

Е.К. ПОСВЯТЕНКО, докт. техн. наук, професор кафедри "Виробництво, ремонт та матеріалознавство" Національного транспортного університету, Київ,
С.С. Д'ЯЧЕНКО, докт. техн. наук, проф. каф. "Технологія машинобудування і ремонту машин" ХНАДУ, Харків,
В.Г. ГОНЧАРОВ, канд. техн. наук, генеральний директор приватної науково-дослідної господарсько-комерційної фірми "ТАВІ", Харків,
М.А. ТКАЧУК, докт. техн. наук, професор, завідувач каф. ТММ і САПР, Харків,
В.М. ШЕРЕМЕТ, аспірант каф. ТММ і САПР, НТУ "ХПІ", Харків,
О.В. КОХАНОВСЬКА, наук. співр. каф. ТММ і САПР, НТУ "ХПІ", Харків,
С.О. КРАВЧЕНКО, канд. техн. наук, ст. наук. співр. каф. "ДВЗ", НТУ "ХПІ", Харків

ЧИСЛОВЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ДИСКРЕТНОГО ЗМІЦНЕННЯ ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

У статті описано розв'язання задачі аналізу напружено-деформованого стану дискретно зміцнених деталей машин. Результати цих досліджень можуть бути покладені в основу при визначенні технологічних режимів зміцнення високонавантажених деталей машин.

В статье описано решение задачи анализа напряженно-деформированного состояния дискретно упрочненных деталей машин. Результаты этих исследований могут быть положены в основу при определении технологических режимов упрочнения высоконагруженных деталей машин.

The paper describes solution of the problem of stress-strain state analysis of discretely strengthened machine parts. The results of these studies can be used as the basis for determining of technological regimes for strengthening of high-loaded machine parts.

Вступ. Сучасні машини та споруди працюють в умовах інтенсивних механічних навантажень. Основні елементи машин здійснюють взаємний рух з тертям під дією значних сил. Як приклади – колінчасті вали та поршні двигунів, шпингеля верстатів, осі автомобілів, підшипники, ротори турбін. Спільними властивостями цих елементів машин є дві: вони є основними елементами машин, а після їх виходу із ладу виходить з ладу вся машина або відбувається аварія; довговічність і надійність роботи цих елементів на 80–90 % визначається не "об'ємною" міцністю, а "поверхневою". Крім того, довговічність і надійність виробів залежить від опору втомному руйнуванню.

Для боротьби зі зношуванням застосовують різні способи поверхневого зміцнення: азотування; цементация; наплавлення міцного матеріалу; нанесення покриття. Проте, традиційні способи мають суттєві недоліки [1–6]. *По-перше*, традиційні способи забезпечують підвищення міцності при зменшенні

зносоустійкості або навпаки. *По-друге*, виникають проблеми при зчепленні поверхневих шарів з основним матеріалом. *По-третє*, різні фізико-механічні характеристики основного матеріалу і покриття призводять до появи тріщин і руйнування під дією температур та сил. *По-четверте*, сам процес нанесення покриттів може призводити до знеміцнення основного матеріалу. Крім того, можуть виникати значні залишкові напруження та деформації. І, нарешті, більшість традиційних процесів є енергозатратними та екологічно шкідливими.

Звідси виникає проблема підвищення ресурсу таких високонавантажених деталей. Для її вирішення у роботах [3, 7–13] була висунута ідея: треба йти не шляхом компромісів, а шляхом синергетики. Потрібно відмовитися від традиційного напрямку при вирішенні проблеми, наприклад, тільки за рахунок підвищення твердості поверхні. При цьому доцільно знайти та обґрунтувати альтернативне рішення, яке радикально підвищить зносоустійкість не на 5–10 %, а в кілька разів. За рахунок цього можна збільшити ресурс машин у 1,5–2 рази. Більше того, ставиться задача розробити таку технологію, яка була би придатна і для виготовлення деталі, і для її ремонту.

Така задача є не тільки технологічною, але й науковою. При цьому наукова частина роботи є дуже важливою, оскільки ідея технологічного процесу уже описана [3,14,16,18]. Вона полягає у проведенні не континуального, а дискретного зміцнення. Ідея була перевірена на практиці. Є окремі позитивні результати. Проте потрібно розробити наукове обґрунтування технологічних параметрів обробки поверхонь, оскільки зараз деякі технологічні параметри визначаються для конкретних деталей методом проб та помилок.

Проблема ресурсу є дуже важливою, складною та досі у повному обсязі невирішеною для більшості машин (наприклад, літаки, судна, електростанції, автомобілі тощо). При цьому виникають схожі задачі: високі навантаження, тертя, збереження міцності серцевини, ресурс. Для визначеності розглянемо типову проблемну ситуацію із забезпечення ресурсу сучасних машин на прикладі тепловозного двигуна.

При виготовленні та ремонті будь-якої машини слід визначити її агрегат, вузол чи деталь, які у першу чергу схильні до відмов у роботі. Практика показує, що, наприклад, для тепловоза такою слабкою ланкою є дизель, а найбільш характерною деталлю останнього з позицій відмов є колінчастий вал. Так, найбільш потужні тепловози, що масово експлуатуються в Україні, Росії та багатьох інших країнах, на даний час оснащені 16-циліндровим дизелем 5Д49 [4]. Колінчастий вал дизеля виготовляють з легованої сталі, а для надання валу необхідної зносоустійкості його азотують за класичною технологією у спеціальному аміачному середовищі при температурі понад 500 °С. Основним недоліком цього, в цілому, одного з найефективніших методів хіміко-термічної обробки є тривалість процесу. Так, для зміцнення поверхневого шару корінних та шатунних шийок колінчастого валу двигуна 5Д49 потрібно витратити 70–100 годин. Настільки тривале перебування вала у високотемпературному газовому середовищі призводить до його

деформації. Якщо зважити на те, що маса вала сягає 1225 кг при довжині близько 4 м, то зрозумілою стає проблема заключних операцій шліфування, при виконанні яких доводиться видаляти значну частину зносостійкого азотованого шару. Це призводить до того, що нові колінчасті вали, як правило, мають різну товщину зміцненого шару по периметру корінних та шатунних шийок. У результаті цього, згідно з діючими ремонтними технологіями, видаляється первинний азотований шар металу. Однак, оскільки повторне азотування завод-виготовлювач дизелів категорично забороняє, ремонтники, як варіант, застосовують досить грубу технологію гартування поверхневого шару струмами високої частоти з наступним шліфуванням. Як наслідок, втрачається до 1 мм робочого шару металу. Тому після одного – трьох, максимум чотирьох ремонтів колінчастий вал із дорогої хром-молібден-ванадієвої сталі масою понад 1 т доводиться утилізувати, хоча цей вал втратив усього кількесот грамів металу (рис. 1).

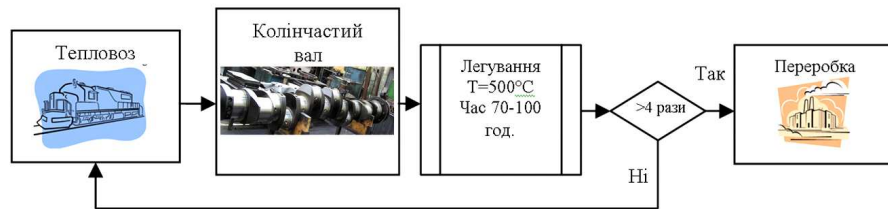


Рис. 1. Життєвий цикл колінчастого валу тепловозу

Крім тепловозів, подібні проблеми виникають при ремонті інших важконавантажених машин – прокатних станів, турбін, потужних металорізальних верстатів, морських та річкових суден тощо. Тому авторами робіт [3,17–21] протягом останніх двох десятиліть був проведений цикл теоретичних та експериментальних досліджень, метою яких було визначення оптимальних напрямків підвищення надійності таких машин технологічними методами при ремонті. Першим етапом цих досліджень була систематизація методів інженерії поверхні деталей машин, що знайшла відображення у багатьох наукових працях. Було показано, що весь спектр методів інженерії поверхні впливає на експлуатаційні властивості деталей (зносостійкість, втомнісну міцність, опір адгезійним явищам, задиростійкість, триботехнічні характеристики тощо) через комплекс фізико-механічних характеристик (мікротвердість, залишкові напруження, мікроструктуру, текстуру, мікро- і макропрофіль поверхні, товщину зміцненого шару та міцність його утримання на основі). Методи інженерії поверхні були класифіковані на 4 групи: нанесення покриттів, модифікування поверхневого шару, технологічні і комбіновані методи, а також вивчені їх можливості щодо використання для реалізації завдань даної роботи. Зокрема, були досліджені методи наплавлення, напилення, іонного імпульсного азотування, дифузійного борування, по-

верхневого гартування, плазмових технологій, холодного пластичного деформування та різання, модифікування за допомогою ультразвукових коливань, нанесення мікро- і макрорельєфів, нанесення покриттів змінної товщини, гібридних технологій. Об'єктами досліджень служили колінчасті вали ДВЗ, поршні, зубчасті колеса, поршневі пальці, гільзи, шпинделі верстатів, валки прокатних станів, ротори електричних машин, вали турбін.

Лідерами у розробці та використанні цих процесів є фірми Німеччини (Mercedes-Benz, BMW Motoren GmbH, Man B&W Diesel, Bosch Diesel S.R.O., Deutz AG, Siemens AG), Японії (Toyota, Honda Motor Company, Yamaha, Fuji Heavy Industries Ltd., Nissan Diesel Motor Company Ltd.), США (General Motors Powertrain, Caterpillar Inc., Detroit Diesel Corp., Cummins Engine Company) та інших країн.

Аналогічні розробки здійснювалися у Радянському Союзі. На підприємствах військово-промислового комплексу, наприклад, широке застосування знайшли технології іонно-плазмової обробки (типу "Булат" та інші), керамічні покриття (Al_2O_3), лазерне зміцнення та інші технології.

