

Ткачук М. А., д-р техн. наук; Грабовський А. В., д-р. техн. наук; Кравченко С. О., д-р техн. наук; Ткачук М. М., д-р техн. наук; Лещенко В. М.; Кохановська О. В.; Марусенко С. І.; Храмцова І. Я.; Бондаренко Л. М.; Коба А. М.; Льозний О. С.

СИНТЕЗ ПРОЄКТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ УСТАНОВОК ДЛЯ ДИСКРЕТНОГО ЗМІЦНЕННЯ МАШИНОБУДІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Вступ.

Існуючі способи зміцнення робочих поверхонь елементів машинобудівних конструкцій не дають можливості отримати необхідний рівень експлуатаційних характеристик їхніх вузлів, що зумовлює значно менший ресурс деталей порівняно з вимогами сьогодення. Традиційні технології зміцнення також не забезпечують необхідного поєднання властивостей серцевини та поверхні деталей та не дають можливість повторного їх використання.

Тому потрібне створення проривних технологій зміцнення деталей машин на розвиток робіт [1–4].

Аналіз методу дискретного зміцнення поверхонь тертя чавунних і сталевих деталей елементів машин. Останніми роками активний розвиток отримали процеси дискретної обробки поверхонь, які дають можливість отримати на них чередування у заданій послідовності (дискретно) високоміцних і пластичних мікроділянок, аналогічно до природних композиційних матеріалів, армованих твердими та міцними фазами [1-4]. 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 деталі, а й забезпечити високі трибомеханічні характеристики поверхонь, що працюють у контакті із контртілом, і при цьому не збільшити зношувальної здатності матеріалу, тобто не призвести до прискореного зношування деталей.

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 із хрому або нікелю з ультрадисперсними зносостійкими частинками карбіду 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 у різних галузях техніки для підвищення зносостійкості деталей отримав спосіб створення поверхонь із рівномірно розташованими мікрозаглибинами. Він досить успішно використовується у циліндрах двигунів, підшипниках, плунжерах тощо. Мікрозаглибини, головним чином, зумовлюють контактні здатності поверхні – поліпшують змащування, підвищують опір адгезії та корозії, скорочують період припрацювання. На відміну від термічного впливу на «шорсткість», для таких поверхонь введено поняття «мікрорельєф і макрорельєф» поверхні, що

© М. А. Ткачук, 2025

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 з рельєфом запропонований термін «маслоємність». Розвинена система заглиблень забезпечує можливість проникнення мастильного середовища в зону тертя, сприяє утворенню вторинних структур. Рівномірний мікро- та макрорельєф забезпечує локалізацію абразивних частинок середовища і продуктів зношування, знижує ймовірність заклинювання пари тертя. Циркулююча у заглибленнях олива поліпшує охолодження контактної поверхні.

Дослідження в області адгезійного та когезійного зношування поклали початок розвитку в Україні нових технологій нанесення дискретних зносостійких покриттів на деталі електроіскровим легуванням (ЕІЛ). Основна суть створення зносостійких дискретних покриттів полягала у нанесенні на робочу поверхню деталі дискретного (острівкового) покриття та його подальшому пластичному деформуванню. Незважаючи на значне збільшення зносостійкості матеріалу деталей із дискретними покриттями, цьому методу також притаманні недоліки. Так, деталі із 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 би позбавлені багатьох недоліків класичних технологій. Таким новим процесом може стати спосіб формування зносостійкого шару робочої поверхні деталі, в основі якого лежить дискретне зміцнення електроіскровим методом.

Грунтуючись на відміченому, розробка науково-технологічних основ підвищення ресурсу об'єктів військової техніки і відповідальних деталей їхніх силових вузлів за рахунок використання дискретного зміцнення і споріднених технологій є перспективним напрямком підвищення їх триботехнічних характеристик.

В основі методу дискретного зміцнення поверхонь сталевих і чавунних деталей взято метод електроіскрового легування, який було розроблено раніше [1-4]. Спочатку цей метод технологічно був дуже складним у використанні, мав складне обладнання. Він використовувався не тільки для легування поверхонь, а і для нанесення антикорозійних покриттів.

Натепер запропоновано нову комплексну технологію: одна із деталей зміцнюється дискретно, а інша – континуально. Як варіанти континуального зміцнення можуть розглядатися різні способи нанесення чи вирощування покриттів [5-15].

При силовій взаємодії цих деталей реалізується передача контактної тиску.

Відповідно, потрібно проаналізувати методи аналізу контактної взаємодії деталей машин під навантаженням.

Аналіз методів дослідження контактної взаємодії деталей машин.

Аналіз контактної взаємодії, як зазначається в [1-4], є визначальним етапом дослідження процесів і станів зміцнених деталей машин, які перебувають у кінематичному та силовому sprzęженні у парі. Особливо це стосується випадків, коли контактуючі тіла мають особливості форми та властивостей поверхневих шарів контактуючих тіл. Якраз такий випадок у досліджуваному випадку.

Для аналізу напружено-деформованого стану такого типу тіл підходять методи теорії варіаційних нерівностей [16-21]. Так, у роботах [16-19] моделюється поверхневий

шар за моделлю Вінклера або подібних до неї. Такого типу моделі мають ту перевагу, що зводять початково поставлену задачу до проблеми мінімізації енергетичного функціоналу на множині обмежень, заданих нерівностями. У цей функціонал входять складові, які, окрім іншого, ще й визначають енергію тонкого поверхневого шару матеріалу (шорсткість, покриття, плівка тощо).

Застосування зазначених постановок, своєю чергою, вимагає застосування фізично адекватних моделей властивостей цих поверхневих шарів. Так, у низці робіт [22-27] побудовані моделі шорсткості. Що ж стосується моделей та властивостей різного типу покриттів, то вони описані у багатьох роботах [5-15]. Зокрема, привертають увагу властивості оксидних шарів, які формуються за технологією мікродугового оксидування. Якраз ця технологія є «парною» при обраному варіанті дискретно-континуального зміцнення [1-4].

Таким чином, формування розрахункових моделей напружено-деформованого стану контактуючих дискретно-континуально зміцнених тіл не викликає додаткових труднощів. Разом із тим основне питання, що ставить інтерес, – аналіз закономірностей та ефектів при взаємодії таких зміцнених тіл.

Таким чином, у підсумку приповерхневі шари деталей машинобудівних конструкцій набувають форм і фізико-механічних властивостей, відмінних від властивостей основних матеріалів.

На основі аналізу описаного матеріалу можна обґрунтувати наступні висновки.

1. Натепер відсутні універсальні моделі для урахування властивостей приповерхневих шарів деталей машинобудівних конструкцій, які би коректно врахували усі значущі чинники.

2. Існує велика кількість моделей, що пов'язують мікро- та макромеханічні властивості поверхневих шарів матеріалів; у загальному випадку вони, як правило, пов'язують місцеві (локальні) деформації проміжних шарів із контактним тиском.

3. Основною перепорою до моделювання реальних процесів і станів при контактній взаємодії складнопрофільних тіл є відсутність достатньо універсальної математичної моделі, яка би пов'язувала «локальні» та «глобальні» деформативні властивості поверхневих шарів контактуючих тіл, причому із урахуванням варіативності цих властивостей.

У випадку, наприклад, дискретно-континуального зміцнення варто залучити, розвинути і адаптувати моделі та методи досліджень на предствницькому осередку досліджуваної системи зміцнених тіл [1-4].

Підсумовуючи, можна зазначити, що для зміцнення елементів військових та цивільних машин необхідно розробити конструкцію установки, яка реалізує метод дискретного їх зміцнення.

Спосіб дискретного зміцнення. Спосіб дискретного електроіскрового зміцнення (ДЕЗ), що розглядається, відрізняється від описаного [1-4] тим, що електророзряд здійснюється при зіткненні анода із деталлю у навколишньому середовищі. 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. 1).

У цій роботі використана схема острівкового зміцнення. Дискретне покриття складається із двох частин: верхній прирощений шар, який знаходиться над поверхнею

деталі, і шар, розташований під її поверхнею.

