезпечує стабільність процесу і дозволяє управляти величиною дискретності.

Матеріали, устаткування, технологічне оснащення і електроди для дискретного електроіскрового зміцнення колінчастих валів. Дослідження проведені на матеріалах, використовуваних у сучасній техніці для виготовлення колінчастих валів: сталь 42ХМФА (ГОСТ 4543–88), застосовувана, наприклад, для колінчастих валів автомобілів КамАЗ, і високоміцний легований чавун з кулястим графітом, модифікований магнієм

(ТУ Д70.05.Дт:1978), з якого виготовляють колінчасті вали двигунів типу Д80 для маневрових і магістральних тепловозів.

За існуючої технології сталеві вали піддають об'ємному гартуванню з високим відпуском (поліпшення), а після цього шийки зміцнюють поверхневим гартуванням або (частіше) азотуванням. Чавунні вали проходять нормалізацію з високим відпуском, а шийки іноді додатково зміцнюють гартуванням із нагрівом струмами високої частоти (СВЧ) з наступним низьким відпуском.

За базову модель для дискретного зміцнення була прийнята установка «Дискрет – 04», розроблена в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України на основі установки ЕФД–25М з дисковим електротримачем. Однак, ця установка призначалася для нанесення дискретних покриттів товщиною не менше 0,3 мм, що супроводжувалося утворенням глибоких каверн. Для валів величина ерозії поверхні має велике значення. Для її зменшення установка оснащена спеціальним блоком управління, який істотно знижує можливість утворення каверн на поверхні деталі. Це дає можливість зменшити припуск на механічну обробку і, як наслідок, збільшити глибину легованого зміцненого шару.

ДЕЗ виконується на токарних верстатах після напівчистового шліфування шийок. Створене універсальне технологічне оснащення дає можливість з однієї установки колінчастого вала обробити як корінні, так і шатунні шийки.

Відомо, що всі без винятку струмопровідні матеріали при розряді переносяться з анода на катод. Як уже зазначалося, на ерозію анода помітно впливають його теплофізичні характеристики – температура плавлення і теплота сублимації. Тому ефективність зміцнення істотно залежить від матеріалу електродів. Активність перенесення матеріалів при розряді можна розташувати в такий ряд:



Приріст (нарощування) матеріалу катода у плямі розряду визначається кількістю перенесеного матеріалу анода. Глибина зміцненого шару залежить від розчинності матеріалу анода в матеріалі катода. Тому в загальному випадку чим вища розчинність, тим більша глибина легованого шару, хоча на цей параметр дуже суттєво впливає режим обробки.

При розробці режимів і виборі електрода керуються наступними загальними міркуваннями: необхідно одночасно досягти високих значень зносостійкості, втомної міцності, тріщиностійкості, пластичності, ударної в'язкості, низького коефіцієнта тертя; зменшити можливість попадання абразивних часток у пару тертя або забезпечити їх подрібнення у процесі роботи, що полегшить їх винесення із зони тертя змащувально-охолоджувальною рідиною; отримати максимальну глибину легованого шару; якщо є можливість, підвищити теплостійкість поверхні тертя, знизити вплив навколишнього середовища і мастила на фізико-механічні властивості матеріалів поверхонь тертя; матеріал електрода повинен бути доступним для придбання і відносно недорогим.

Після проведення аналізу можливих матеріалів електрода, які можуть забезпечити викладені вимоги, для випробування були обрані: нержавіюча сталь 08Х18Н10Т; швидкорізальна сталь Р6М5; підшипникова сталь ШХ15.

3 Дослідження ефективності використання дискретно-континуального зміцнення при виготовленні та ремонті деталей машин.

Для порівняльного аналізу енергоефективності виконання дискретного зміцнення при виготовленні і ремонті деталей машин було проведено низку дослідів. Для зміцнення

шийок колінчастих валів були застосовані: 1) розроблений метод дискретного зміцнення; 2) загартування струмами високої частоти (СВЧ).

Вони були виконані в умовах виробництва на ДП «Завод ім. Малишева».

Як засвідчив аналіз, витрати енергії на дискретне зміцнення колінчастих валів порівняно із іншими технологіями на 53,3 % нижчі. При цьому твердість, міцність та зносостійкість поверхонь оброблених деталей не просто залишаються на тому ж рівні, але й суттєво підвищуються.

Таким чином, є підстави стверджувати, що запропонована технологія є енергоефективною на етапі виготовлення і ремонту деталей машин.

4 Аналіз зміни структури і властивостей приповерхневих шарів матеріалів після дискретно-континуального зміцнення та їх вплив на експлуатаційні властивості виробів.

Як відомо, проблема зміцнення поверхонь високонавантажених елементів машин (ВЕМ) традиційними поверхневими методами стикається з протиріччям між вартістю, енергоємністю, якістю. Вище описана принципово нова технологія дискретно-континуального зміцнення – ДЕЗ і показаний позитивний вплив цієї обробки на службові властивості сталевих і чавунних валів. Однак недослідженим залишився напружено-деформований стан (НДС) виробу, хоча, як зазначено вище, у результаті імпульсного нагріву, реактивного впливу плазми та її розширення в момент спаду струму в імпульсі у зоні розряду виникають термомеханічні напруження, а при контактній взаємодії вони доповнюються робочими напруженнями.

Основна теоретична база методу узагальненого параметричного моделювання складних і надскладних механічних систем, запропонована і реалізована в роботі у вигляді сучасного потужного програмно-апаратного комплексу, дає можливість здійснити розрахунок напружено-деформованого стану на прикладі фрагмента колінчастого вала двигуна, підданого ДЕЗ.