Проведений аналіз дає змогу зробити наступні висновки. На сьогодні одним з найбільш ефективних способів підвищення зносостійкості деталей є їх поверхневе зміцнення. Поверхневе зміцнення деталей – це окрема область технологій, що інтенсивно розвивається. В даний час існує понад 150 способів поверхневого зміцнення. Поряд з традиційними способами хіміко-термічної і термічної обробки, використання електролітичних покриттів, різних видів наплавки розвиваються нові технології зміцнення із застосуванням джерел з високою концентрацією енергії – іонно-плазмова обробка, лазерне зміцнення, детонаційне зміцнення та ін.

Відомі способи зміцнення можна розділити на шість основних класів:

- 1 – утворення плівок на поверхні;
- 2 – зміна хімічного складу поверхневого шару;
- 3 – зміна структури поверхневого шару при незмінному хімічному складі;
- 4 – зміна енергетичного стану поверхневого шару;
- 5 – зміна шорсткості поверхневого шару;
- 6 – зміна структури в усьому об'ємі металу.

Класи розділені на процеси, які можуть виконуватися за різних умов: у газовому або рідкому середовищі, у порошках або пастах, без використання або з використанням теплоти, при нормальному, підвищеному або високому тиску; у низькому, середньому або глибокому вакуумі; у атмосфері водяної, водогазової або іншої пари, у контрольованих атмосферах екзогазу або ендозау, у електропровідному або діелектричному середовищі, у середовищі з поверхнево-активними або абразивними властивостями, у магнітному, електричному, гравітаційному або термічному полі. Зовнішні умови характеризують специфічні особливості технологічного процесу, при яких здійснюється даний метод зміцнення.

Наприклад, при виготовленні колінчастих валів двигунів транспортних

засобів (автомобілів, тракторів, залізничного і морського транспорту), а також багатьох інших агрегатів і механізмів, що мають силові установки, на даний час широко використовуються способи зміцнення 2, 3 і 6-го класів (рис. 2).

До **другого класу** технологій зміцнення належать процеси, при яких основний метал деталі бере участь в утворенні приповерхневого шару, але розміри деталі при цьому практично не змінюються. Це різні види хіміко-термічної обробки: цементація, нітроцементація, ціанування, азотування, силіціювання, сульфидування, дифузійне хромування, алітування та ін.

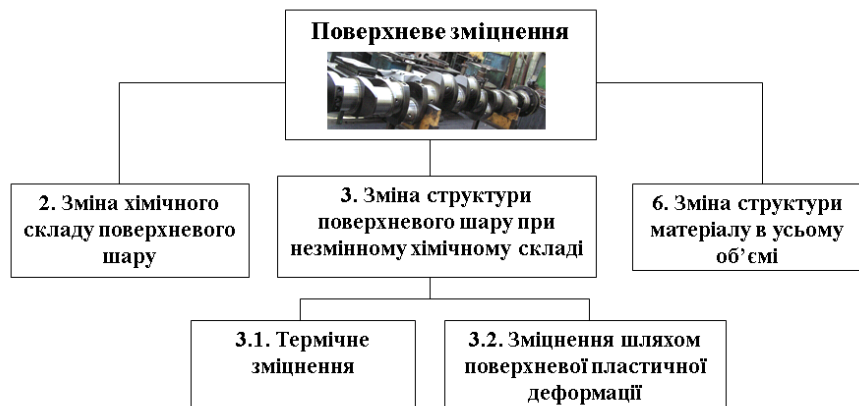


Рис. 2. Деякі способи зміцнення колінчастих валів

Загальним недоліком цих процесів є велика тривалість технологічного циклу, шкідливість виробництва, застосування високих температур і, як наслідок, зростання зерна, що веде до окрихнення сталі, короблення (викривлення) зміцнюваних деталей, відповідно, збільшення припусків під механічну обробку, а також висока енергоємність, неможливість багаторазового (повторного) зміцнення деталей.

Третій клас можна розділити на дві групи. До першої групи відносяться способи, в основі яких лежить термічне зміцнення, що полягає в дії інтенсивного потоку енергії на локальну ділянку поверхні, поглинання цього потоку енергії приповерхневим шаром деталі і внаслідок цього – швидке розігрівання ділянки до високих температур. Після припинення дії потоку енергії нагріта ділянка охолоджується внаслідок теплопровідності у внутрішні об'єми матеріалу, а також за рахунок тепловіддачі з поверхні. При цьому досягається висока швидкість охолодження (вище критичної для даної марки сталі або чавуну). В процесі нагріву і охолодження відбуваються фазові перетворення.

Найбільш поширеним методом обробки цього виду є поверхнєве гартування. Потік енергії можна отримати електричним, електроімпульсним, лазерним, ультра-

звуковим та іншими способами. У виробництві найбільше розповсюдження знайшли процеси індукційного та газополуменового нагрівання поверхні виробів.

Недоліками цих методів є висока вартість і великі габарити технологічного устаткування, особливо в разі лазерної обробки; необхідність організації заходів щодо захисту персоналу від розсіяного випромінювання; висока енергоємність; в деяких випадках – зниження втомної міцності.

Другою групою цього класу є зміцнення за рахунок поверхневого пластичного деформування (ППД), при якому в металі відбуваються структурні зміни, пов'язані з підвищенням густини дислокацій, їх взаємодією, подрібненням блоків, виникненням макро- та мікронапружень. В сталях, що після термообробки в структурі мають залишковий аустеніт, при цьому може відбуватися його часткове перетворення на мартенсит і виділення дисперсних карбідних частинок.

Пластична деформація може бути здійснена обкаткою поверхні деталі роликком або кулькою, вигладжуванням алмазним, ельборовим, твердосплавним та іншим інструментами, гідроабразивним і дробоструменевим наклепом, чеканкою та ін. Але слід мати на увазі, що при такому способі обробки не досягаються високі значення твердості, а отже, деталі мають низьку зносостійкість. Крім цього, недоліками зміцнення пластичною деформацією є те, що при підвищенні температури в процесі експлуатації властивості матеріалу поверхні деталі, отримані при зміцненні, частково або повністю зникають. У деяких випадках також реєструється зниження пластичності.

Використання ППД раціональне для вже зміцнених іншими методами деталей в якості кінцевої обробки, яка в більшості випадків приводить до виникнення поверхневих стискувальних напружень, що сприяє підвищенню опору втомі. ППД також зменшує шорсткість поверхні і заліковує ультрадрібні тріщини, внаслідок чого зменшується чутливість матеріалу до концентраторів напружень.

До **шостого класу** відноситься добре відомий метод зміцнення металів об'ємною термічною обробкою. У технології термічної обробки основна увага приділяється вибору температури нагріву залежно від марки сталі, часу витримки при цій температурі для завершення фазових і структурних перетворень та швидкості охолодження, що забезпечує утворення необхідної структури. При цьому дуже важливим є вибір температури нагріву таким чином, щоб, з одного боку, міг утворитися гомогенний аустеніт, тобто встигли розчинитися карбідні частинки, а, з іншого, не відбувся б ріст зерна, що призведе до окрихнення сталі. Не менш важливим є і вибір охолоджувального середовища, яке, забезпечуючи швидкість охолодження вищу за критичну, не створювало б великих гартівних напружень.

До недоліків об'ємних методів термічної обробки можна віднести: енергоємність; екологічно шкідливе виробництво; короблення (викривлення) виробів; ці методи не завжди забезпечують необхідні триботехнічні характеристики виробу.

На сьогодні всі відповідальні вироби із сталі і чавуну в процесі їх виго-

товлення піддаються якомусь з видів термічної і (або) хіміко-термічної обробки. Для багатьох виробів використовують комплексні методи обробки, які поєднують об'ємне та поверхнєве зміцнення. Так, азотуванню передують об'ємне гартування з високим відпуском, але після азотування ніяка термічна обробка вже не виконується.

Зносостійкість корінних і шатунних шийок вала в значній мірі залежить від твердості їх поверхні. Висока твердість досягається поверхневим гартуванням шийок з нагрівом СВЧ (індукційне гартування) або азотуванням. Після поверхневого гартування, як правило, проводять ППД галтелей для зменшення розтягувальних напружень, які виникають у місці виходу загартованого шару на щок.

Індукційне гартування широко використовується при виготовленні колінчастих валів для двигунів сільськогосподарської техніки. Більш навантажені колінчасті вали двигунів для автомобільного, залізничного і морського транспорту частіше зміцнюються азотуванням, яке не тільки знижує знос шийок валів, але й підвищує їх втомну міцність.

Азотування використовується як для сталевих, так і для чавунних валів, зазвичай, для валів з високоміцного чавуну з кулястим графітом. При цьому, на відміну від поверхневого гартування, твердість шийок зберігається до температури приблизно 500°C.

В ряді закордонних технологій (наприклад, фірми "Хонда") для підвищення втомної міцності і збільшення зносостійкості шийок колінчастих валів застосовують низькотемпературне ціанування (Тенифер-процес).

Спільним недоліком, окрім економічного, для широко використовуваних в даний час процесів зміцнення корінних і шатунних шийок колінчастих валів є короблення деталі. Основні способи усунення цього явища такі, як збільшення припуску під механічну обробку та правка (рихтування).

Проте після зміцнення деталі зі збільшеним припуском в процесі її подальшої механічної обробки (шліфування) з метою усунення короблення і отримання якісної деталі може виникнути різнотовщинність зміцненого шару, а інколи й повна його відсутність в окремих місцях. Це призводить до різкого зниження працездатності колінчастого вала.

Правку валів, як правило, виконують двома способами: з накладанням статичного навантаження і витримкою протягом певного часу без нагрівання або накладанням статичного навантаження з одночасним нагріванням вала. Однак, і в тому, і в іншому випадку в процесі правки можливе виникнення тріщин, а правка у нагрітому стані супроводжується зниженням міцності колінчастого вала.