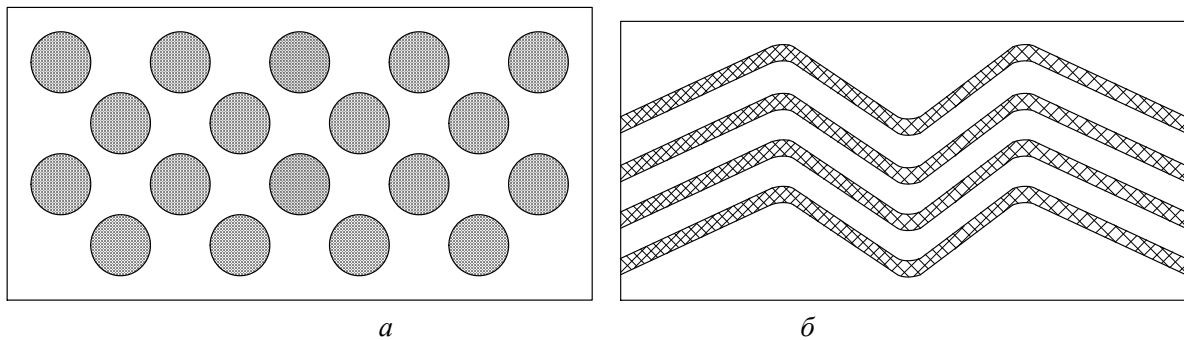


Рисунок 1 – Різновиди дискретних покриттів (схема): *a* – острівкове; *б* – лінійне

Перенесений матеріал переміщується з основним. У процесі наступного охолодження у 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 із западинами (каверни), які є концентраторами напружень.

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

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

На рис. 2, *a* наведена схема шліфування поверхні, а на рис. 2, *б* – її вигляд до і після дискретного зміцнення (ДЗ) [1-4].

При зрізі зовнішнього шару на величину, дещо меншу максимальної глибини каверни, на поверхні допускається збереження неглибоких западин (рис. 3). Вони є ємностями для мастила, за рахунок чого зменшується коефіцієнт тертя у початковий момент взаємного зміщення контактуючих деталей.

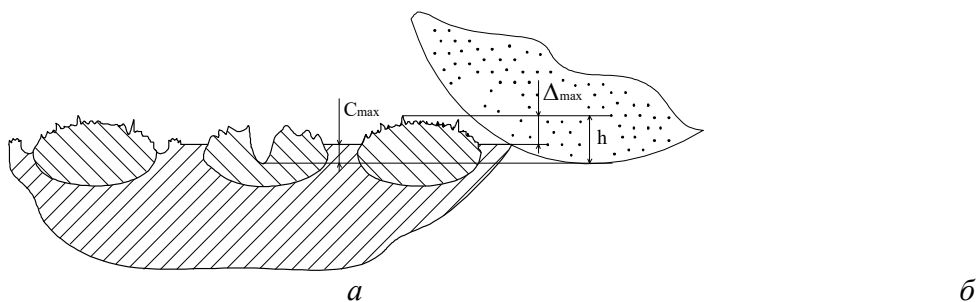


Рисунок 2 – Формування поверхні при шліфуванні: *a* – схема; *б* – розташування дискретних зміцнених областей; $\times 10$

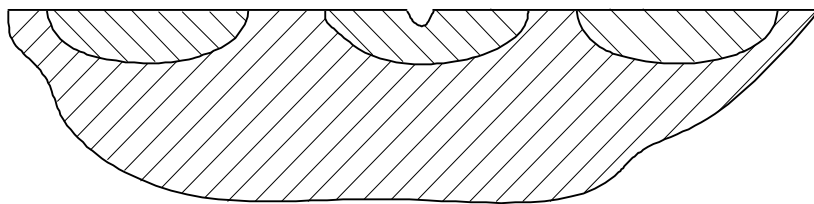


Рисунок 3 – Поверхня після шліфування при неповному видаленні каверн (схема)

Описаний спосіб ДЗ має досить високу продуктивність, забезпечує стабільність процесу, не знижує втомну міцність та дає можливість управляти величиною дискретності [1-4].

Технологічне обладнання, матеріали та структура металу в зоні дискретного зміцнення. При здійсненні досліджень із використання технологій на базі електроіскрового легування було встановлено, що технології цього напрямку в основному спрямовані на насення покриттів на робочі поверхні деталей, відновлення їх геометричної форми, зміни їх хімічних властивостей тощо, щоби але усі ці процеси виконувались у газовому середовищі, щоби забезпечити якість цих покриттів та отримання стабільних механічних властивостей, і не було виявлено їх застосування при виготовленні та ремонті елементів ТдЕС.

Дослідження здійснені на матеріалах, що використовуються у сучасній техніці: сталь 42ХМФА.

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

Існуючі установки для ручного або автоматизованого нанесення покриттів не пристосовані для використання їх при масовому виробництві деталей. Тому при розробці та модернізації обладнання для зміцнення великогабаритних деталей за базову модель для дискретного зміцнення була прийнята установка із дисковим електротримачем. Однак, початково ця установка призначалася для нанесення дискретних покриттів товщиною не менше 0,3 мм, що супроводжувалося утворенням глибоких каверн. Це було неприпустимо для зміцнюваних деталей, де величина шорсткості робочої поверхні спряжених деталей 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 зміцненого та легованого шару.

При аналізі можливостей згаданих установок було зроблено висновок, що при їх використанні неможливо отримати ті характеристики, які відповідають вимогам, що пред'являються у сучасних умовах. Тому запропонована схема установки для дискретного зміцнення та технологічне обладнання для зміцнення поверхонь великогабаритних деталей.

Для зменшення ерозійного впливу установка була оснащена спеціальним блоком управління на сучасній елементній базі, який забезпечує практично повне виключення утворення каверн на поверхні деталі, що автоматично призводить до збільшення глибини макролегованого шару за рахунок зменшення припуску під механічну обробку. Діапазон величини розрядного струму I_p мав верхню межу 350 А. Принципова схема роботи

модернізованої експериментальної установки зміцнення деталей колінчастих валів наведена на рис. 4.

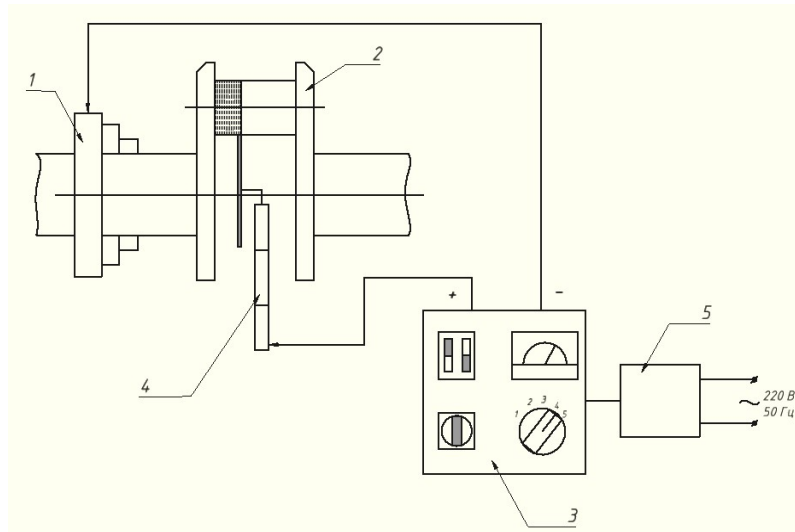


Рисунок 4 – Принципова схема роботи експериментальної установки зміцнення деталей: 1 – токарний верстат типу ДІП – 500; 2 – колінчастий вал; 3 – силовий блок та блок управління установки ДЗ; 4 – електродний утримувач; 5 – фільтр мережі

Обладнання розроблено таким чином, що операція дискретного зміцнення робочих поверхонь деталей виконується на токарному верстаті після напівчистового шліфування. Створене універсальне технологічне оснащення монтується на токарний верстат без додаткових доробок і дає можливість із однієї установки обробити різні поверхні.

Зміцнення деталей виконується на модернізованому токарному верстаті для оброблення великогабаритних деталей. Для цього на супорт верстата встановлюється спеціальна штанга, на якій кріпиться електродотримач.

Універсальне технологічне оснащення складається із рухомої та нерухомої частин. Нерухома частина за допомогою основи кріпиться до різцетримача верстата. До основи приєднується опорна напрямна, до якої за допомогою трьох штанг кріпиться рухома направляюча. На рухомій напрямній через пластинчасті пружини кріпиться електродотримач, оснащений опорними роликами і фіксуючим хомутом. Ескіз технологічного оснащення наведено на рис. 5.

Налаштування технологічного оснащення виконується за верхньою та нижньою точками обертання деталі, після чого це положення фіксується хомутом. При обертанні деталі рухома направляюча забезпечує рух електродотримача по траєкторії її руху. Для зміцнення деталей із нерухомою віссю рухома напрямна фіксується з нерухомою і при цьому виконує роль звичайної штанги.