Підходи до розв'язання поставленої задачі. Зношування поверхонь тертя, як уже зазначалося, відбувається в результаті двох різновидів механічного зношування – абразивного і втомного. Тому довговічність і ресурс роботи колінчастих валів двигунів, в основному, визначаються двома параметрами – втомною міцністю виробу і зносостійкістю поверхні шийок. Якщо питання підвищення втомної міцності колінчастого вала і взагалі всіх елементів трибосистем двигуна вирішується значною мірою на стадії їх проектування та призначення об'ємної термічної обробки, то зносостійкість деталей повністю залежить від методів зміцнення їх поверхневих елементів.

Загальним і найбільш істотним недоліком усіх традиційних методів поверхневого зміцнення є те, що вони зводяться лише до підвищення твердості матеріалу поверхневого шару деталі. Але, як відомо, одна твердість не може однозначно характеризувати зносостійкість. У результаті цього ресурс двигунів до відправки на капітальний ремонт у реальних умовах експлуатації виявляється істотно нижче нормативного.

У цьому підрозділі описані підходи, моделі та отримання чисельного результату напружено-деформованого стану фрагмента колінчастого вала, обробленого методом дискретного зміцнення.

Поставлена задача зводиться до необхідності проведення багатоваріантних досліджень об'єкта складної форми з неоднорідними матеріалами при різних поєднаннях параметрів технологічного процесу. Проблема є актуальною для розробки загального методу опису розрахункових моделей складних і надскладних механічних систем, які враховують кількісні, якісні, структурні характеристики досліджуваних об'єктів. Її

вирішення потребує значних обчислювальних ресурсів і нових підходів. Для цього використаний розроблений сучасний потужний програмно-апаратний комплекс для дослідження характеристик міцності і жорсткості елементів складних механічних систем. Рішення здійснено, слідуючи роботам [1–4].

Чисельний аналіз напружено-деформованого стану елементів вала після ДЕЗ. На рис. 12 наведена схема розташування дискретних розрядів на опорній частині вала і виявлені при металографічних дослідженнях характерні ділянки структури в області розряду. Підшар складається з двох ділянок, що відрізняються складом легуючих елементів, перенесених із анода.

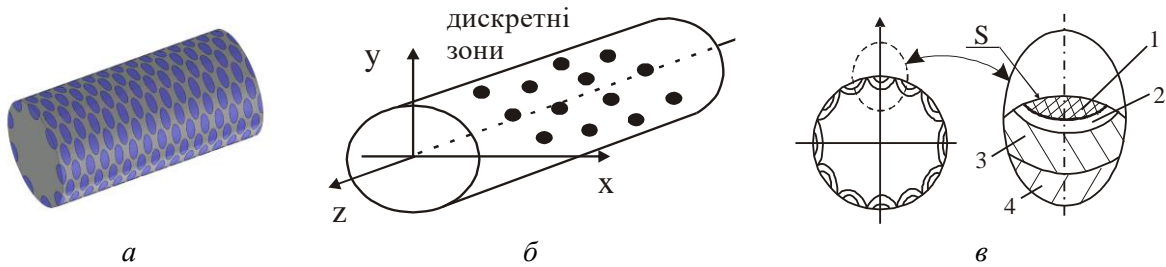


Рисунок 12 – Схема розташування дискретних розрядів на опорній частині вала: *a* – фрагмент зміцненої частини опорної поверхні вала (геометрія показана умовно); *б* – схема розташування розрядів; *в* – характерні ділянки структури після ДЕЗ: 1 – «білий» шар; 2, 3 – підшар; 4 – основний метал

На рис. 13, 14 показані прийняті при моделюванні позначення у дискретній зоні зміцнення (ДЗЗ): d і h – діаметр і глибина «білого» шару; H – загальна глибина підшару, b – ділянка підшару, зміцненого легуючими елементами; τ_{xy} і τ_z – крок в окружному і осьовому напрямках, відповідно.

Густина покриття поверхні S (коефіцієнт дискретності) визначається залежністю $f = \pi d^2 / 4 \tau_{xy} \tau_z$. Прийняті позначення властивостей: E – модуль пружності, ν – коефіцієнт Пуассона; $\sigma_{0,2}$ – умовна границя текучості; σ_b – тимчасовий опір. Для різних ділянок властивості відмічаються індексом i ($i = 1, 2, 3, 4$), який відповідає номеру ділянки на розрахунковій схемі. Таким чином, перелік параметрів технологічного процесу ДЕЗ – $P = \{d, \tau_z, \tau_{xy}, E, \nu, \sigma_{0,2}, \sigma_b, h, b, H\}$ – це уся сукупність індексованих за номером ділянки властивостей матеріалу.