Слід відзначити, що оскільки азотування є кінцевою термічною обробкою, з точки зору запобігання коробленню воно має переваги перед гартуванням. Але його головним недоліком, як уже відзначалося, є дуже велика тривалість.

Говорячи про забезпечення високих трибологічних характеристик поверхневих шарів, необхідно зупинитися ще на одному важливому питанні. Справа в тому, що всі розглянуті методи поверхневого зміцнення зводяться лише до підвищення твердості матеріалу поверхневого шару деталі. В той же

час відомо, що пряма залежність між зносостійкістю і твердістю не завжди реалізується. На неї впливають також інші механічні властивості, наприклад, пластичність, ударна в'язкість, їх розподіл по поверхні.

З вищезазначеного виходить, що традиційні способи підвищення зносостійкості матеріалу деталей лише за рахунок збільшення їх твердості у багатьох випадках виявляються неефективними. Це пояснює той факт, що ресурс двигунів до капітального ремонту, у тому числі і з використанням розглянутих способів зміцнення, у реальних умовах експлуатації виявляється істотно нижчим нормативного.

Тому, з одного боку, нові технології є предметом досліджень багатьох університетів та фірм (університети Штутгарта, Мюнхена, Ганновера, Аахена, Праги, Айови, Массачусетса, Арізони, фірми Man B&W Diesel, Bosch Diesel S.R.O., Deutz AG, Siemens AG, GM PowerTrain). З іншого боку, вони об'єктивно зацікавлені у нових видах технологій, які були свого часу започатковані в [1–21]. І, нарешті, є великі ринки Росії, Казахстану, Бразилії, Китаю, Індії. Їх теж цікавлять нові альтернативні технології зміцнення, розроблені вченими ЦАГІ, МВТУ ім. Баумана, МАІ, МАДІ, Шанхайського університету, університету Гонконгу, Пекінського науково-технічного університету та інженерами російської промисловості (ВАЗ, КамАЗ, ГАЗ).

Проведений аналіз стану проблеми показав, що вона є дуже важливою, актуальною. Ця проблема є предметом досліджень багатьох наукових та технологічних центрів. Також аналіз показує, що існує перспективна розробка, яка становить значний науковий та практичний інтерес – технологія дискретного електроіскрового зміцнення. Проте вона не одержала повного обґрунтування за критеріями міцності, зношування, тертя. У числі чинників, що цьому на заваді, – відсутність методів моделювання напружено-деформованого стану дискретно зміцнених деталей машин.

Постановка мети і завдань досліджень. Метою роботи є розробка науково-технічних основ підвищення ресурсу та забезпечення високої надійності, довговічності і технічних та тактико-технічних характеристик нових машин за рахунок обґрунтування режимів нової технології дискретного зміцнення. Це дасть можливість в 1,5 – 2 рази підвищити їх ресурс.

Для досягнення мети досліджень слід виконати наступні завдання. По-перше, потрібно провести аналіз матеріалів для дискретного електроіскрового зміцнення деталей машин. Вони обираються за умов достатньої твердості, адгезії і технологічності. Необхідно визначити оптимальні технологічні режими нанесення зон дискретного зміцнення. Це вимагає розроблення комп'ютерної моделі для моделювання напружено-деформованого стану дискретно зміцнених деталей з використанням методу скінчених елементів. На основі дослідження комп'ютерних моделей будуть визначені оптимальні геометричні параметри технології дискретного зміцнення. Зокрема, це стосується коефіцієнта дискретності (тобто до відношення площі обробленої поверхні до загальної площі деталі); форми дискретних плям (смуги, круги, овали, зигза-

ги, концентричні кола тощо); глибини обробки (діапазон – від 50 до 400 мкм).

Таким чином, при цьому будуть вирішені нові завдання, результати розв'язання котрих відзначаються новизною, унікальністю та перспективністю. Перспективною є сама ідея дискретного зміцнення [1–4, 19, 20]. Вона кардинально відрізняється від традиційних технологій, які в основному є континуальними. Варто зазначити, що сама ідея дискретних технологій уже пропонувалася. Проте вона реалізована для нанесення кластерних покриттів. А технологія, що пропонується, передбачає не покриття, а електроіскрове зміцнення. Таким чином, на відміну від інших, у новій технології поєднуються дискретність та електроіскрове зміцнення. Саме цим досягається підвищення зносостійкості.

По-друге, унікальними та новими є теоретичні розробки, які дадуть змогу розв'язати поставлену задачу. Ці розробки спрямовані на подолання принципових протиріч при розробці нових технологій. Ці протиріччя виникають через те, що множина значимих чинників є невідомою на початку досліджень. Вона є варіюваною, змінною та поповнюваною. Саме через ці особливості важко застосовувати традиційні процедури оптимізації. Тому пропонується розробити теорію розширеного параметричного моделювання. Ця розробка – основний фундамент, що буде поєднувати усі різноманітні математичні моделі для дослідження технологій дискретного зміцнення. І саме за допомогою цієї теорії можна здійснити синтез варіантів та параметрів самого технологічного процесу.

По-третє, пропонується просуватися уперед не шляхом ускладнення існуючих технологій, а шляхом застосування принципово нових рішень. Це, так би мовити, новий вектор розвитку. Саме така стратегія може дати значний позитивний ефект. Автори робіт [1–21] цю стратегію уже заклали у ході рішення частинних задач.

По-четверте, пропонується технологія є комплексною, синергетичною. Це стосується ідей дискретності, електроіскрового зміцнення. Крім того, це стосується і результуючого ефекту: підвищується твердість і зносостійкість. Цим дана пропозиція відрізняється від інших.

По-п'яте, технологія дискретного зміцнення має цілий комплекс відмінностей від існуючих: низька потреба в енергії; не піддається дії основний матеріал деталі, а тільки локально покрово – поверхневі шари; практично екологічно нешкідлива; час обробки невеликий; низька загальна вартість.

Технологія має пряме практичне спрямування. Попередньо вона була емпіричним шляхом випробувана на тепловозних двигунах серії Д80 (ДП "Завод ім. Малишева", м. Харків), на тепловозних двигунах 5Д49 (тепловозоремонтний завод, м. Ізюм). Крім того, попередньо було проведено тестове зміцнення двигунів бронетранспортерів, установок для пуску реактивних снарядів "Град", шасі для військових машин "Мустанг" і "Лавина". Досягнуто збільшення ресурсу роботи цих машин у 1,5–3 рази.

Результати попередніх досліджень опубліковані у багатьох публікаціях [1–14].

Опис технології. Формування зносостійких поверхонь виконується наступним чином. На зовнішню поверхню виробу електроіскровим методом наноситься дискретне покриття з легувальних матеріалів у вигляді розташованих на певній відстані один від одного острівців або стрічок довільної конфігурації (рис. 3).

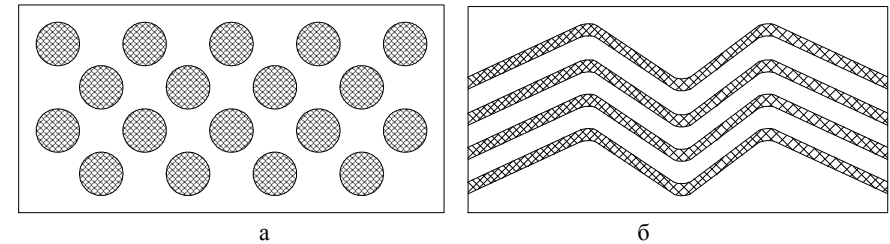


Рис. 3. Різновиди дискретних покриттів (схема): а – острівцеві; б – стрічкові

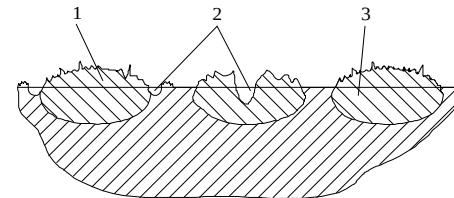


Рис. 4. Вид дискретного покриття (схема):
1 – верхній приповерхневий шар; 2 – каверна;
3 – легований (зміцнений) шар

Дискретне покриття має дві частини: верхній приповерхневий шар, який знаходиться над лінією поверхні деталі, і шар, який знаходиться під лінією поверхні деталі (рис. 4).

За рахунок високої температури і енергії розряду виникає перенесення легувального матеріалу з електрода (анода) на

катод (виріб) і одночасно у місці розряду на поверхні виробу відбувається локальне розплавлення металу основи, його легування перенесеним матеріалом і виникнення ерозійної лунки (каверни). Перенесений матеріал змішується з основним і в процесі наступного різкого охолодження у більшості випадків (якщо анодом є метал) формуються пересичені тверді розчини з вкрапленнями дрібнодисперсних надлишкових фаз. Цілоком природно, що ці зони відрізняються механічними властивостями, зокрема, твердістю, від металу основи. При цьому поверхня приповерхневої зони має розвинену форму у вигляді гострих виступів і западин, що є концентраторами напружень.

Після завершення нанесення дискретного покриття визначають максимальний його приріст над поверхнею $\Delta_{\max}$, а також максимальну глибину каверн $C_{\max}$ і розраховують припуск за умови видалення каверн (рис. 5): $h \geq C_{\max} + \Delta_{\max}$, де h – величина припуску, мм; $\Delta_{\max}$ – максимальний приріст дискретного покриття над поверхнею виробу, мм; $C_{\max}$ – максимальна глибина каверн, мм.

У випадку зрізу зовнішнього шару виробу на величину, дещо меншу за максимальну глибину каверн, на поверхні при експлуатації залишаються порожнини, які є ємкостями для мастила, за рахунок чого зменшується коефіцієнт тертя в момент запуску та зупинки машини (рис. 6).