Для зміцнення поверхонь чавунних та сталевих деталей велике значення має правильний вибір електрода зміцнення. Від цього залежать характеристики зміцненого шару, його мікроструктура та хімічний склад.

При виборі електрода було використано рекомендації стосовно вибору матеріалів зміцнюючих електродів та їх впливу на зміцнений шар.

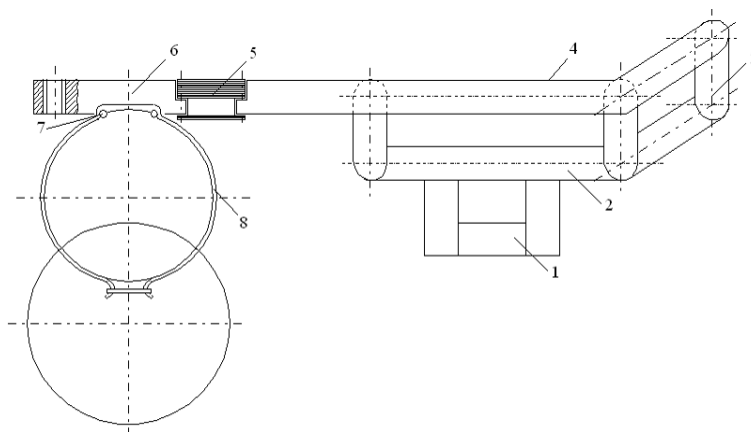


Рисунок 5 – Ескіз технологічного оснащення для зміцнення деталей: 1 – основа; 2 – опорна напрямна; 3 – штанга; 4 – рухома направляюча; 5 – пластинчаста пружина; 6 – електродотримач; 7 – опорні ролики; 8 – фіксуєчий хомут

При розробленні режимів і виборі електрода керуються наступними загальними міркуваннями:

- необхідно одночасно досягти високих значень зносостійкості, втомної міцності, тріщиностійкості, пластичності, ударної в'язкості, низького коефіцієнта тертя;
- слід 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;
- бажано отримати максимальну глибину легованого шару;
- якщо є можливість, варто підвищити теплостійкість поверхні тертя,
- знизити вплив навколишнього середовища і мастила на фізико-механічні властивості матеріалів поверхонь тертя;
- матеріал електрода має бути доступним для придбання і відносно недорогим.

Як було встановлено раніше, матеріал електрода для дискретного зміцнення поверхонь шийок чавунних валів слід обирати із високолегованих сталей, у яких присутні елементи твердих металів Ti, Zr, V, Cr, Nb, Ta, Mo, W. Для цього було здійснено аналіз можливих матеріалів, які можуть забезпечити викладені вимоги. Для випробування були обрані: нержавіюча сталь 08X18H10T; швидкорізальна сталь Р6М5; підшипникова сталь ШХ15.

Властивості дискретно зміцнених зразків. Для вивчення структури поверхні зразків із дискретно зміцненими зонами використовувався стереоскопічний мікроскоп МВС-10 зі збільшенням від 3 до 150 разів. Визначення товщини зміцнених шарів виконувалося на мікроскопах МІМ-7 і МПБ-2 при збільшенні до 100 разів. Для металографічних досліджень використовувалися поперечні та поздовжні шліфи зразків, підданих дискретному зміцненню. При поліруванні застосовувалися алмазні пасти марок АСМ і АСН із номерами зернистості 60/40, 40/28, 14/10, 9/5, 3/2, 1/0. Отримані шліфи досліджувалися у нетравленому стані і після травлення у 5%-ому розчині азотної кислоти в етиловому спирті. Дослідження мікроструктури здійснювалися на металографічному мікроскопі Неофот-21 у діапазоні збільшень від 100 до 600 разів.

Для вивчення мікроструктури при великих збільшеннях був використаний растровий електронний мікроскоп РЕМ-106 SELMI із високим розділенням: у режимі

високого вакууму – 4 нм, низького вакууму – 6 нм.

Мікротвердість зміцнених зон вимірювали за допомогою твердоміра ПМТ-3 алмазною пірамідою з кутом при вершині 136° при навантаженні 0,2 Н.

Рентгеноструктурний фазовий аналіз зразків здійснювався на рентгенівській установці УРС-55 у камері Дебая з діаметром 57,3 мм у випромінюванні трубки із залізним анодом методом зйомки рентгенограм від «шліфа». Режим зйомки: сила струму $I = 14$ мА, напруга $U = 30$ кВ, час експозиції – 50 хвилин. Крім того, був використаний дифрактометр ДРОН-3, на якому були отримані профілі дифракційних максимумів. Профілі будувалися за точками через інтервал $2\theta = 0,1^\circ$ на фоні і через $0,02^\circ$ на максимумі. Зйомку здійснювали у фільтрованому Cu-K_α випромінюванні.

Розподіли легуючих елементів у зміцнених зразках вивчалися за допомогою рентгенівського мікроаналізатора МАР-3, а також із використанням спеціальної приставки до електронного мікроскопу РЕМ-106. Рентгенівське випромінювання, збуджене електронами з енергією до 50 кеВ, фокусувалося у пляму діаметром ~ 1 мкм. При дослідженні постійно реєструвалися дві характеристики: довжина хвилі рентгенівського випромінювання і його інтенсивність. Це давало можливість визначити тип елемента і його кількість.

Використаний дослідницький комплекс повністю комп'ютеризований, що дало можливість здійснювати дослідження в автоматичному режимі, включаючи математичну обробку отриманих результатів.

Триботехнічні характеристики визначалися на машинах тертя СНЦ-2 і СМТ-1 із метою оцінки зносостійкості, зношувальної здатності досліджуваних матеріалів по відношенню до контр-тіла, зміни коефіцієнтів тертя від навантаження при ступінчастому вантаженні та задиростійкості зміцненої поверхні.

Зразки досліджуваного матеріалу поділялися на дві групи – контрольну (зразки, зміцнені за стандартною технологією) і досліджувану (зразки після ДЗ). Випробування здійснювалися за схемою «ролик – колодка». Для роликів (зразків) обрано сталь валів, для колодок (контр-тіл) – алюмінієвий сплав. Сталеві зразки контрольної групи були оброблені за стандартною (існуючою) технологією – гартування, високий відпуск, зміцнення азотуванням. Для чавунних зразків контрольної групи обраний матеріал був підданий комплексу технологій: нормалізація, високий відпуск, а також – нормалізація, високий відпуск, гартування з використанням СВЧ, низький відпуск.

Контр-тілом слугували колодки, виготовлені із матеріалу з антифрикційним шаром із алюмінієвого сплаву АМ01-20 із покриттям для припрацювання Pb-Sn-Cu.

Випробування на зношування матеріалу здійснювалися за зміною маси зразка при швидкості ковзання 1,3 м/с і навантаженні 50 Н. Як мастильний матеріал використовували мастило М14Вз. Час випробувань – 10 годин. Залежності коефіцієнтів тертя від навантаження визначалися при ступінчастому навантаженні в інтервалі навантажень від 0,2 до 2,0 кН із кроком між ступенями 0,2 кН, що відповідає умовам експлуатації колінчастих валів. Величина зношування вимірювалася на аналітичних вагах типу АДВ 200 М, які дають можливість зважувати зразки з точністю до 0,0001 г. Для визначення задиростійкості випробування виконувалися при одноразовому змащуванні зразків тонким шаром мастила, а також при повному його видаленні протиранням поверхні тертя.

Випробування на втому здійснювалися відповідно до ГОСТ 25502–79 на машині МУІ-6000, переобладнаній для укорочених зразків, за схемою чистого вигину. База випробувань – 10^7 циклів.

Відповідно до досліджень і з урахуванням результатів попередніх робіт для отримання

необхідних властивостей зміцнених поверхонь були обрані електроди із легованих сталей 08X18H10T, P6M5 і ШХ15. Ці сталі відносяться до різних структурних класів (перша - до аустенітного, друга - до ледебуритного, третя - до мартенситного), істотно відрізняються вмістом вуглецю і легуючих елементів, що дало можливість об'єктивніше оцінити їх вплив на оброблені поверхні і вибрати той електрод, який би найбільшою мірою забезпечував необхідні властивості. Окрім сталі 42ХМФА, використовуваний для виготовлення валів, ДЕЗ піддавали сталь 45, яка була обрана як основа. Вона не містить легуючих елементів, що спрощувало аналіз їх розподілу у плямі при перенесенні з анода під час електророзряду.

Характер поверхні, що формується при дії дискретних розрядів, показаний на рис. 6.