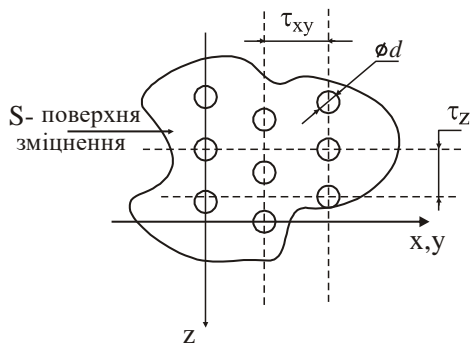


Рисунок 13 – Прийняті при моделюванні позначення

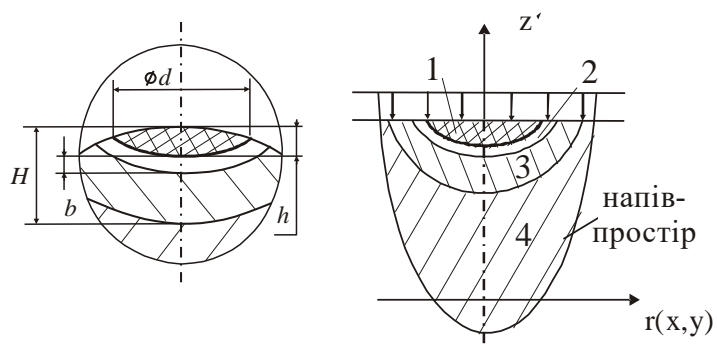
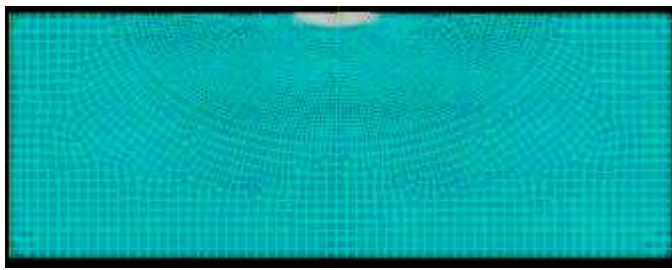
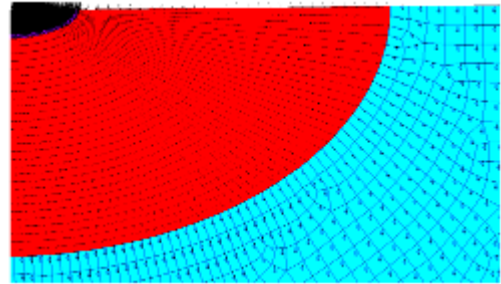


Рисунок 14 – Розрахункова схема для визначення НДС в ДЗЗ

На першому етапі для отримання осесиметричної картини НДС у ДЗЗ була побудована скінченно-елементна модель з 1,5 млн. вузлів та 403 тис. елементів (рис. 15).



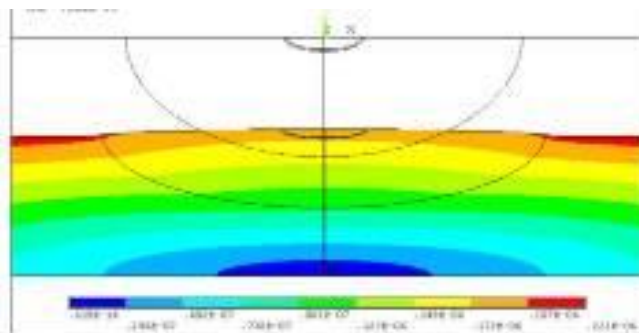
загальна модель



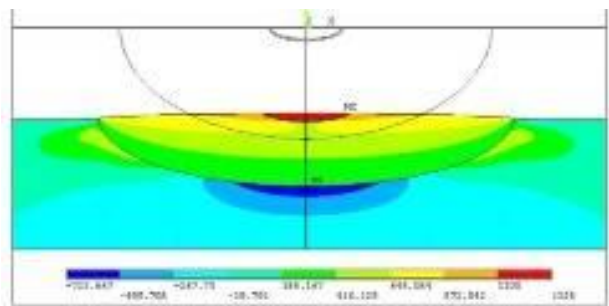
фрагмент в області ДЗЗ

Рисунок 15 – Скінченно-елементна модель

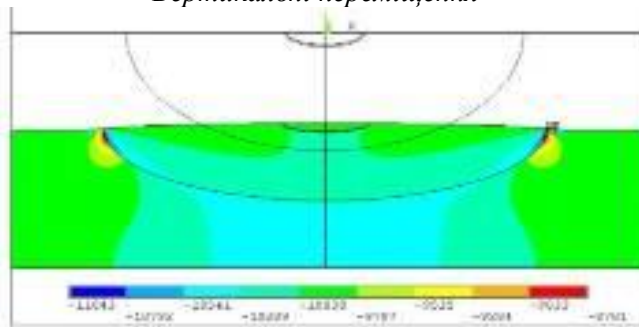
Якісні картини компонент НДС при співвідношенні модулів пружності $\alpha_1 = E_1 / E_4 = 1,2$; $\alpha_2 = E_2 / E_4 = 1,1$; $\alpha_3 = E_3 / E_4 = 1,0$; $\beta_1 = \nu_1 / \nu_4 = 1,0$; $\beta_2 = \nu_2 / \nu_4 = 1,0$; $\beta_3 = \nu_3 / \nu_4 = 1,0$ наведені на рис. 16. Видно, що профіль деформованої поверхні сприятливий для роботи у процесі контактної взаємодії, оскільки при цьому контактний тиск перерозподіляється, збільшуючись в області легованого матеріалу та зменшуючись при віддаленні від нього. Таким чином, після ДЕЗ не тільки досягається зміцнення, але й покращуються умови тертя (в силу більш низького коефіцієнта тертя матеріалу 1 по спряженій деталі, див. рис. 14).



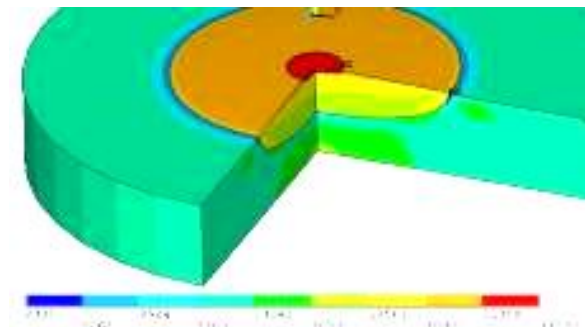
Вертикальні переміщення



Перші головні напруження



Треті головні напруження



Інтенсивність напружень за Мізесом

Рисунок 16 – Компоненти НДС в області ДЗЗ

Цей ефект тут названий « Δ -ефект». Чим більший тиск, тим більше деформується тіло деталі, тим більший ефект перерозподілу зусиль контактної взаємодії в бік найбільш міцної ділянки спряження. Отже, при зміні контактного тиску ефект є стабільним.