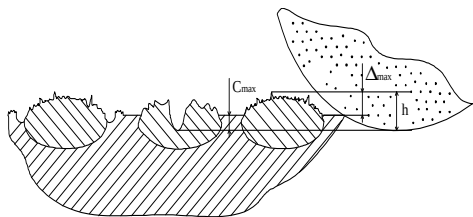


Рис. 5. Формування поверхні при шліфуванні

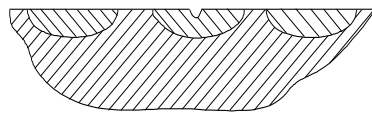


Рис. 6. Поверхня після шліфування

Таким чином, описаний спосіб електроіскрового легування є найбільш прийнятним для здійснення дискретного зміцнення поверхонь деталей, оскільки він має досить високу продуктивність, забезпечує стабільність процесу і дає змогу управляти величиною дискретності.

Таким чином, маємо схему технологічного процесу та деякі параметри. Потрібно провести синтез оптимальних параметрів: сили та тривалості струму; геометрії зон дискретного зміцнення; матеріалів електрода для легування. Це – задачі теоретичних розробок, лабораторних досліджень, комп'ютерних симуляцій та індустріальних випробувань [6].

Розробка наукових основ синтезу параметрів нової технології. При розробці принципово нових технологій однією з основних проблем є пошук оптимального рішення у нечітко визначеному та варійованому просторі чинників, при нечітких критеріях, обмеженнях та власне при невизначених характеристиках самого технологічного процесу. Це стосується також і, у першу чергу, науково-технічної проблеми розробки ефективних технологій поверхневого зміцнення високонавантажених елементів машин, що перебувають у рухомому контакті. Як показано вище, традиційні технології розв'язання даної проблеми мають цілу низку принципових недоліків, серед яких – накопичення небажаних залишкових деформацій деталі або вузла та неефективне поєднання механічних характеристик матеріалу у поверхневому шарі та у глибині матеріалу, з якого виготовлено деталь, що зміцнюється. Важливо і те, що традиційні технології можуть поліпшуватися в основному тільки за рахунок компромісних, а не оптимізаційних процедур. Вихід з цієї ситуації – відмова від жорсткої регламентації чинників, пошук принципово нових фізико-механічних процесів та оптимізація їх впливу на комплекс критеріїв, що визначають характеристики поверхневого зміцнення елементів машин. Проте для реалізації даного підходу потрібно, по-перше, як зазначалося вище, розробити теоретичну основу, математичний апарат для багатоваріантного дослідження та оптимізації характеристик стану поверхневого шару в поєднанні зі станом матеріалу на глибині, а, по-друге, власне провести із застосуванням розроблених підходів процес досліджень та синтезу схеми і параметрів нової технології. Для цього потрібно розв'язати наступні нові наукові проблеми та прикладні задачі:

- розробка нових теоретико-множинних підходів до генерації математичних, числових та фізичних моделей досліджуваних та створюваних

технологій та станів зміцнюваних елементів машин, що характеризуються єдиним способом опису, пристосованістю до роботи з нечіткими, поповнюваними та зменшуваними множинами чинників, а також інтегрованістю у сучасні методи наукового дослідження;

- реалізація розробленого підходу у комплексній математичній моделі дослідження напружено-деформованого стану елементів машин, що перебувають у стані контактної взаємодії;

- розробка спеціалізованого програмно-модельного комплексу для числових досліджень напружено-деформованого стану тіл складної форми, структури, що природним чином інтегрується у сучасні системи комп'ютерного моделювання;

- формування потужного програмно-апаратного комплексу, що має можливість розв'язувати масштабні науково-технічні задачі, які виникають при багатоваріантних дослідженнях фізико-механічних систем з багатомільйонною кількістю невідомих;

- аналіз напружено-деформованого стану елементів досліджуваних машин, поверхні яких оброблені за новою технологією зміцнення, що пропонується у роботі, та розробка науково обґрунтованих рекомендацій щодо технологічних режимів запропонованого технологічного процесу.

Оскільки перелічені наукові проблеми і задачі є новими, актуальними і важливими для широкого класу задач, які на даний час стоять перед механікою, технологією машинобудування та машинознавством, то для їх розв'язання були залучені самі передові теоретичні, комп'ютерно-інформаційні та апаратні розробки, системи та засоби. Наукові розробки, їх числова та програмно-апаратна реалізація здійснені в НТУ "ХПІ" протягом тривалого періоду, оприлюднені у багатьох публікаціях, висвітлені на десятках конференцій, семінарів, симпозіумів, зокрема у [7, 8, 15].

Розробка теоретико-множинного підходу до генерування моделей фізико-механічних процесів і станів складних та надскладних механічних систем. Як-що розглядати проблему розробки нових технологій поверхневого зміцнення високонавантажених елементів машин як одну із складових дослідження, аналізу та синтезу елементів складних та надскладних механічних систем, то можна вичленити загальні риси: з одного боку, наявність великої кількості інструментів досліджень напружено-деформованого стану, інших станів та фізико-механічних процесів, а з іншого боку – принципові труднощі, що постають при розв'язанні багатоваріантних задач параметричного або структурного аналізу, а тим більше – синтезу. Варто відзначити, що найбільш потужним методом досліджень реакції складних механічних систем на зовнішні дії є метод скінчених елементів (МСЕ). Проте він не дає змоги проводити дослідження при урахуванні чинників, що погано піддаються формалізації. Для усунення цього недоліку пропонується для створення варійованих моделей досліджуваних об'єктів залучити метод узагальненого параметричного опису складних механічних систем [15]. Запропонований підхід [15] дає змогу стави-

ти задачі параметричного аналізу і синтезу складних механічних систем, а також розрахунково-експериментальної ідентифікації операторів, що описують дані об'єкти.

Крім того, на цій основі можна будувати мета-системи автоматизованого дослідження даних об'єктів. Розглянемо, згідно з [15], технологію комп'ютерної симуляції із застосуванням даного підходу. Вона складається із задач:

- а) розробки програмного забезпечення;
- в) формування апаратного забезпечення;
- с) проведення числових досліджень.

Розробка програмного забезпечення. Сама комп'ютерна симуляція здійснюється за допомогою методу скінчених елементів та із залученням сучасних систем CAD/CAM/CAE. Пряме розв'язання задачі у цих CAD/CAM/CAE нерациональне (див. вище). У зв'язку з цим пропонується розв'язувати задачу не "ззовні" доповненням існуючого інструментарію автоматизованого проектування, а "зсередини", змінюючи сам спосіб опису і створення моделей досліджуваних об'єктів, у т.ч. їх скінченно-елементних моделей. З іншого боку, впровадження при цьому в традиційну схему CAD/CAM/CAE-системи нових якостей передбачається здійснювати за допомогою додаткових модулів. Крім того, оскільки навіть найпотужніші існуючі універсальні системи автоматизованого проектування (Pro/ENGINEER, CATIA, SolidWorks, ANSYS, NASTRAN, COSMOS/M, LS-DYNA) не надають способів розв'язання поставленої задачі в загальному випадку, представляється доцільним обійти цю проблему, пропонуючи загальний підхід, але такий, що реалізовується кожного разу для певного класу досліджуваних конструкцій (тобто замість відсутнього універсального інструменту пропонується реально здійснення технологія, що характеризується спільними прийомами при роботі з конкретними об'єктами).

Для розв'язання поставленої задачі пропонується залучити метод узагальненого параметричного опису елементів складних механічних систем [15]. При його використанні для опису того або іншого класу конструкцій формується узагальнений параметричний простір P , що є об'єднанням множин P_G, P_T, P_F :

$$P = P_G \cup P_T \cup P_F, \quad (1)$$

де P_G, P_T, P_F – множини узагальнених параметрів, що однозначно і несутеречно описують геометричні, технологічні і скінченно-елементні моделі досліджуваних об'єктів (рис. 7).

Самі множини P_G, P_T, P_F складаються з елементів, від яких вимагається наступне:

$$G = G(p), T = T(p), F = F(p) \quad \forall p \in P \quad (2)$$

є однозначними відображеннями з множини P у множину моделей G, T, F (див. рис. 7). Дане відображення не є в усіх випадках таким, що математично

строго формалізується. Але ця властивість, взагалі кажучи, в рамках запропонованого підходу і не потрібна.

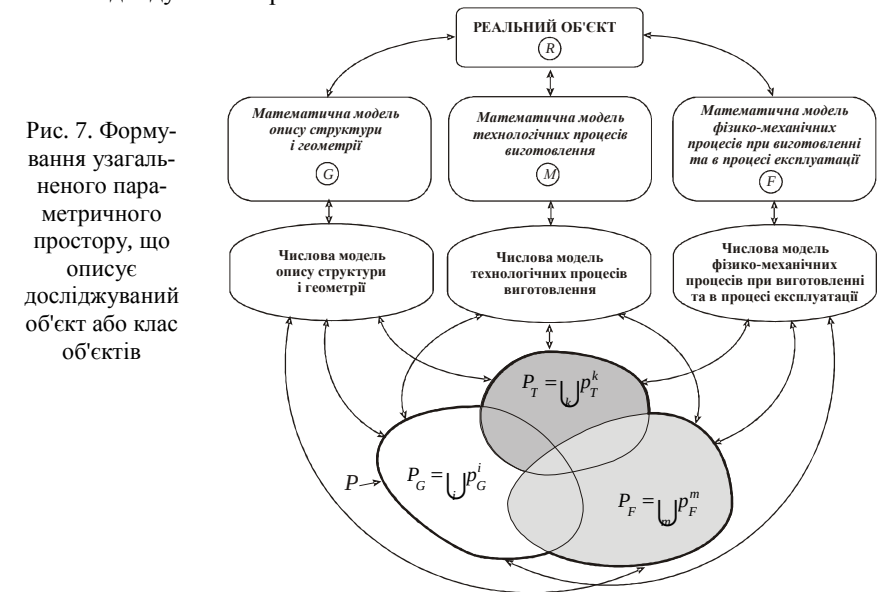


Рис. 7. Формування узагальненого параметричного простору, що описує досліджувані об'єкти або клас об'єктів

Якщо формалізація співвідношення (2) породжує в загальному випадку значні складнощі, то пропонується, щоб це відображення всього лише було однозначним, таким, що алгоритмізується, і коректним [15]:

$$\forall p \in P \exists \{G, T, F\}: G = G(p), T = T(p), F = F(p), \quad (3)$$

$$\{[G_1, T_1, F_1] = [G_2, T_2, F_2]\} \Rightarrow p_1 = p_2, \quad (4)$$

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} \|p_\epsilon - p\| = 0 \Rightarrow \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \|[G_\epsilon, T_\epsilon, F_\epsilon] - [G, T, F]\|^* = 0, \quad (5)$$

де $\|\bullet\|$ – деяка норма; $\|\bullet\|^*$ – деяка псевдонорма.