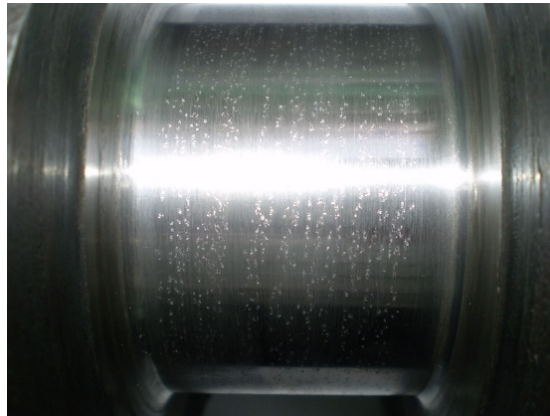


Рисунок 6 – Зовнішній вигляд деталей після ДЕЗ до полірування

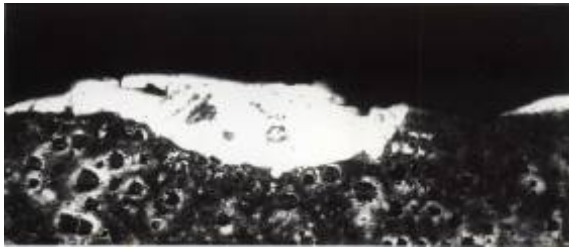
Мікроструктура у зоні розряду на поперечних шліфах при обробці аустенітним електродом (08X18H10T) для зразків з чавуну наведена на рис. 7, а, із сталі 42ХМФА – на рис. 7, б.

Перенесений з анода матеріал має вигляд білого шару, що особливо чітко видно на рис. 7, а. Це пояснюється тим, що сталь 08X18H10T не травиться 4-процентним спиртовим розчином азотної кислоти. Межа між «білим» шаром і розташованим під ним металом різко виражена, лінія сплавлення суцільна, несплавлень, розшарувань, зашлакування, раковин на границі не спостерігається.

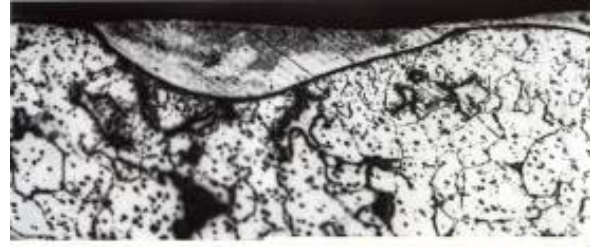
При більшому збільшенні під «білим» шаром можна побачити перехідну зону (підшар). Його глибина змінюється в межах 25 – 70 мкм. На рис. 8 та рис. 9 наведена мікроструктура зони розряду із відбитками твердості, розмір яких дає якісне уявлення про зміцнення поверхневого шару. У цьому випадку для протравлення аустенітного поверхневого шару був використаний інший травильник. Як видно з рисунка, у ньому виявляється мікроструктура, і він вже не виглядає білим.

Схематично будову зони дискретного зміцнення наведено на рис. 10.

Наявність підшару є важливим чинником для забезпечення необхідних властивостей у зміцнених деталях, оскільки завдяки його присутності здійснюється поступовий перехід від поверхневої зони до серцевини. Особливо позитивну роль відіграє зменшення вмісту вуглецю при переході від аустенітної структури, властивої матеріалу анода, до чавуну. Це помітно зменшує схильність до окрихчення і підвищує тріщиностійкість виробів.



a



б

Рисунок 7 – Мікроструктура поперечного шліфа зразків високоміцного чавуна (*a*) і сталі 42ХМФА (*б*) у зоні розряду; $\times 100$; електрод – сталь 08Х18Н10Т [1]



Рисунок 8 – Мікроструктура поперечного шліфа зразка сталі 45 у зоні розряду; $\times 100$; електрод – сталь 08Х18Н10Т

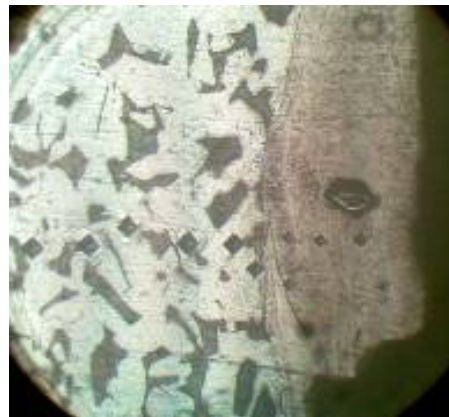


Рисунок 9 – Структура сталі 45 у зоні розряду; $\times 500$; електрод – сталь 08Х18Н10Т

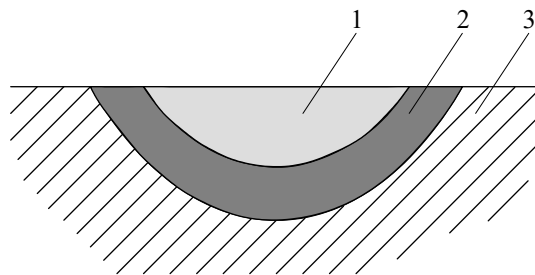


Рисунок 10 – Схематичне зображення зони дискретного зміцнення після шліфування:
1 – «білий» шар; 2 – підшар; 3 – основний метал

Вплив сили струму і дискретності на зносостійкість та коефіцієнт тертя при дискретному зміцненні чавунних і сталевих зразків. Вимірювання мікротвердості при ДЕЗ чавуну усіма обраними для дослідження електродами засвідчело, що її значення завжди перевищують мікротвердість основного металу, незалежно від обраного електрода. Режими обробки і результати досліджень наведені у табл. 1. Ці роботи виконувались на обладнанні ДП «Завод ім. В.О. Малишева» із використанням дослідницького обладнання ХНАДУ «ХАДІ». Метою експерименту було дослідження впливу основних технологічних

чинників процесу дискретного зміцнення на механічні властивості зміцнених поверхонь, що утворюють трибосистему «шийка колінчастого вала – вкладиш підшипника ковзання» ДВЗ.

На основі аналізу технології і результатів попередніх дослідів було встановлено, що на властивості зміцненої поверхні впливають такі чинники:

- величина дискретності зміцненого шару (ϕ) %;
- величина струму розряду (I_p), А;
- товщина електрода (S), мм.

Враховуючи рекомендації із вибору електрода зміцнення, було використано три типу електродів, виготовлених із легованих сталей. Результати досліджень впливу величини сили струму розряду на глибину зміцненого шару наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Вплив струму розряду на глибину зміцненого шару, його мікротвердість і присутність макродефектів при обробці чавуну різними електродами

№	Матеріал електрода	Струм розряду I_p , А	Глибина зміцненого шару, мкм	Мікротвердість, МПа	Наявність дефектів
1	08X18H10T	20	10 - 11,0	580 – 750	немає
		40	50 – 160	580 – 900	немає
		60	250 – 400	600 – 1000	немає
2	Р6М5	20	40 – 50	760 – 900	немає
		40	50 – 100	800 – 900	є
		60	50 – 160	580 – 1400	є
3	ШХ15	20	5 – 10,0	500 – 610	немає
		40	5 – 12	520 – 630	немає
		60	10 – 12	500 – 650	є

Як зображено на рис. 7, «білий» шар залежно від складу електрода та режимів зміцнення може мати різну конфігурацію та різнотовщинність, яка може змінюватись у великих межах. При збільшенні сили струму зростає глибина зміцненого шару, але поверхня втрачає шорсткість і в подальшому потребує додаткових операцій шліфування та полірування.

Із аналізу табличних даних можна зробити низку висновків:

1. З усіх досліджених матеріалів тільки застосування як електрода сталі 08X18H10T не призводить до утворення макродефектів (мікротріщин) після електроіскрового розряду, незалежно від сили струму у межах 20–60 А.

2. Для усіх електродів глибина і твердість зміцненого шару підвищується зі збільшенням струму розряду. Проте інтенсивність підвищення глибини шару залежить від матеріалу електрода. Так, для електрода зі сталі 08X18H10T при збільшенні сили струму втричі товщина шару збільшується у 25–40 разів, тоді як при такому ж підвищенні струму для електрода зі сталі Р6М5 вона зростає усього у три рази. Найменша товщина зміцненого шару утворюється при використанні для електрода сталі ШХ15.

4. Значення мікротвердості збільшуються при підвищенні струму розряду, але характеризуються великим розкидом значень. Це пов'язано із негомогенністю за складом наплавленого шару.

5. Глибина зміцненого шару для електрода зі сталі 08X18H10T становить 250–400 мкм.