Для аналізу впливу різних чинників на НДС реальних конструкцій, що піддані дискретно-континуальному зміцненню, побудовано просторову скінченно-елементну модель (СЕМ) фрагменту приповерхневої частини опорної частини валу після ДЕЗ. Оскільки для повного моделювання опорної частини валу потрібна надто велика (сотні мільйонів ступенів вільності) СЕМ, то було визначено репрезентативну множину (частину деталі), що входить до складу відповідного секторного вирізу (рис. 17).

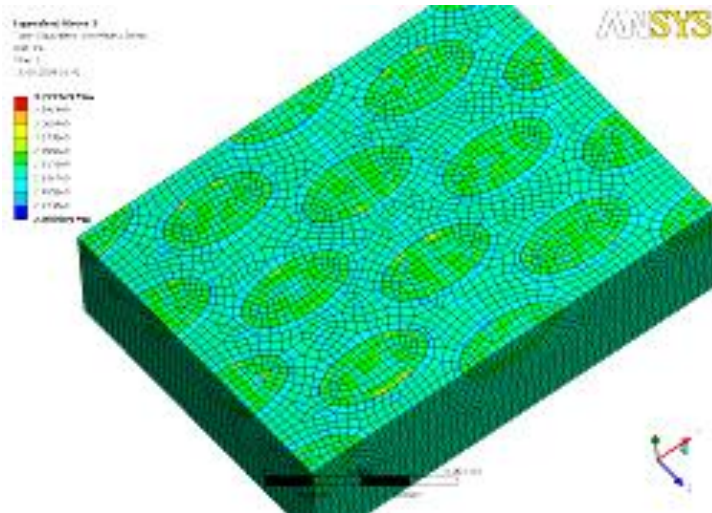


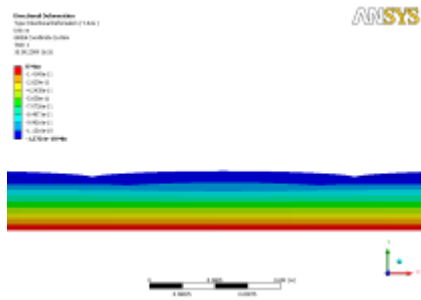
Рисунок 17 – СЕМ підповерхневого шару опорної частини валу

На рис. 18, 19 наведена типова картина розподілу вертикальних переміщень вздовж відрізка прямої, що проходить через центри ДЗЗ. Видно, що спостерігається та ж картина переміщень, що й у випадку одиничних ДЗЗ, але з періодом повторення, який дорівнює кроку розміщення ДЗЗ.

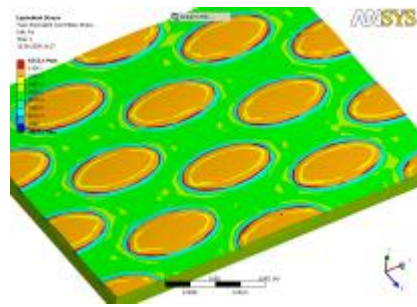
Як видно із порівняльного аналізу одержаних розподілів компонентів НДС на рис. 15–20, збільшення відносної жорсткості матеріалу зміцнення сприяє підсиленню позитивного впливу виявленого Δ -ефекту зміцнення та збільшення стійкості поверхні S до зношування. Що стосується впливу параметру ϕ , то в області його оптимальних значень 0,55 – 0,75 Δ -ефект найбільш дієвий.

Як показав аналіз напруженого стану опорної частини валу, крім виявленого Δ -ефекту, значення має ще й інший ефект, названий тут « σ -ефектом». Він полягає в тому, що при сумісному деформуванні розплавленого матеріалу ДЗЗ створюється залишковий напружений стан, який при суперпозиції з напруженим станом від дії тиску p дає ефект зменшення рівня результуючих напружень. Аналіз показує, що найбільший « σ -ефект» також досягається в діапазоні ϕ 0,55 – 0,75.

Крім того, були проведені числові дослідження контактної взаємодії зміцнених деталей. Це викликано тим, що на сьогодні відсутній достатньо докладний аналіз особливостей, привнесених на мікрорівні, у процес контактної взаємодії дискретно зміцнених деталей. Це актуальне завдання частково вирішене і описане у представленій роботі.



Деформований стан



Напружений стан

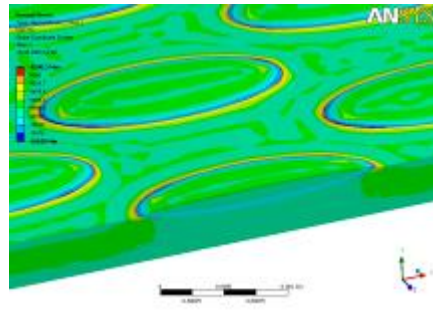
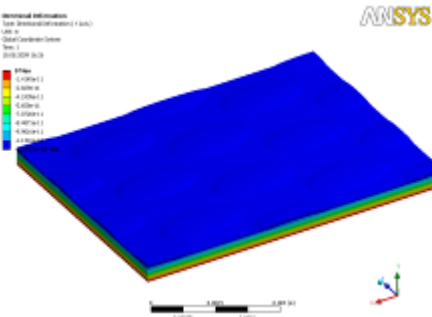