У просторі узагальнених параметрів кожним елементом є об'єкт будь-якої природи: число, структура, функція, розподіл, множина. У зв'язку з цим поняття норми, що фігурує в (5), вимагає конкретизації залежно від складу множини параметрів, які становлять дану множину. Відповідно потрібне і уточнення поняття псевдонорма по відношенню до описуваних моделей (в даному випадку потрібна лише оцінка "близькості" моделей G, T, F).

Розставивши таким чином акценти, можна формалізувати процес роботи з узагальненими параметрами, розповсюдивши на них традиційний інструментарій параметричного аналізу і синтезу.

Крім того, саме існування співвідношень (2), що описують комплекс мо-

делей $M = \{G, T, F\}$, не розв'язує поставлену задачу. Необхідно розробити, враховуючи складність формалізації (2), технології реалізації відповідності $p \rightarrow M$:

$$M = M(p). \quad (6)$$

Виникаюча проблема видається простою лише на перший погляд. Насправді саме різноманітність узагальнених параметрів p і неформалізованість співвідношень (2), (6) представляють у процесі досліджень основні перешкоди для їх інтенсифікації на основі автоматизації при збереженні параметричності.

Потрібно відзначити, що багато систем CAD/CAM/CAE мають широкий арсенал автоматизації багатьох етапів проектування окремих видів конструкцій (наприклад, модулі автоматизованого проектування елементів технологічного оснащення, двигунів внутрішнього згоряння тощо). В той же час множина елементів p в даному випадку заздалегідь обмежується визначеним кругом, вихід за який пов'язаний із втратою автоматизації і параметричності. Проте саме цей спосіб можна узяти за прототип при алгоритмізації технології генерування комплексу моделей M за набором узагальнених параметрів.

На рис. 8 представлена схема функціонування такої технології моделювання. Особливість даної технології полягає в тому, що між комплексом математичних моделей $M = \{G, T, F\}$ і універсальними системами CAD/CAM/CAE поміщається спеціалізована система-транслятор, яка для конкретного класу об'єктів реалізує переведення співвідношень (2), (6) в набори інструкцій $S_G = S_G(p)$, $S_T = S_T(p)$, $S_F = S_F(p)$ в форматі універсальних систем CAD/CAM/CAE. Це дозволяє використовувати на етапі моделювання всю потужність сучасних САПР, після чого проводити параметричний аналіз і синтез. Відповідний блок керування і спеціалізована база даних дозволяють не лише координувати інформаційні потоки в процесі автоматизованого про-

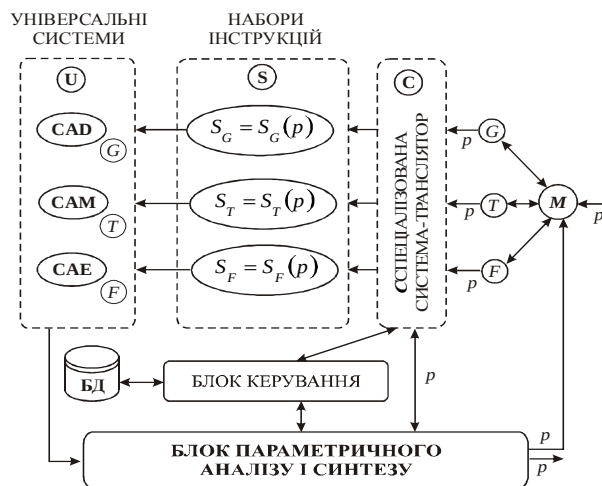


Рис. 8. Автоматизація етапів моделювання на основі узагальненого параметричного підходу і спеціалізованих інтегрованих систем автоматизованого аналізу і синтезу елементів складних механічних систем

ектування, але і організовувати отримувані дані в структури, придатні для спеціалізованих баз знань і експертних систем.

Природно, що запропонована технологія за охопленням істотно ширше початково поставленої задачі автоматизованого скінченно-елементного моделювання. Проте саме в її рамках створюються замкнуті інформаційні потоки, які, як випливає з рис. 7, між окремими підсистемами є такими, що взаємно перетинаються. Таким чином, щоб ліквідувати "вузьке місце" автоматизації скінченно-елементного моделювання, потрібно побудувати технологію автоматизації всього процесу моделювання, звуживши при цьому охоплення об'єктів до конкретного їх типу.

Саме надзвичайна гнучкість і переналагодження запропонованого в роботі підходу дозволяє охоплювати цілі класи конструкцій і технологій в ході досліджень, що вбудовуються в процес проектування і технологічної підготовки виробництва нових виробів, а також ремонту і зміцнення із застосуванням сучасних засобів автоматизації – систем CAD/CAM/CAE/PDM. У цьому – унікальність та новизна підходу.

Для розв'язання масштабних задач комп'ютерної симуляції потрібно мати, крім програмного забезпечення, ще й відповідне апаратне забезпечення. В НТУ



Рис. 9. Центр "Тензор" та комп'ютерний кластер "Політехнік-125": процесорні ядра – 64; пам'ять – 128 Gb; продуктивність – 0,5 Tflops

"ХПІ" такий апаратний комплекс створено. Це комп'ютерний кластер "Політехнік-125" на 64 процесорних ядрах зі 128 гігабайтами оперативної пам'яті, а також програмні комплекси Pro/ENGINEER, SolidWorks, ANSYS, Nastran, LS-DYNA (рис. 9). Він був відкритий у кінці 2009 р. і дає змогу розв'язувати задачі MCE із кількістю невідомих до 100 млн. Таким чином, створено унікальний потужний інструмент комп'ютерного моделювання – програмно-апаратний комплекс з кластером "Політехнік-125" у центрі

"Тензор" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". На його базі проведені усі числові дослідження із залученням програмно-апаратних засобів комп'ютерного моделювання складних систем і технологій.

Числові дослідження дискретно зміцнених деталей машин. Розроблений програмно-апаратний комплекс дає можливість проводити комп'ютерну симуляцію. Розглянемо деякі частинні задачі аналізу напружено-деформованого стану та синтезу оптимальних параметрів технології дискретного зміцнення.

На рис. 10 наведена схема нанесення зміцнюючих зон (на прикладі опорної частини вала), а на рис. 11 – параметри технологічного процесу.

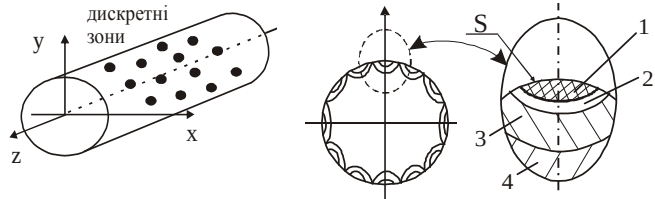


Рис. 10. Схема нанесення розрядів при дискретно-континуальному зміцненні (S – поверхня зміцнення) та характерні ділянки зони зміцнення: 1 – зміцнений шар; 2 – перехідна зона; 3 – підшар; 4 – основний матеріал

Як показали металографічні дослідження, на поверхні зміцнення S (див. рис. 10, 11) в тіло основного металу 4 вкраплюється високолегований метал (дискретна зона зміцнення – ДЗЗ – діаметром d та глибиною h). Ця зона складається з поверхневого зміцненого шару товщиною b . Розміщення ДЗЗ на поверхні S характеризується кроками τ_{xy} в окружному напрямі та τ_z – в осьовому. При цьому дискретність покриття поверхні S визначається залежністю $f = \pi d^2 / 4 \tau_{xy} \tau_z$. Властивості матеріалів: $E_i, \nu_i (i=1,2,3,4)$ – відповідно модулі пружності та коефіцієнти Пуассона (номери відповідають позначенням на рис. 10); аналогічна нумерація для σ_T^i, σ_e^i – границі текучості та границі міцності матеріалів. Таким чином, наочний перелік параметрів технологічного процесу дискретно-континуального зміцнення – $P = \{d, \tau_z, \tau_{xy}, E, \nu, \sigma_T, \sigma_e, h, b, H\}$, де $E, \nu, \sigma_T, \sigma_e$ – це вся сукупність індексованих за номером матеріалу фізико-механічних та механічних властивостей матеріалів.

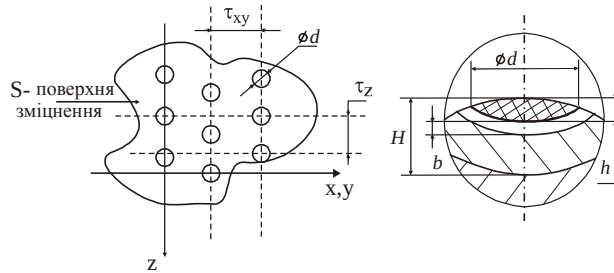


Рис. 11. Параметри розміщення ДЗЗ

На першому етапі дослідження визначається характер напружено-деформованого стану (НДС) в області окремої дискретної зони зміцнення. На рис. 12 проілюстрована розрахункова схема для визначення осесиметричної картини НДС в області ДЗЗ, на рис. 13 – скінченно-елементна модель з 1,5 млн. вузлів та 403 тис. елементів, що побудована для проведення досліджень.