6. Висока твердість у плямі розряду (не менше 60 HRC) при обробці електроном зі сталі

08X18H10T дає підставу розраховувати на забезпечення необхідної зносостійкості деталей. Можна також припустити, що внаслідок крихкості продукти зношування при попаданні у зону тертя будуть подрібнюватися. Це полегшить їх винесення мастильною рідиною з цієї зони, що також має сприяти зростанню зносостійкості.

На підставі відміченого як матеріал анода для подальших досліджень була обрана сталь 08X18H10T. При високій твердості вона найбільш стійка проти утворення мікротріщин у процесі подальшого швидкого охолодження, що цілком природно, оскільки основу наплавленого шару складає аустеніт, якому властиві високі значення пластичності, ударної в'язкості та тріщиностійкості. Крім того, сталь легована хромом, нікелем і титаном, а ці елементи підвищують опір знеміцненню при зростанні температури. Хром також значно зменшує схильність до наводнення металу виробу і перешкоджає прискореному зношуванню за рахунок цього процесу.

Подальшими дослідженнями було встановлено, що найбільш стабільні властивості після дискретного зміцнення досягаються при силі струму $I_p = 60\text{--}70$ А. Тому, незважаючи на збільшення твердості зі зростанням сили струму, оптимальним був визнаний саме цей діапазон.

Для подальших робіт і вивчення впливу обраних режимів на зміцнення робочих поверхонь корінних та шатунних шийок чавунного колінчастого валу було обрано та застосовано електрод, виготовлений із легованої сталі 08X18H10T. Також було розглянуто вплив сили струму на характеристики зміцненої поверхні, а також на схильність утворення мікротріщин у зміцненій зоні, і як це залежить від глибини зміцненого шару та його мікротвердості. Результати досліджень наведено у табл. 2-3 та на рис. 11, 12.

Таблиця 2 – Вплив сили струму розряду I_p на глибину зміцненого шару h , мікротвердість HV і присутність мікротріщин при ДЕЗ чавуну електродом зі сталі 08X18H10T [1]

I_p , А	h , мм	HV, МПа	Наявність мікротріщин
10	0,005	—	немає
20	0,01	—	немає
30	0,013	580	немає
40	0,16	630	немає
50	0,29	780	немає
60	0,40	990	немає
70	0,41	1000	немає
80	0,47	1150	є
90	0,47	1300	є
100	0,48	1500	є

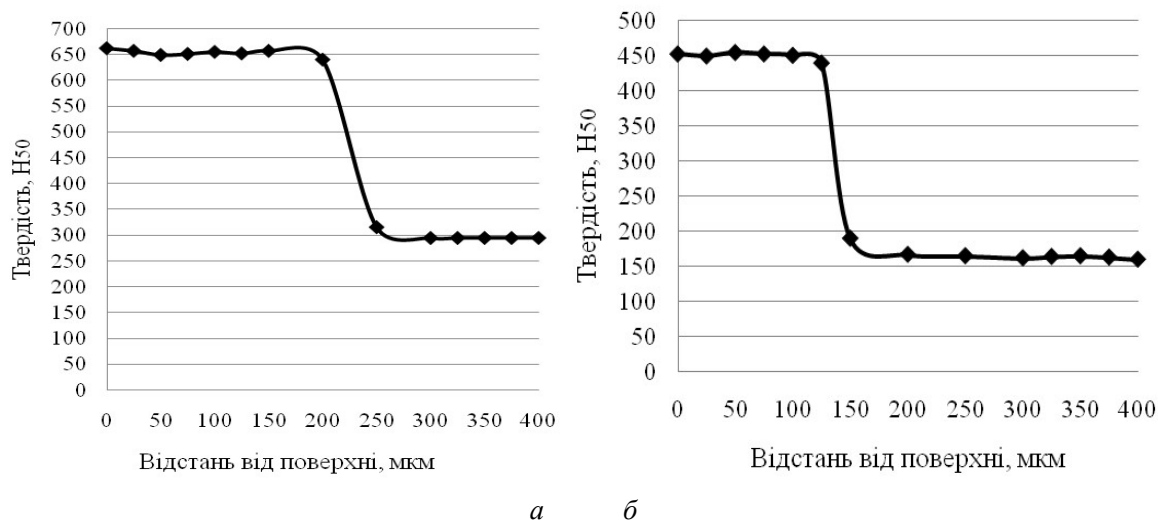


Рисунок 11 – Розподіл мікротвердості за глибиною зони дискретного зміцнення:
a – високоміцного чавуну; *б* – сталі 45

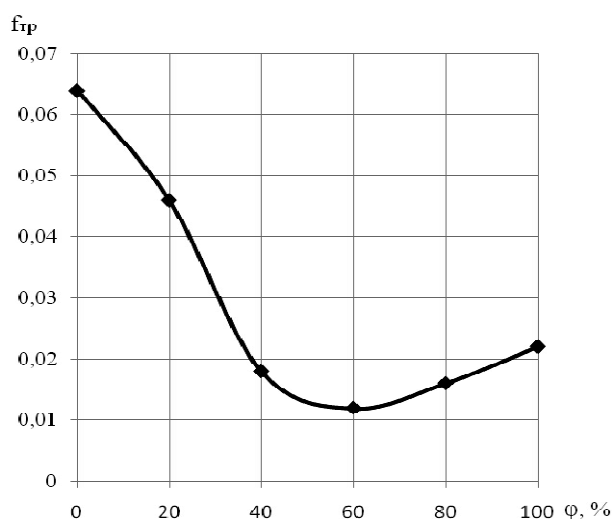


Рисунок 12 – Залежність коефіцієнта тертя f чавуну від дискретності ϕ при навантаженні 1 кН

Із аналізу даних табл. 3 випливають такі висновки.

1. При навантаженні 1 кН коефіцієнт тертя після ДЕЗ, незалежно від ступеня дисперсності, нижчий, ніж у чавуні без такої обробки або після поверхневого гартування із нагріванням СВЧ.

2. Для чавуну без дискретного електроіскрового зміцнення коефіцієнт тертя із підвищенням навантаження P зростає, тоді як після зміцнення його значення зменшуються для всіх ϕ .

3. Величина дискретності є визначальним чинником для коефіцієнта тертя. Для усіх навантажень він найменший при $\phi = 60\%$. Для такої дискретності при $P = 0,2$ кН коефіцієнт тертя f порівняно із чавуном без ДЕЗ знижується в 1,4 рази, при $P = 1$ кН – у 5,8, при $P = 2$ кН – більш ніж у 6 разів.

Таблиця 3 – Залежність коефіцієнта тертя f від навантаження після різних обробок

Обробка	Значення коефіцієнта тертя при навантаженні P , кН									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Нормалізація, високий відпуск	0,040	0,040	0,050	0,058	0,064	0,078	0,087	0,094	0,109	0,116
Нормалізація, високий відпуск, ДЕЗ, $\varphi = 20\%$	0,040	0,040	0,038	0,040	0,048	0,052	0,06	0,067	0,084	0,10
Нормалізація, високий відпуск, ДЕЗ, $\varphi = 40\%$	0,032	0,028	0,018	0,018	0,017	0,013	0,013	0,013	0,011	0,012
Нормалізація, високий відпуск, ДЕЗ, $\varphi = 60\%$	0,028	0,018	0,015	0,011	0,0115	0,011	0,01	0,0105	0,010	0,010
Нормалізація, високий відпуск, ДЕЗ, $\varphi = 80\%$	0,035	0,030	0,020	0,016	0,014	0,013	0,013	0,013	0,013	0,014
Нормалізація, високий відпуск, ДЕЗ, $\varphi \sim 95\%$	0,040	0,030	0,027	0,025	0,021	0,021	0,020	0,0195	0,0185	0,019
Нормалізація, високий відпуск	0,040	0,040	0,050	0,058	0,064	0,078	0,087	0,094	0,109	0,116
Нормалізація, високий відпуск, ДЕЗ, $\varphi = 20\%$	0,040	0,040	0,038	0,040	0,048	0,052	0,06	0,067	0,084	0,10
Нормалізація, високий відпуск, ДЕЗ, $\varphi = 40\%$	0,032	0,028	0,018	0,018	0,017	0,013	0,013	0,013	0,011	0,012
Нормалізація, високий відпуск, ДЕЗ, $\varphi = 60\%$	0,028	0,018	0,015	0,011	0,0115	0,011	0,01	0,0105	0,010	0,010
Нормалізація, високий відпуск, ДЕЗ, $\varphi = 80\%$	0,035	0,030	0,020	0,016	0,014	0,013	0,013	0,013	0,013	0,014
Нормалізація, високий відпуск, ДЕЗ, $\varphi \sim 95\%$	0,040	0,030	0,027	0,025	0,021	0,021	0,020	0,0195	0,0185	0,019
Нормалізація, високий відпуск, загартування СВЧ	0,080	0,080	0,060	0,050	0,064	0,067	0,07			

Таким чином, на основі всіх наведених результатів підтверджено, що оптимальною дискретністю слід вважати $\varphi = 50 - 70\%$.