Рисунок 18 – Картина переміщень і напружень у приповерхневому шарі деталі

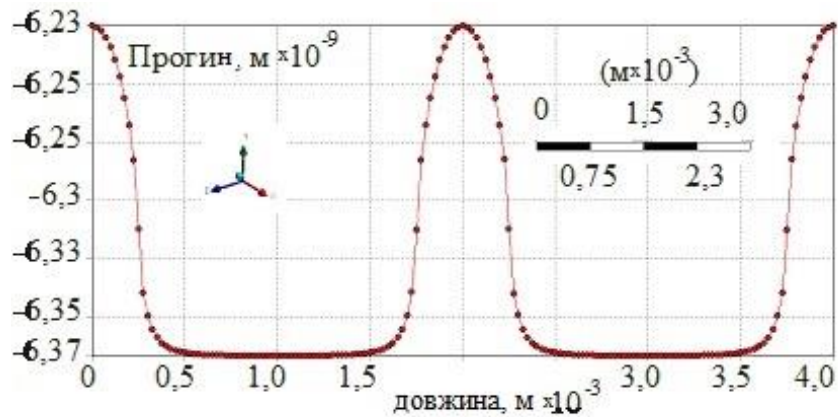


Рисунок 19 – Картина переміщень точок поверхні деталі

Як досліджуваний об'єкт був розглянутий фрагмент двох контактуючих пружних тіл, одне з яких містить напівовальну зону включення з розмірами 0,6x0,6x0,4 мм. Це і є зона дискретного зміцнення. Вона складається з високолегованого матеріалу (сталь 12X18N10T), а основний матеріал – чавун ТУ Д70.05.ДТ: 1978. З досліджуваної системи вичленований окремий фрагмент (рис. 21). За розмірами в плані він відповідає ¼ елементарної ґратки, якою вимощена поверхня дискретно зміцненої деталі. За глибиною фрагмент обмежений 10-ма розмірами характерного розміру в плані. По бічних поверхнях фрагмента задані умови симетрії, нижня грань закріплена, верхня – навантажена рівномірно розподіленим тиском $p = 100$ МПа, а по зв'язаних сторонах моделюються

умови контактної взаємодії без тертя.

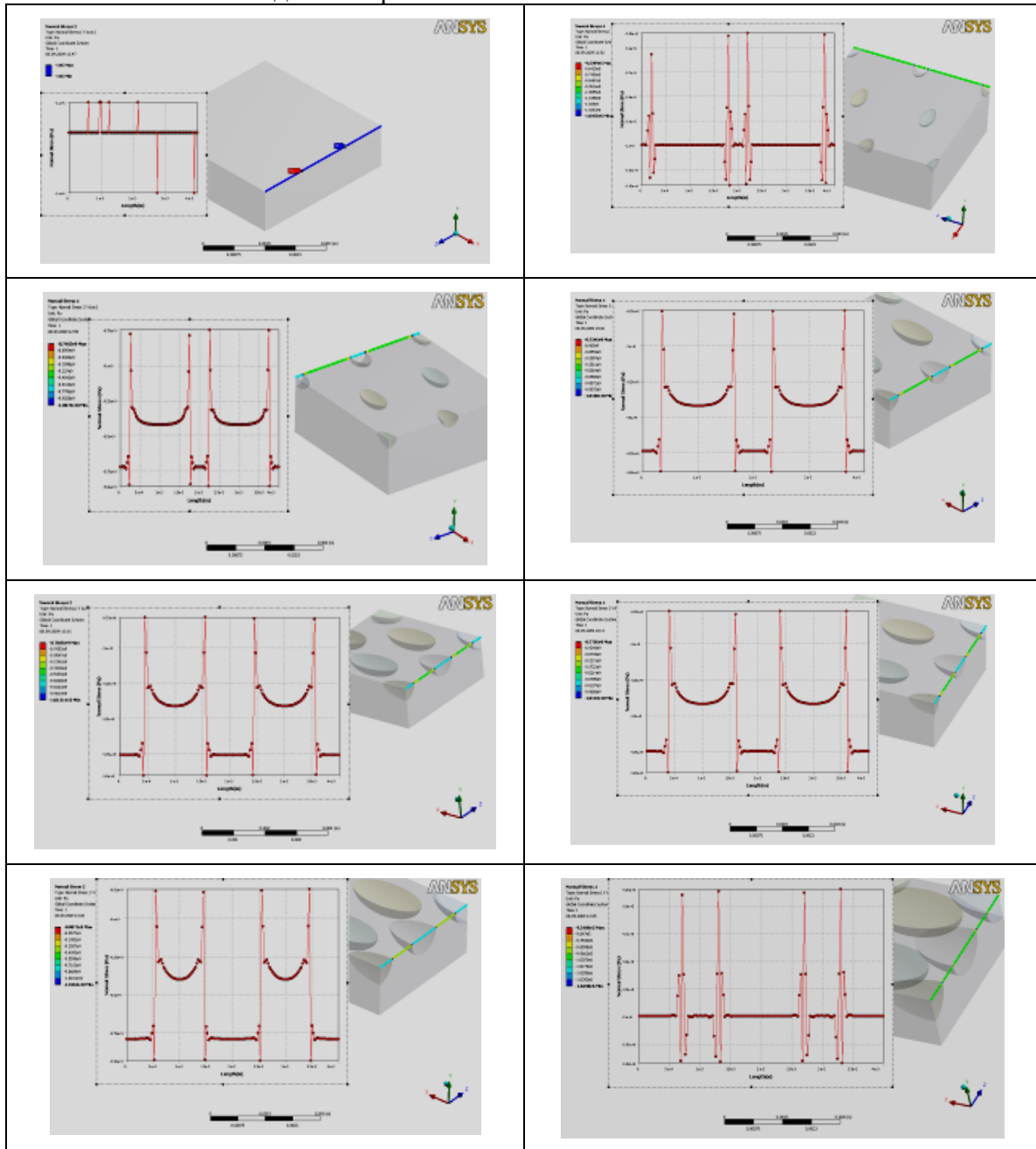


Рисунок 20 – Картини розподілу контактного тиску в поверхневому шарі деталі

На рис. 22–24 представлені картини розподілу компонент напружено-деформованого стану в дослідженому фрагменті системи взаємодіючих тіл, одне з яких містить зону дискретного зміцнення. Представлені картини розподілу контактного тиску свідчать про суттєву його нерівномірність. При цьому велика частина діючого навантаження притискання тіл, що припадає на окремо взятий фрагмент і містить одну зону дискретно-зміцненого матеріалу, передається через цю зону. В області контакту незміцненого матеріалу з незміцненим матеріалом іншої деталі контактний тиск набагато нижчий.