Якісні картини компонент НДС при співвідношенні модулів пружності $\alpha_1 = E_1 / E_4 = 1,2; \alpha_2 = E_2 / E_4 = 1,1; \alpha_3 = E_3 / E_4 = 1,0; \beta_1 = \nu_1 / \nu_4 = 1,0; \beta_2 = \nu_2 / \nu_4 = 1,0;$

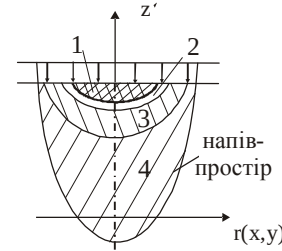
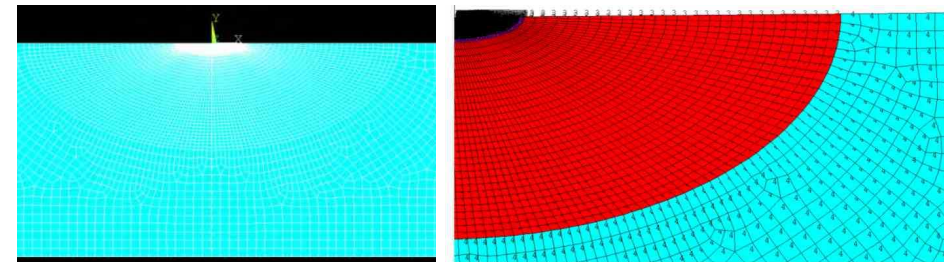


Рис. 12. Розрахункова схема для визначення НДС в області окремої ДЗЗ

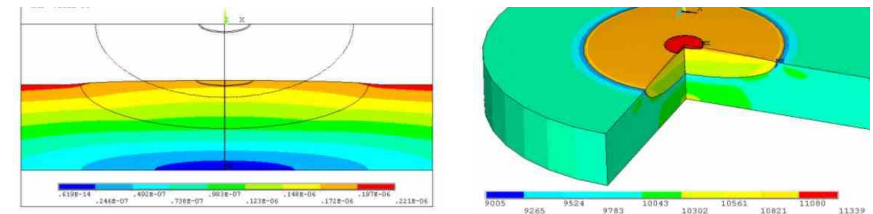
ефект, тут названий Δ -ефект, є відносно стабільним при зміні контактного тиску, тобто чим більший тиск, тим більше деформується тіло деталі, тим більший ефект перерозподілу зусиль контактної взаємодії на користь переважного спряження з ДЗЗ.



Уся модель

Фрагмент в області ДЗЗ

Рис. 13. Скінченно-елементна модель



Вертикальні переміщення

Інтенсивність напружень за Мізесом

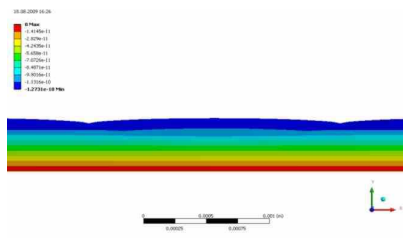
Рис. 14. Компоненти НДС в області ДЗЗ

Для аналізу впливу різних факторів на НДС реальних конструкцій, підданих дискретно-континуальному зміцненню, побудовано просторову СЕМ фрагменту приповерхневої частини опорної частини вала після дискретно-континуального зміцнення. Оскільки для повного моделювання опорної частини вала потрібна надто велика (сотні мільйонів ступенів вільності) СЕМ, то було визначено репрезентативну множину ДЗЗ, що входить до складу

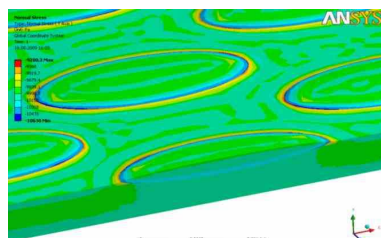
відповідного секторного вирізу (рис. 15).

На рис. 16 – 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 дискретних зон зміцнення.

Кількість варійованих параметрів P технологічного процесу у даному випадку довільна, сама множина P може бути поповнювана. Це є надзвичайно важливою перевагою запропонованого теоретичного підходу до розв'язання задачі. Крім того, математична модель дозволяє досліджувати всі аспекти НДС, а скінченно-елементна модель відтворює усі переваги запропонованого підходу. Кількість скінченних елементів навіть для окремого секторного вирізу вала досягає кількох мільйонів одиниць ступенів вільності.



Деформований стан



Напружений стан

Рис. 16. Картина переміщень та напружень у приповерхневому шарі деталі

Тому для дослідження НДС об'єкта, представленого на рис. 15, потрібні великі обчислювальні ресурси, які забезпечує створений і описаний раніше програмно-апаратний комплекс. Саме ці обставини дали можливість провести комплекс досліджень, деякі результати яких представлені на рис. 16–18.

Ще більші ресурсні вимоги – при повномасштабному моделюванні макрочастини деталі або усієї деталі. При цьому на перший план виступає проблема різномасштабності зон, що досліджуються: від кількох мікрометрів до метрів. Для узгодження сіток скінченних елементів автори розробили та застосували спеціальні алгоритми.

Як видно із порівняльного аналізу одержаних розподілів компонентів НДС (рис. 16-18), збільшення відносної жорсткості матеріалу зміцнення сприяє підсиленню позитивного впливу виявленого Δ -ефекту зміцнення та збільшення стійкості поверхні S до зношування. Що стосується впливу коефіцієнта тертя f , то спостерігається рекомендована зона ($f_w \in [0,6; 0,8]$), при

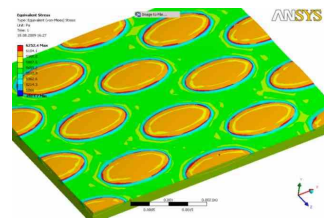


Рис. 15. СЕМ підповерхневого шару опорної частини вала та еквівалентні напруження за Мізесом

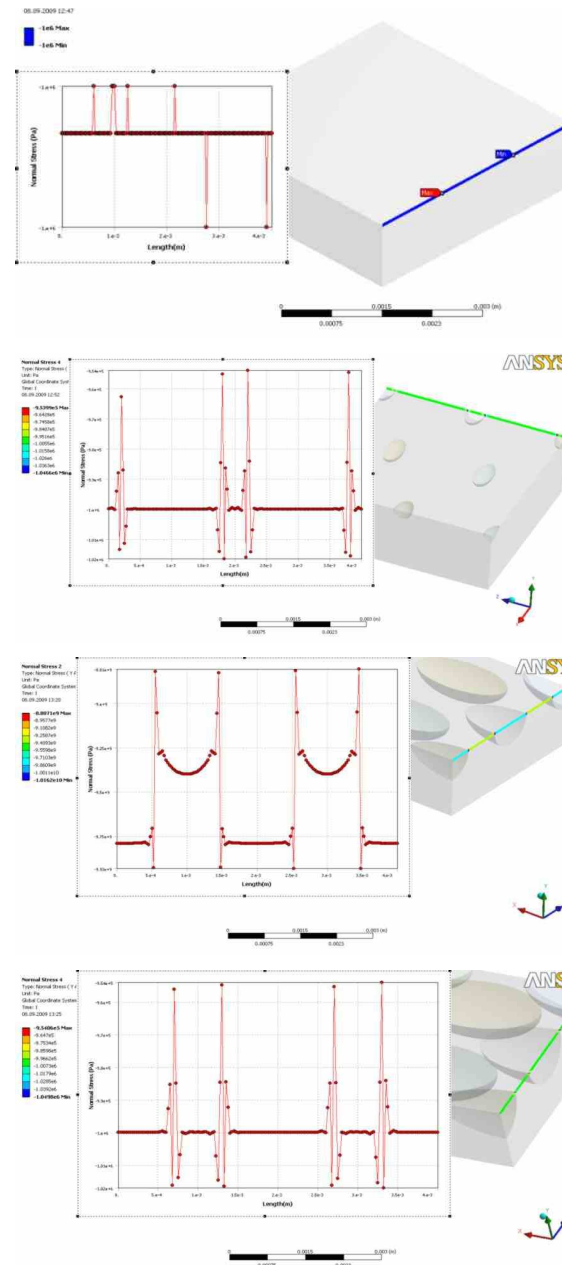


Рис. 17. Картини розподілу контактного тиску у поверхневому шарі деталі

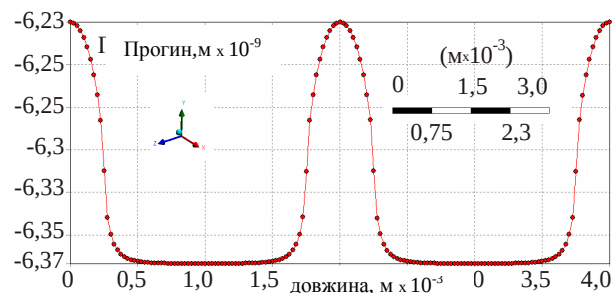
попаданні коефіцієнта дискретності в котрий Δ -ефект найбільш дієвий.

Як показав аналіз напруженого стану опорної частини вала, крім виявленого Δ -ефекту, значення має ще й так званий " σ -ефект". Він полягає в тому, що при кристалізації 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" досягається в діапазоні $f \in [0,5 \div 0,8]$. Таким чином, співставлення " Δ -ефекта" та " σ -ефекта" дає змогу визначити рекомендований інтервал параметру дискретності покриття:

$$f^* \in [0,65 \div 0,75].$$

Підсумовуючи, можна стверджувати, що в результаті комплексу пробних досліджень у першому наближенні обґрунтовані раціональні параметри запропонованого технологічного процесу дискретно-континуального зміцнення високонавантажених елементів машин, механізмів і окремих деталей.