Для дослідження зносостійкості деталей, вироблених із чавуну були обрані 3 серії зразків, оброблених за різними режимами:

1 – після стандартної термічної обробки, прийнятої для валів двигунів типу Д80 (нормалізація, високий відпуск); твердість 31–37 HRC;

2 – оброблені за режимом 1 + поверхневе гартування з нагріванням СВЧ; твердість 43–46 HRC;

3 – оброблені за режимом 1 + ДЕЗ за оптимальним режимом (струм 60А, дискретність 60%); твердість 50–55 HRC.

Після ДЕЗ ролики шліфували із припуском 0,04 мм відносно номінального розміру, а потім полірували у номінальний розмір. Глибина зміцненого шару становила 250–400 мкм. Шліфування та полірування усіх зразків здійснювали за технологією обробки шийок колінчастих валів. Шорсткість поверхні після полірування відповідала $Ra = 0,16$ мкм. Як матеріал колодки, що відіграє роль вкладиша, обрана бронза БрС30. Результати випробувань показані у табл. 4.

Таблиця 4 – Результати випробувань на зносостійкість чавуну після різної обробки
(вал – чавун, вкладиш – БрС30)

Режим	Знос ролика (вала), г	Знос колодки (вкладиша), г	Коефіцієнт тертя, μ
1	0,0246	0,0183	0,064
2	0,0037	0,0106	0,062
3	0,0024 – 0,0021	0,0083 – 0,0104	0,012 – 0,019

Звертає на себе увагу значний розкид значень μ після ДЕЗ порівняно із режимами 1 і 2. Це пов'язано із неомогенністю за хімічним складом зміцненої зони. При цьому в усьому діапазоні розкиду значення μ залишаються нижчими. З точки зору зносостійкості така мікронеоднорідність має позитивно впливати на зносостійкість, враховуючи принцип Шарпі.

Що стосується стану після гартування із нагріванням СВЧ (режим 2), то, незважаючи на такий же коефіцієнт тертя, як і при обробці за режимом 1, зношування менше. Це пояснюється більш високою твердістю зразка. Після ДЕЗ знижується знос контр-тіла (вкладиша), тобто така обробка забезпечує меншу зношувальну здатність зміцненого вала відносно вкладиша. У табл. 5 для цієї пари і тих же режимів обробки показана зміна коефіцієнта тертя від навантаження P на початку і в кінці випробувань на цій ступені навантаження (початкові значення вказані у чисельнику, кінцеві – у знаменнику). Для режиму 3 (ДЕЗ) наведені дані після зішліфування шару на різну глибину: 3 ~ 350 мкм, 3* ~ 250 мкм.

Із даних табл. 5 видно, що у зразках, оброблених за режимами 1 і 2 (без ДЕЗ), починаючи з $P = 0,6$ кН (режим 1) і $P = 1,0$ кН (режим 2), коефіцієнт тертя наприкінці випробувань на цій ступені навантаження (знаменник) більший, ніж на початку (чисельник). Це можна пояснити підвищенням шорсткості поверхні при кожному циклі навантаження. Після ДЕЗ (режим 3) зміна коефіцієнта тертя не спостерігається, що свідчить про меншу пошкоджуваність поверхні тертя.

Таблиця 5 – Залежність коефіцієнта тертя пари чавун – БрС30 від навантаження на початку і в кінці її застосування

Режим	Коефіцієнти тертя при навантаженні P , кН									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
1	<u>0,040</u> 0,040	<u>0,040</u> 0,040	<u>0,047</u> 0,053	<u>0,055</u> 0,060	<u>0,060</u> 0,068	<u>0,073</u> 0,083	<u>0,083</u> 0,091	<u>0,087</u> 0,102	<u>0,104</u> 0,115	<u>0,116</u> 0,116
2	<u>0,040</u> 0,040	<u>0,030</u> 0,025	<u>0,023</u> 0,023	<u>0,025</u> 0,025	<u>0,028</u> 0,034	<u>0,037</u> 0,043	<u>0,044</u> 0,044	<u>0,044</u> 0,044	<u>0,044</u> 0,045	<u>0,048</u> 0,052
3	<u>0,040</u> 0,040	<u>0,030</u> 0,030	<u>0,027</u> 0,027	<u>0,025</u> 0,023	<u>0,022</u> 0,020	<u>0,022</u> 0,020	<u>0,020</u> 0,020	<u>0,020</u> 0,019	<u>0,019</u> 0,018	<u>0,020</u> 0,018
3*	<u>0,040</u> 0,030	<u>0,020</u> 0,020	<u>0,016</u> 0,013	<u>0,015</u> 0,013	<u>0,012</u> 0,012	<u>0,013</u> 0,013	<u>0,013</u> 0,013	<u>0,013</u> 0,013	<u>0,013</u> 0,013	<u>0,014</u> 0,014

При експлуатації деталей одним із можливих дефектів шийок колінчастих валів може бути задирання. Утворення задиру призводить до катастрофічного зношування поверхні шийок. У момент його виникнення різко збільшується коефіцієнт тертя, зростає температура, відбувається схоплювання поверхонь тертя, з'являються динамічні навантаження. У зв'язку із цим важливим є порівняння задиристості після різних режимів обробки колінчастих валів. Результати цих випробувань наведені у табл. 6. Із даних таблиці видно, що при одноразовому зануренні у мастило на зразках після нормалізації із високим відпуском (режим 1) задир з'являвся при навантаженні 1,8 кН. Зразки, піддані поверхневого гартуванню (режим 2) і ДЕЗ (режим 3), витримали без задиру утворення максимальне навантаження (2,0 кН). Після видалення мастила у нормалізованих зразках задир з'являвся при навантаженні 1,6 кН, у зразках після поверхневого гартування – при $P = 2,0$ кН, а після ДЕЗ задир не утворювався у межах зміни навантаження. При цьому коефіцієнт тертя залишався нижчим, ніж на початку випробувань.

Таблиця 6 – Результати випробувань на задиристість при одноразовому змащуванні чавуну, обробленого за різними режимами

Режим	Коефіцієнти тертя при навантаженні P , кН									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
1	0,160	0,120	0,106	0,125	0,112	0,113	0,096	0,100		
2	0,08	0,98	0,06	0,05	0,064	0,067	0,071	0,075	0,071	0,068
3	0,060	0,040	0,040	0,033	0,032	0,031	0,031	0,034	0,040	0,034

Для визначення впливу ДЕЗ на триботехнічні характеристики сталі 42ХМФА були випробувані дві серії зразків:

1 – після обробки за стандартною технологією, прийнятою для колінчастих валів автомобіля КамАЗ (поліпшення і подальше азотування);

2 – після нормалізації, високого відпуску і ДЕЗ з фінішною механічною обробкою у номінальний розмір з глибиною зміцненого шару в межах 260 – 410 мкм.

Навантаження змінювали в діапазоні 0,2 – 2,0 кН. На базі цих випробувань були визначені середні значення коефіцієнтів тертя при різних навантаженнях, зносостійкість і зношувальна здатність матеріалу зразків після різної обробки при навантаженні 1,0 кН. Щоб наблизити умови випробувань до реальних (можливе потрапляння абразивних часток у мастило), випробування здійснювали як у чистому мастилі М14Вз, так і у мастилі з добавкою 0,5% абразиву (SiO_2) із розміром частинок 0,1 – 0,2 мм.

Результати випробувань у мастилі без абразивних часток наведені у табл. 7. Коефіцієнти тертя визначали на початку і в кінці кожної стадії навантаження. Однак для сталевих зразків відмінності не перевищували 0,005, тому в табл. 7 показані середні значення. Як видно із таблиці, при навантаженні 0,2 кН коефіцієнти тертя для обох режимів однакові і зменшуються зі зростанням P , але після ДЕЗ (режим 2) це зниження значніше. Внаслідок цього коефіцієнт тертя зразка після ДЕЗ при $P = 2$ кН в 1,4 рази менший, ніж після азотування. Результати випробувань на зносостійкість сталевих зразків у парі із вкладишем зі сплаву А20–1 у чистому мастилі після різної обробки наведені у табл. 8. Для зразків після ДЕЗ наведені дані після зішліфування на різну глибину: 2 ~ 5 мкм, 2* ~ 10 мкм.