Відповідно, в цій області – більш сприятливі умови для акумулювання мастильного матеріалу, циркулюючого в лабіринті між зонами дискретного зміцнення.

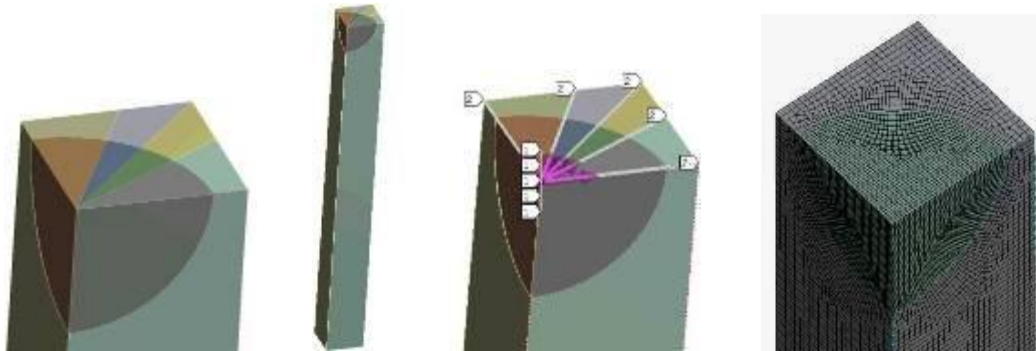


Рисунок 21 – Розрахункові схеми для задачі аналізу НДС фрагмента деталі с зоною дискретного зміцнення при дії на поверхню розподіленого тиску $p=100$ МПа

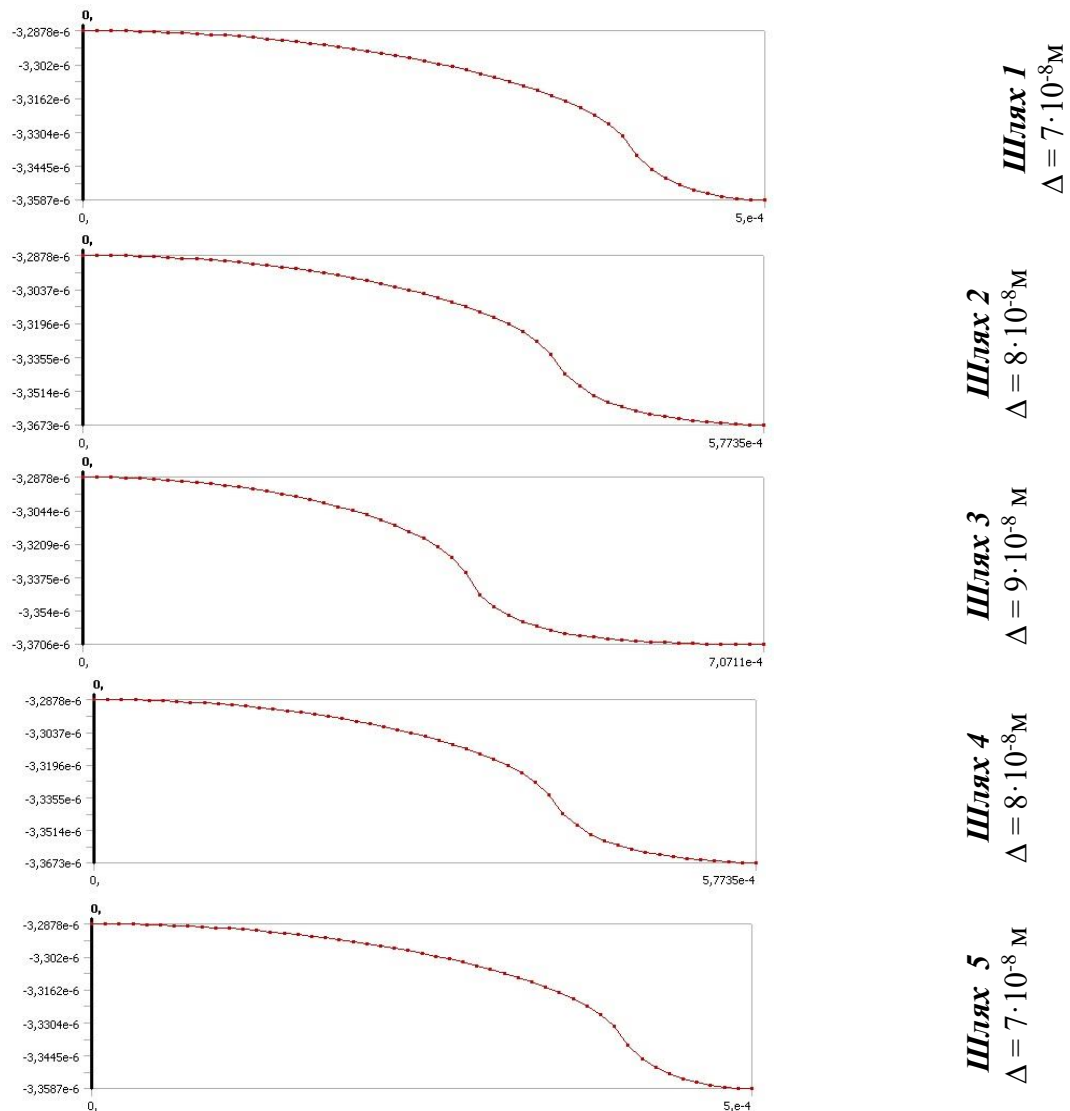


Рисунок 22 – Розподіл профілів деформованої поверхні вздовж шляхів 1-5 (див. рис. 1.21)