Рис. 18. Картина переміщень



Лабораторні дослідження. Для вивчення макроструктури поверхні зразків з дискретно зміцненими зонами використовували стереоскопічний мікроскоп МВС-10 зі збільшенням від 3 до 150 разів. Для металографічних досліджень використовували поперечні і поздовжні шліфи зразків, підданих дискретному зміцненню. Дослідження мікроструктури проводили на металографічному мікроскопі Неофот-21 в діапазоні збільшень від 100 до 600 разів.

Для вивчення мікроструктури при великих збільшеннях був використаний растровий електронний мікроскоп РЕМ-106 SELMI з високою роздільною здатністю: в режимі високого вакууму 4 нм, низького вакууму – 6 нм.

Рентгеноструктурний фазовий аналіз зразків проводили на рентгенівській установці УРС-55 в камері Дебая з діаметром 57,3 мм у випромінюванні трубки з залізним анодом методом зйомки рентгенограм від "шліфа". Крім того, був використаний дифрактометр ДРОН-3, на якому були отримані профілі дифракційних максимумів.

Розподіл легувальних елементів у зміцнених зразках вивчали за допомогою рентгенівського мікроаналізатора MAP-3, а також з використанням спеціальної приставки до електронного мікроскопа РЕМ-106. Триботехнічні характеристики визначалися на машинах тертя СНЦ-2 і СМТ-1. Випробування на втому проводили на машині МУІ-6000 за схемою чистого згину. База випробувань – 10^7 циклів.

Для електроіскрової обробки використовували електроди зі сталей 08Х18Н10Т, Р6М5 та ШХ15. Ці сталі належать до різних структурних класів (перша – до аустенітного, друга – до ледебуритного, третя – до мартенситного). Дослідження проведені на високоміцному легованому чавуні та на сталях 42ХМФА і 45.

Характер поверхні, яка формується при дії дискретних розрядів, показаний на рис. 19. Вона має велику шорсткість. Зона дискретного зміцнення зразків на поперечних шліфах після шліфування поверхні наведена на рис. 20.



Рис. 19. Зовнішній вигляд зони дискретного зміцнення: х 3

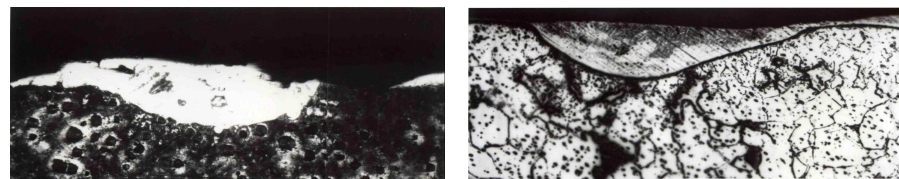


Рис. 20. Мікроструктура поперечного шліфа зразків, зміцнених дискретним методом; х 100; електрод – сталь 08Х18Н10Т: а – високоміцний чавун; б – сталь 42ХМФА



Рис. 21. Схематичне зображення зони дискретного зміцнення: 1 – "білий" шар; 2 – "підшар"; 3 – основний метал

При достатньому збільшенні під "білим" шаром можна побачити перехідну зону ("підшар"). Його глибина змінюється в межах 25-70 мкм. Таким чином, зону дискретного зміцнення можна представити так, як на рис. 21.

Характер структури і розподіл елементів по перерізу зони дискретного зміцнення в чавуні наведені на рис. 22-23.

Слід звернути увагу на те, що гомогенізація складу у плямі не встигає відбуватися: розкид значень хрому близько 37 %, нікелю ~ 21 %. При цьому в структурі залишається нерозчинений графіт (рис. 24). Мікроструктура та розподіл елементів у сталі 45 при дискретній обробці електродом зі сталі 08Х18Н10Т наведені на рис. 25-27.

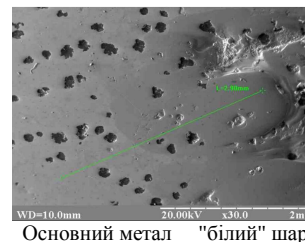


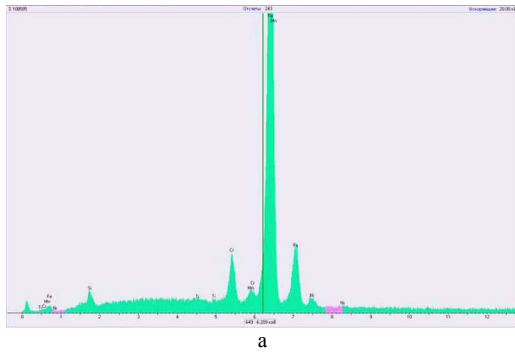
Рис. 22. Структура чавуну у дискретно зміцненій зоні; х30

З даних, наведених на рис. 25 та 26, видно, що перерозподіл легувальних елементів між основою (сталь 45) та металом, нанесеним при електроіскровому розряді електродом зі сталі 08Х18Н10Т, здійснюється у вузькому інтервалі. Вміст легувальних елементів на поверхні плями практично співпадає з їх кількістю на глибині 30 мкм, але вже на глибині від поверхні 50 мкм вони не реєструються (рис. 27). Отже, зона перерозподілу має товщину близько 10 мкм. Цей рисунок також свідчить, що зміцнена зона являє собою суміш аустеніту та фериту, оскільки у спектрі присутні лінії Feα та Feγ (рис. 27).

Також було досліджено вплив сили струму розряду на мікротвердість зони дискретного зміцнення. Визначення мікротвердості "білого" шару при обробці чавуну показало, що вона перевищує мікротвердість основного металу. Режим обробки і результати досліджень наведені в табл. 1.

Крім того, було досліджено вплив дискретності на коефіцієнт тертя. У цих експериментах дискретність (тобто відношення площі ДЗЗ до загальної

площі поверхні деталі) змінювали від $\phi = 0$ до $\phi = 100\%$ через 20% . Зміцнення здійснювали при струмі розряду $I_p = 60\text{--}70\text{ А}$ і товщині електрода $S=1\text{ мм}$. Результати впливу величини дискретності ϕ на коефіцієнт тертя $f_{тр}$ показані для навантаження 1 кН на рис. 28. Досліджено було також зносостійкість дискретно зміцнених деталей. Результати для сталі (ролик) і бронзи (колодка) – на рис. 29.



Информация

Напряжение (кВ): 20.00
Сумма %: 100.00

Элемент	Инт.	C %
Fe K	36018	92.96
Ni K	529	2.47
Cr K	3309	2.18
Mn K	618	1.64
Si K	909	0.70
Ti K	74	0.06

Рис. 23. Спектр випромінювання (а) і середній вміст елементів в полі (б)

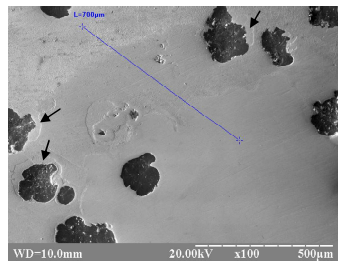


Рис. 24. Мікроструктура чавуну в зоні дискретного зміцнення; $\times 100$

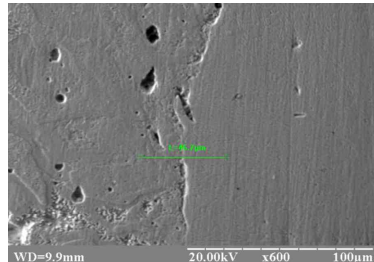


Рис. 25. Мікроструктура сталі 45 (зліва) та матеріалу електрода (справа), $\times 600$

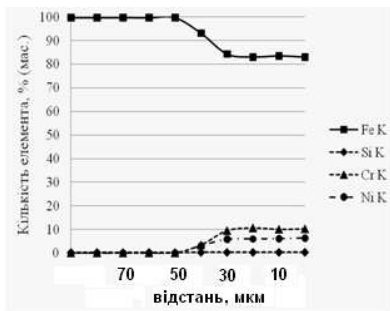


Рис. 26. Розподіл елементів по перерізу поверхневого шару: зліва – сталь 45, справа – матеріал електрода

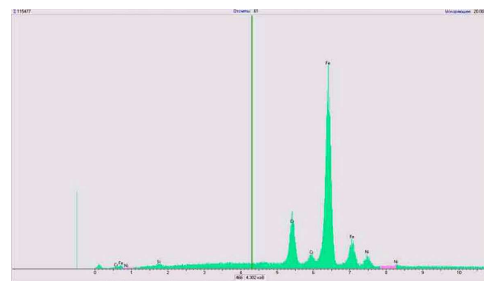


Рис. 27. Спектр випромінювання сталі 45

Таблиця 1
Вплив струму розряду на глибину зміцненого шару, мікротвердість та наявність дефектів при обробці чавуну різними електродами

Матеріал електрода	Струм розряду I_p , А	Глибина зміцненого шару, мкм	Мікротвердість, МПа	Наявність дефектів
08X18H10T	20	10–11,0	580–750	немає
	40	50–160	580–900	немає
	60	250–400	600–1000	немає

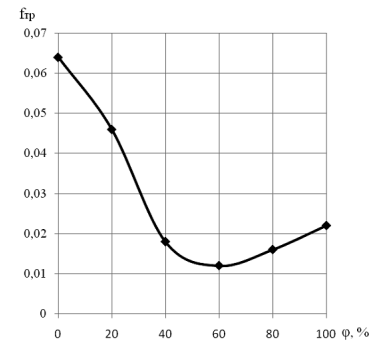


Рис. 28. Залежність коефіцієнта тертя f від величини дискретності ϕ для навантаження 1 кН

З виконаного аналізу можна зробити висновок, що дискретне зміцнення суттєво знижує знос як валів, так і вкладишів незалежно від матеріалу. Це можна пояснити таким чином.