Таблиця 7 – Залежність коефіцієнта тертя сталі 42ХНМФ від навантаження після різної обробки

Режим	Коефіцієнт тертя при навантаженні P , кН									
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
1	0,043	0,042	0,036	0,032	0,029	0,029	0,028	0,028	0,030	0,030
2	0,043	0,040	0,035	0,031	0,025	0,024	0,024	0,023	0,022	0,022

Таблиця 8 – Триботехнічні характеристики сталевих зразків після різних режимів зміцнення при випробуваннях в мастилі без абразиву; час випробувань – 10 годин; $P = 1$ кН

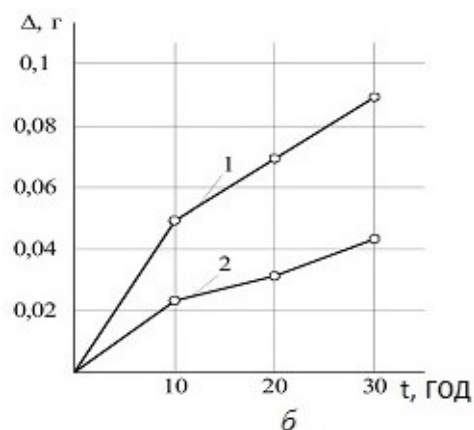
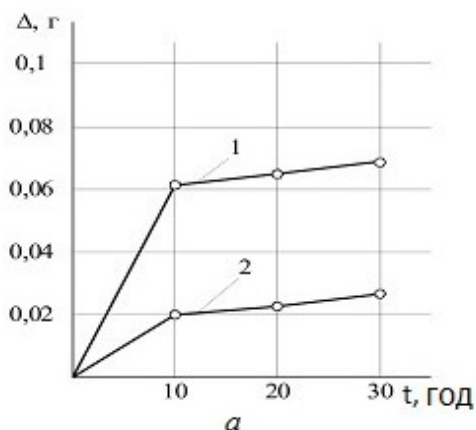
Режим	Зношування ролика Δ_p (вала), г	Зношування колодки Δ_k (вкладиша), г	Відношення Δ_p до мінімального	Відношення Δ_k до мінімального
1	0,0147	0,0084	3,5	2,6
2	0,0089	0,0068	2	2,1
2*	0,0042	0,0032	-	-

Із даних таблиці чітко видно, що після ДЕЗ зменшується зношування як роликів, так і колодок. При цьому установлено, що за глибиною плями розряду зношування неоднакове: на певній глибині воно стає мінімальним. У дослідженому випадку найменше зношування реєструється на глибині ~ 10 мкм. Із цих даних випливає, що ДЕЗ за зносостійкістю може збільшити довговічність валів у 3,5 рази порівняно із азотуванням і зменшити зношувальну здатність відносно вкладишів у 2,6 рази. Результати, отримані при випробуваннях у мастилі із добавками абразивних часток, показані у табл. 9 [1].

Видно, що і за присутності абразивних частинок після ДЕЗ зносостійкість сталевого вала залишається приблизно втричі, а вкладиша – вдвічі вищою, ніж після азотування. Це можна пояснити кращим припрацюванням поверхні валу після ДЕЗ, що підтверджується рис. 13, який ілюструє динаміку зношування роликів і колодок.

Таблиця 9 – Абразивна зносостійкість сталевих зразків після різних режимів зміцнення

Режим	Зношування ролика, г за час випробувань, годин			Зношування колодки, г за час випробувань, годин		
	10	20	30	10	20	30
1	0,062	0,065	0,068	0,490	0,691	0,898
2	0,020	0,023	0,026	0,220	0,323	0,336



1 – азотування; 2 – ДЕЗ

Рисунок 13 – Залежність зношування матеріалу від часу випробувань:

а – ролика; б – колодки

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що незалежно від матеріалу валів (сталь, чавун) ДЕЗ помітно знижує зношування спряжених деталей. Це можна пояснити наступним чином. Як відомо, при виборі матеріалу деталі типу вкладиша застосовують принцип Шарпі – структура матеріалу має бути мікогетерогенною, тобто такою, у якій чергуються м'які та тверді структурні складові. Що ж до структури матеріалу деталі типу вала, то після існуючих способів зміцнення поверхні (гартування СВЧ, азотування) вона має однорідний характер і рівномірний розподіл твердості на поверхні тертя. При ДЕЗ і на поверхні вала утворюється мікогетерогенна структура, у якій чергуються зміцнені і незміцнені зони, іншими словами, принцип Шарпі реалізується і для вала. Це створює кращі умови для утримання масляної плівки між шийкою вала і вкладишем, повністю виключає можливість сухого тертя навіть при досить високому питомому тиску, у результаті чого підвищується зносостійкість і зменшується зношувальна здатність однієї деталі відносно іншої.

У роботі розглянуто питання впливу дискретного зміцнення на втомний опір чавунних зразків. Випробуванням на опір втомному руйнуванню піддавали зразки після стандартної обробки (нормалізація з високим відпуском) і після ДЕЗ за оптимальним режимом. Зразки полірували і обстежували на присутність дефектів. При кожному режимі для випробувань відбирали зразки як без поверхневих дефектів, так і з дефектами, що дозволяло оцінити чутливість зразків до наявності концентраторів напружень. У стандартно оброблених зразках на поверхні реєструвалися одиничні ливарні дефекти типу рихлот (розміром 0,5–1,5 мм і глибиною до 1 мм). На зразках після ДЕЗ дефекти

зберігалися за рахунок зменшення припуску під фінішну обробку до 0,02-0,16 мм. Після полірування розмір цих дефектів приблизно відповідав дефектам стандартних зразків.

Втомні криві втомні наведені на рис. 14. Значення межі витривалості для вказаних станів (відмічені номерами в дужках) показані у табл. 10. Із таблиці видно, що границя витривалості зразків після ДЕЗ близька до σ_{-1} стандартно оброблених зразків за умови, що на поверхні немає дефектів – 190 та 200 МПа відповідно. Ці відмінності відповідають області розсіювання значень, що підтверджує втомна крива для серійного чавуну такого ж хімічного складу після стандартної обробки (кр. 3), для якого границя витривалості дорівнює 170 МПа.

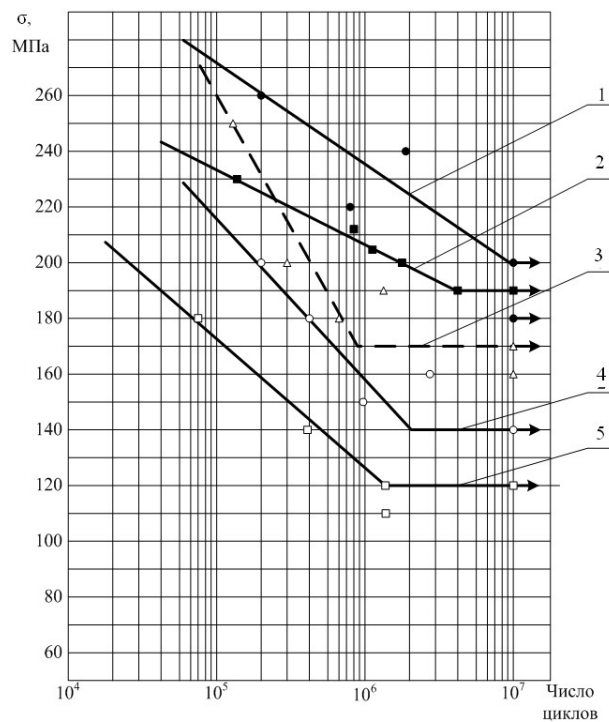


Рисунок 14 – Втомні криві для чавунних зразків після різної обробки:

1 – стандартна обробка, зразок без дефектів; 2 – ДЕЗ, зразок без дефектів; 3 – дані заводських випробувань серійного чавуну після стандартної обробки; 4 – стандартна обробка, зразок з дефектами; 5 – ДЕЗ, зразок з дефектами

Таблиця 10 – Результати випробувань чавунних зразків на втомний опір

Обробка	Якість поверхні після полірування	Границя витривалості σ_{-1} , МПа
Стандартна	без дефектів (1)	200
	ливарні дефекти (4)	140
Стандартна + ДЕУ	без дефектів (2)	190
	грубі дефекти (5)	120

Важливим чинником при аналізі опору втомі є місце руйнування зразків. Дані багатьох досліджень свідчать, що при поверхневому гартуванні з нагрівом СВЧ або лазерним випромінюванням межа зміцненого шару є технологічним концентратором

розтягувального напруження зразків із високоміцного чавуну. Це знижує їх втомний опір.