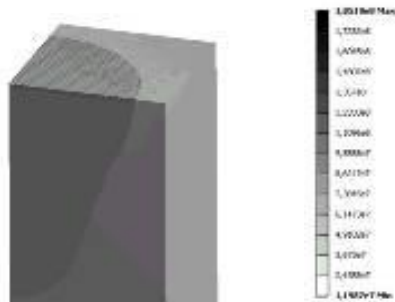


Рисунок 23 – Розподіли еквівалентних напружень за Мізесом

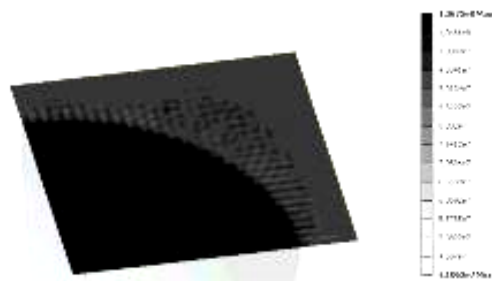


Рисунок 24 – Розподіли контактного тиску

Беручи до уваги, що поверхня зони дискретного зміцнення має низький коефіцієнт тертя у спряженні з поверхнею основного матеріалу, отримуємо у підсумку вигравш за інтегральним значенням зусиль тертя. Крім того, за рахунок більш високих механічних властивостей легованого матеріалу зони дискретного зміцнення (порівняно із властивостями основного матеріалу) деяке збільшення діючих у ній напружень (порівняно з випадком відсутності зон дискретного зміцнення) нівелюється з точки зору міцності. На додаток можна відзначити також, що верхній шар матеріалу зон дискретного зміцнення, що містить значні залишкові напруження після технологічної операції дискретного зміцнення, видаляється шляхом шліфування. Це означає, що в результаті знижується рівень сумарних напружень (від зовнішніх зусиль і від залишкового напруженого стану). Все це сприяє поліпшенню і трибологічних, і міцнісних характеристик.

Описані результати чисельних досліджень дають підстави зробити наступні висновки:

1. Розроблені комплексні скінченно-елементні моделі характеризуються адаптованістю до аналізу та синтезу принципово нових способів зміцнення елементів високонавантажених елементів двигунів внутрішнього згоряння та інших машинобудівних конструкцій, що якісно відрізняє їх від побудованих традиційними способами.

2. Здійснені чисельні дослідження дали можливість виявити два ефекти, названі « Δ -ефект» та « σ -ефект». Перший з них полягає у позитивному характері зміни деформованого профілю у контакті зміцнюваного елемента машини зі спряженими елементами. Другий ефект полягає у створенні сприятливого залишкового напруженого стану після зміцнення досліджуваного об'єкту із застосуванням нової дискретно-континуальної технології. Після нашарування на розподіл робочих напружень створюється результуючий напружений стан, значно віддалений від небезпечного рівня порівняно з незміцненими деталями машин.

3. На рівні мікроструктури встановлено, що контактна взаємодія здійснюється по всій площі спряження деталей, однак нормальні зусилля передаються в основному через зони дискретного зміцнення. Внаслідок взаємного руху контактуючих деталей в зоні їх спряження виникають зусилля тертя, які розподіляються в цій зоні нерівномірно. У свою чергу, нерівномірним буде і зношування.

Перелічені фактори створюють позитивні тенденції у всьому комплексі трибомеханічних характеристик у зоні взаємодії деталей, одна з яких піддана дискретному зміцненню.

Висновки. У роботі поставлена та розв'язана науково-прикладна проблема розробки енергоефективної технології дискретно-континуального зміцнення високонавантажених деталей військової та цивільної мобільної техніки. При цьому встановлене наступне:

1. Визначені чинники, які визначають значущі параметри технологічного процесу дискретного зміцнення, що пропонується до розробки: матеріал анода, величина електричного струму та тривалість його імпульсу; схеми нанесення архіпелагу зміцнених островців на поверхні деталей; відносна площа поверхні дискретного зміцнення.

2. Встановлено, що для виготовлення електрода можуть бути рекомендовані: нержавіюча сталь 08X18H10T; швидкорізальна сталь Р6М5; підшипникова сталь ШХ15.

3. Визначені раціональні значення коефіцієнту покриття поверхні зміцнюваних деталей зонами дискретного зміцнення. Цей коефіцієнт лежить у межах $0,55 \div 0,75$.

4. Встановлено існування ефектів зміни мікрорельєфу: зони дискретного зміцнення при дії навантаження дещо виступають над номінальною поверхнею, що позитивно впливає на умови роботи деталей у контакті.

5. Виявлено, що основні навантаження між зміцненими поверхнями деталей відбуваються по зонах дискретного зміцнення. Враховуючи високу міцність матеріалу у цих зонах та його зносостійкість, отримуємо у підсумку збільшення міцності та зносостійкості для деталей у цілому.

6. Рекомендовані варіанти схем нанесення зон дискретного зміцнення на поверхні деталей. Рекомендовано також застосовувати як парну до технології дискретного зміцнення континуальне мікродугове оксидування, наприклад, деталей із алюмінієвих сплавів.

7. Встановлено, що технологія дискретно-континуального зміцнення більш енергоефективна порівняно із традиційними технологіями.

Таким чином, отримуємо у підсумку зростання триботехнічних характеристик дискретно-континуально-зміцнених деталей.

У подальших дослідженнях буде розроблене технологічне оснащення, проведені дослідження властивостей зміцнених деталей, розроблена технологічна інструкція на технологію та конструкція установки для дискретного зміцнення.

Дослідження здійснені у рамках проєкту NRFD ID: 2023.04/0036 «Research and development of device for restoring elements of military equipment by means of discrete-continuous strengthening of structures».