Як відомо, при виборі матеріалу вкладиша користуються принципом Шарпі – структура матеріалу має бути мікрогетерогенною, тобто такою, у якій чергуються м'які і тверді структурні складові. Що ж до структури матеріалу вала, то при існуючих способах зміцнення поверхні (гартуванні СВЧ, азотуванні) вона має однорідний характер і рівномірний розподіл твердості по поверхні тертя.

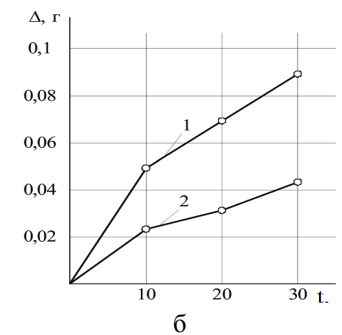
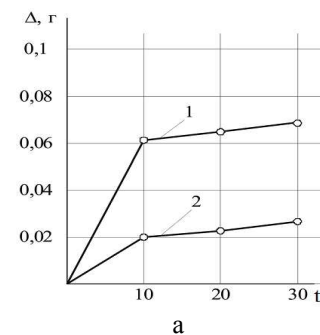


Рис. 29. Залежність зносу матеріалу ролика (а) і колодки (б) від часу випробувань: 1 – азотування; 2 – дискретне зміцнення

При дискретному зміцненні на поверхні вала утворюється мікрогетерогенна структура, в якій чергуються зміцнені і знеміцнені зони, тобто принцип Шарпі реалізується і для вала. Це створює кращі умови для утримання мастильного матеріалу між шийкою вала і вкладишем, повністю виключає можли-

вість сухого тертя навіть при достатньо високому питомому тиску, а отже, підвищує зносостійкість і зменшує зношувальну здатність матеріалу вала.

Визначено також вплив дискретного зміцнення на опір втомі чавунних зразків. Установлено, що дискретне зміцнення не знижує втомної міцності у порівнянні зі стандартним режимом обробки (нормалізація з високим відпуском) за умови відсутності на поверхні дефектів. Отриманий результат дає підстави вважати, що границя між зміцненим шаром і основним матеріалом не є технологічним концентратором, який знижує втомну міцність при дискретному зміцненні, тому даний спосіб можна рекомендувати для зміцнення не тільки чавуну, але й інших матеріалів.

Таким чином, проведені лабораторні дослідження продемонстрували високі триботехнічні характеристики деталей машин після дискретного зміцнення. Це свідчить про новизну та ефективність даного способу їх зміцнення.

Висновки. Описані у роботі нові теоретичні розробки, створені математичні моделі, унікальні програмно-модельні та програмно-апаратні комплекси, а також власне результати числових та лабораторних досліджень (які частково фрагментарно описані у попередніх роботах [1–14]) дозволяють зробити наступні висновки.

1. Запропоновані у роботі нові теоретичні основи узагальненого параметричного методу моделювання фізико-механічних процесів у складних та надскладних механічних системах створюють потенційні можливості для глибокого аналізу та синтезу нових технологій зміцнення високонавантажених елементів машин різного призначення.

2. Розроблене теоретико-множинне математичне та програмне забезпечення у процесі досліджень дозволило виявити 2 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'єкта із застосуванням нової дискретно-континуальної технології, який після накладення робочих напружень створює такий результуючий напружений стан, що значно дальший від небезпечного рівня, ніж для незміцнених деталей машин.

3. Комплексне дослідження напружено-деформованого стану, мікроструктури та триботехнічних характеристик високонавантажених елементів машин, зміцнених за допомогою нової запропонованої технології, дало змогу отримати якісні та кількісні залежності деяких параметрів та визначити рекомендовані інтервали для їх вибору. Лабораторні дослідження у цілому підтвердили ефективність рекомендацій, розроблених на основі числових досліджень, та, що особливо переконливо, у ході великої кількості експериментальних досліджень та при впровадженні у промислову практику [3].

Таким чином, у результаті числових та лабораторних досліджень одержані позитивні результати з вирішення проблеми дискретного зміцнення поверхонь важконавантажених деталей машин. Побудовані моделі та розробле-

ні підходи будуть застосовані у подальших дослідженнях елементів машин.

Список літератури: 1. *Шеремет В.Н.* Повышение ресурса тяжело нагруженных элементов ДВС путем дискретного упрочнения деталей. Моделирование напряженно-деформированного состояния / В.Н. Шеремет, Н.А. Ткачук, В.Г. Гончаров // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – №2. – С. 118–123. 2. *Ткачук М.А.* Нові технології дискретного зміцнювання високонавантажених елементів машин: напружено-деформований стан приповерхневих шарів / М.А. Ткачук, В.М. Сапожников, В.М. Шеремет, Т.О. Васильєва, А.В. Грабовський // Механіка та машинобудування. – 2010. – №1. – С. 61–65. 3. *Гончаров В.Г.* Підвищення ресурсу транспортної техніки удосконаленням технології ремонту колінчастих валів : Дис... канд. наук: 05.22.20 – 2008. 4. *Посвятенко Е.К.* Підвищення ресурсу тепловозів на базі технології дискретного зміцнення деталей форсованих дизелів / Е.К. Посвятенко, В.Г. Гончаров, С.С. Д'яченко, М.А. Ткачук // Сучасні технології в машинобудуванні. 36. наукових праць. – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – Вип. №5. – С. 60–75. 5. *Посвятенко Е.К.* Качество поверхности, обработанной деформирующим протягиванием / Э.К. Посвятенко, А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, Э.И. Гриценко. – Киев: Наук. думка, 1977. – 188 с. 6. *Гончаров В.Г.* Дискретная обработка – эффективный способ упрочнения деталей машин / Б.В. Савченков, В.Г. Гончаров, А.Н. Леоненко // Механіка та машинобудування. – Х., 2010. – №1. – С. 44–49. 7. *Ткачук М.А.* Розробка наукових основ створення сприятливих поверхневих дискретно-континуальних полів напружень у високонавантажених елементах машин / М.А. Ткачук, В.М. Шеремет, Г.В. Ткачук, А.В. Грабовський // Механіка та машинобудування. – 2009. – №1. – С. 148–157. 8. *Шеремет В.М.* Дослідження напружено-деформованого стану деталей машин з дискретним зміцненням // В.М. Шеремет, М.А. Ткачук, Т.О. Васильєва // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск Машинознавство та САПР. – 2010. – №19. – С.150–155. 9. *Д'яченко С.С.* Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах. М.: Металлургия, 1982. – 128 с. 10. *Д'яченко С.С.* Физические основы прочности металлов / С.С. Д'яченко, В.Б. Рабухин – Харьков: Вища школа. – 1982. – 315 с. 11. *Dyachenko S.S.* Einfluss der Realstruktur auf Phasenumwandlungen und die Eigenschaften von Stahl / S.S. Dyachenko // Termomechanische Behandlung von Stahl. – Dresden: 1987. – S. 266–280. 12. *Материаловедение.* Учебник / С.С. Д'яченко, И.В. Дошечкина, А.А. Мовлян, Э.И. Плешаков. Под ред. Проф. С.С. Д'яченко. – Харьков: ХНАДУ. 2010. – 464 с. 13. *Д'яченко С.С.* Нанотехнології в сучасному матеріалознавстві – погляд у майбутнє / С.С. Д'яченко // Новий колегіум. – Х., 2010. – №4–5. – С. 16–22. 14. *Гончаров В.Г.* Дискретные покрытия – эффективный способ упрочнения деталей автомобилей / В.Г. Гончаров, Б.В. Савченков, Н.Г. Александров // Сб. докл. Девята научно – техническа конференция с международно участие. "Транспорт, экология – устойчиво развитие" – Варна: Изд. ТУ – Варна. – 2003. – С. 282–289. 15. *Ткачук Н.А.* Конечно-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / Н.А. Ткачук, Г.Д. Гриценко, А.Д. Чепурной, Е.А. Орлов, Н.Н. Ткачук // Механіка та машинобудування. – 2006. – №1. – С. 57–79. 16. *Износостойкость* сплавов с дискретными электроискровыми покрытиями / Е.К. Соловых, Б.А. Ляшенко, Э.К. Посвятенко, А.Н. Безрукавый // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн.зб. – К.: НАУ, 2006. – Вип. 46. – С. 160–168. 17. *Посвятенко Е.К.* Низькочастотне іонно-імпульсне азотування як метод інженерії поверхні деталей ДТЗ / Е.К. Посвятенко, В.В. Алексєєв // Вісник Національного транспортного університету: в 2-х ч. – К.: НТУ, 2007. – Вип. 15. – Ч. 1. – С. 25–33. 18. *Вплив* дискретних покриттів та холодного пластичного деформування на дисипативні властивості матеріалів / А.П. Яковлев, Е.К. Посвятенко, О.В. Мельник, А.М. Безрукавий // Вісник Національного транспортного університету: в 2-х ч. – К.: НТУ, 2008. – Вип. 17. – Ч. 1. – С. 22–29. 19. *Посвятенко Э.К.* Повышение износостойкости коленчатых валов форсованных дизелей большой мощности / Э.К. Посвятенко, В.Г. Гончаров, С.С. Д'яченко // Резание и инструмент в технологических системах. 2009. – Вип. 77. – С. 53–65. 20. *Посвятенко Е.К.* Основні напрямки забезпечення високих технічних характеристик форсованих двигунів та важких засобів транспорту / Е.К. Посвятенко // Східно-Європейський журнал передових технологій в газотурбобудуванні. – Харків, 2011. – Вип. 3/10 (51). – С. 53–56. 21. *Посвятенко Е.К.* Безводневе азотування в системі методів інженерії поверхні деталей машин / Е.К. Посвятенко, В.В. Алексєєв // Systemy i środki transportu samochodowego. – Rzeszow, 2011. – С. 101–104/

Поступила в редакцію 15.09.11