Література: 1. Ткачук М. М., Гречка І. П., Грабовський А. В., Сериков В. І., Ткачук М. А., Васильєв А. Ю., Льозний О. С. Аналіз зв'язаних фізико-механічних процесів та станів і методів синтезу проєктно-технологічних рішень елементів бойових броньованих машин. Вісник НТУ «ХП». Серія. «Машинознавство та САПР». 2024. №1. С. 85-100. 2. Ткачук М. М., Гречка І. П., Сериков В. І., Грабовський А. В., Вейлер В. С., Ткачук М. А., Льозний О. С., Ткачук Г. В., Зарубіна А. О., Коба А. М. Аналіз напружено-деформованого стану контактуючих елементів гідروпередач для перспективних танкових трансмісій за варіювання та збурення форми поверхонь та властивостей матеріалів тіл. Вісник НТУ «ХП». Серія. «Машинознавство та САПР». 2024. №1. С. 101-120. 3. Ткачук М. М., Новіков М. К., Грабовський А. В., Кравченко С. О., Ткачук М. А., Подреза С. М. Створення технології дискретно-континуального зміцнення елементів автономних турбодетандерних електростанцій. Вісник НТУ «ХП». Серія. «Машинознавство та САПР». 2024. №1. С. 121-131. 4. Континуальная и дискретно-континуальная модификация поверхностей деталей: монография / Н.А. Ткачук, С.С. Дьяченко, Э.К. Посвятенко, С.А. Кравченко, В.Г. Гончаров, В.В. Шпаковский, Н.Л. Белов, А.И. Шейко, А.К. Олейник, И. В. Пономаренко. Харьков: Щедра садиба плюс, 2015. 259 с. 5. Савченков Б.В., Гончаров В.Г., Леоненко А.Н. Дискретная обработка – эффективный способ

упрочнення деталей машиню. *Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал. Харків. 2010. №1. С. 44-49.* **6.** Гончаров В.Г., Посвятенко Э.К., Дяченко С.С. Повышение износостойкости коленчатых валов форсированных дизелей большой мощности. *Резание и инструмент в технологических системах. 2009. Вып. 77. С. 53-65.* **7.** Посвятенко Едуард, Ткачук Микола. Основи забезпечення надійності форсованих двигунів нового покоління для магістральних тепловозів. *Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr 4. Seria: Transport. Rzeszów: Politechnika Rzeszowska, 2013. S. 407-412.* **8.** Парсаданов И.В., Кравченко С.А., Ткачук Н.А., Шеремет В.Н. Научное обоснование параметров дискретного упрочнения высоконагруженных деталей транспортных энергетических установок. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії: Науковий журнал. Херсон: Видавництво ХДМА. 2012. № 1(6). С. 298-310.* **9.** Tkachuk M.A., Skripchenko N., Grabovskiy A., Tkachuk M.M. Numerical tools for analysis of complex-shaped bodies in mechanical contact. *Book of Proceedings of the 56th International Conference of Machine Design Departments (ICMD 2015). Pp. 393-398.* **10.** Тартаковський Э.Д., Гончаров В.Г., Сапожников В.М. Анализ эффективности существующих методов ремонта коленчатых валов дизеля 5Д49. *Надійність рейкового рухомого складу: Збірка наукових праць. Харків: УДАЗТ, 2009. С. 71-79.* **11.** Кравченко С, Посвятенко Е., Ткачук М., Веретельник О. Комбинированные технологии повышения износостойкости высоконагруженных пар трения. *Systemy i środki transportu samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr 5. Seria: Transport. – Rzeszów: Politechnika Rzeszowska. 2014. S. 269-280.*

Ткачук М. А., Субботіна В. В., Ткачук М. М., Грабовський А. В., Кравченко С. О., Васильєв А. Ю., Сериков В. І., Кохановська О. В., Лещенко В. М.

РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОВЕРХОНЬ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ: ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОГО ЗМІЦНЕННЯ

У роботі представлені розробка нової комплексної енергозберігаючої технології виготовлення і ремонту на базі дискретно-континуального зміцнення відповідальних важконавантажених деталей військових та цивільних машин, яка дає змогу підвищити ресурс та імпортозаміщення матеріалів, а також зменшити витрати енергії як на етапі виготовлення, так при їх експлуатації. Описані рекомендації щодо вибору параметрів технології дискретно-континуального зміцнення та режимів обробки деталей з використанням технологій дискретного зміцнення, які забезпечують підвищення енергоефективності на етапі виготовлення та відновлення деталей машин. Наведені результати розрахункових досліджень впливу структури і властивостей приповерхневих шарів матеріалів на напружено-деформований стан в зонах дискретно-континуального зміцнення при дії зусиль контактної взаємодії.

M. A. Tkachuk, V. Subbotina, M. M. Tkachuk, A. Grabovskiy, S. Kravchenko, A. Vasyliiev, V. Sierykov, O. Kokhanovska, V. Leshenko

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR FORMING WEAR-RESISTANT SURFACES OF METAL PRODUCTS: DISCRETE-CONTINUOUS STRENGTHENING

The work presents the development of a new complex energy-saving manufacturing and repair technology based on discrete-continuous strengthening of responsible heavy-loaded parts of military and civil machines, which makes it possible to increase the resource and import substitution of materials, and also reduce energy consumption both at the manufacturing stage and during their operation. Described recommendations regarding for selection of discrete-continuous strengthening technology parameters and modes of processing parts using discrete strengthening technologies, which provide increased energy efficiency at the stage of manufacturing and restoration of machine parts. The results of calculation studies of the influence of the structure and properties of the near-surface layers of materials on the stress-strain state in the zones of discrete-continuous strengthening under the action of contact interaction forces are presented.