Потрібно підкреслити, що не спостерігалось жодного випадку руйнування зразків по границі дискретно зміцненої зони. Таким чином, можна стверджувати, що ДЕЗ за відсутності поверхневих дефектів не створює технологічних концентраторів напружень і не знижує втомної міцності. Цей спосіб є ефективним при зміцненні робочих поверхонь високонавантажених поверхонь тертя і сприяє підвищенню довговічності як чавунних, так і сталевих колінчастих валів.

Значущі чинники при застосуванні дискретного електродіркового зміцнення у комбінації із мікродуговим оксидуванням. Із метою поліпшення трибомеханічних властивостей деталей було запропоновано новий метод, що поєднує технології дискретного зміцнення та мікродугового оксидування.

Взаємодія двох зміцнених поверхонь, одна з яких зміцнена дискретно–континуально, а інша – континуально, при взаємному контакті сприяє виникненню зовсім інших процесів припрацювання та зношування, що потребує додаткового аналізу залежності критеріальних величин від конструктивно–технологічних параметрів процесів зміцнення, що варіюються.

Крім впливу на міцність, при дискретному зміцненні змінюються також і трибологічні характеристики. Це викликано тим, що внаслідок дискретного зміцнення змінюються контактний тиск, розподіл коефіцієнту тертя, а, відповідно, й інтенсивність зношування.

Із аналізу отриманих у ході досліджень даних (дивись вище) випливає, що в області ДЗ спостерігається більш високий рівень контактного тиску, ніж в області контактування з основним матеріалом деталі *II*. Відповідно, якщо в парі «корундовий шар – сталь» коефіцієнт тертя нижче, ніж у парі «корундовий шар – основний матеріал деталі *II*», то при їх взаємному русі виникає два ефекти. Перший пов'язаний зі зменшенням сумарної величини тертя у сполученні деталей *I* і *II* (оціночно – в 1,2 – 1,8 рази). Другий визначає зниження зношування, що пояснюється більш низькою інтенсивністю зношування високолегованої сталі порівняно з високоміцним чавуном. Ці роботи було на ДП «Завод ім. В.О. Малишева» на машинах тертя 2070 СМТ-1 за схемою, яка зображена на рис. 15, але для досліджень використовувались дослідні зразки, виготовлені із високоміцного чавуну, робочі поверхні яких, для «диска» було зміцнено методом дискретного зміцнення, а робоча поверхня «колодки» була виготовлена з заготовки сталєалюмінієвого вкладиша з робочим антифрикційним сплавом АМО1-20.

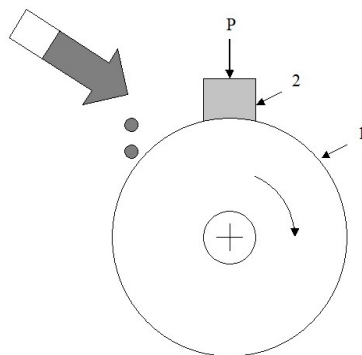


Рисунок 15 – Схема випробувань на машині тертя 2070 СМТ-1:

1 – рухомий зразок «диск», *2* – нерухомий зразок «колодка»

У першому випадку використовувалась пара «диск» – «колодка» із робочим антифрикційним сплавом АМО1-20, а у другому випадку пара «диск» – «колодка», де антифрикційний сплав АМО1-20 було перетворено методом мікродугового оксидування на глибину 20–50 мкм. Результати випробувань за визначення величини та швидкості зношування робочих поверхонь пар тертя наведено у табл. 11 та відображено на рис. 16, 17.

Таблиця 11 – Результати випробувань із визначення вагового зношування у парі тертя «диск» – «колодка»

Робоча поверхня колодки	Зношування «колодки», см $\times 10^{-4}$	Зношування «диска», см $\times 10^{-4}$
АМО1-20	7,5 (2,5 мкм/год)	0,07 (0,023 мкм/год)
АМО1-20 + МДО	3,4 (1,1 мкм/год)	0,20 (0,07 мкм/год)

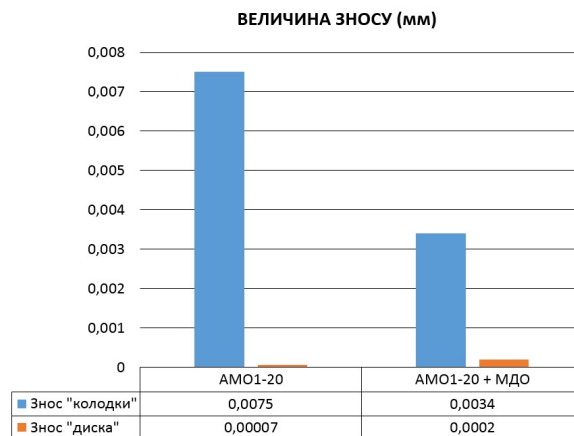


Рисунок 16 – Величина зношування колодки та диска (мм)

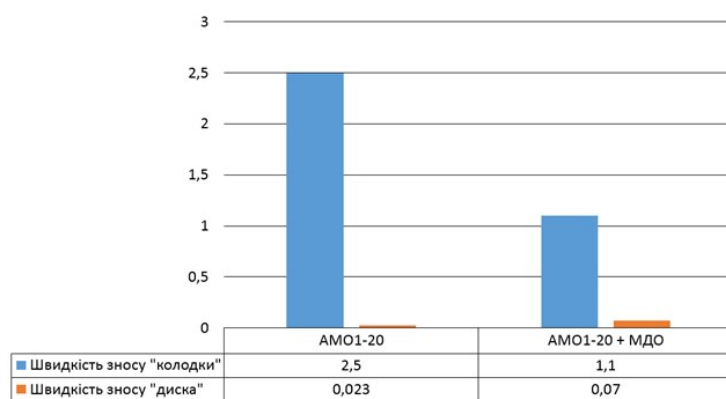


Рисунок 17 – Швидкість зношування колодки та диска (мкм/год)

Як видно із аналізу результатів випробування, у парі тертя «диск» – «колодка» змінився характер процесів припрацювання у результаті суттєвої зміни властивостей приповерхневих робочих шарів поверхонь тертя досліджуваних зразків сталевалюмінієвих вкладишів. Як відомо, їх припрацювання полягає у перенесенні м'якої структури

складової антифрикційного шару АМО1-20 (олова) на контактуючу поверхню валу, що не виправляє його макрогеометрію у процесі припрацювання.

За наявності на робочій поверхні вкладиша твердого «корундового» шару, утвореного при гальвано-плазмовій обробці (ГПО, мікродугове оксидування), у процесі припрацювання пари «шийка колінчастого валу – сталєалюмінієвий вкладиш» насамперед виправляється макрогеометрія робочої поверхні шийки колінчастого валу. При цьому також відбувається поліровка та процеси мікроприпрацювання з утворенням аморфізованих приповерхневих робочих шарів, які забезпечують високі антифрикційні властивості. Наявність тонкого оксидно-корундового шару на антифрикційному шарі сталє-алюмінієвого вкладишу у процесі припрацювання за рахунок зниженої теплопровідності корундового шару дає можливість зменшити відносно великі зазори на мастило між шийкою колінчастого валу та сталє-алюмінієвим вкладишем, прийнятих при монтажі. Зменшення величини гарантованого зазору збільшує тиск у змащувальній системі двигуна, знижує витрати на тертя, знижує температуру головки поршня, шум при роботі двигуна та сприяє збільшенню ресурсу пари «колінчастий вал – сталєалюмінієвий вкладиш» до капітального ремонту.

Значущі чинники при здійсненні дискретно-континуального зміцнення деталей машин військового та цивільного призначення. Отримані результати дають підстави зробити низку висновків:

1. Поверхневий шар сталевих та чавунних деталей при ДЗ містить значно меншу, порівняно з основним металом, кількість заліза, що підтверджує перенесення основних легуючих елементів (Cr, Ni, Ti) з анода на виріб. Вміст елементів в цьому шарі не повністю відповідає їх кількості в електроді. Більшою мірою це стосується хрому. Так, реєстрований вміст Ni вже починаючи з другої точки (~ 290 мкм) практично відповідає його кількості в електроді (8–9 %). Вміст же хрому на усіх глибинах не досягає марочного складу (18 %).

2. При ДЗ відмінність кількості легуючих елементів у шарі є наслідком перемішування металу основи з матеріалом анода і, можливо, їх вигорання при перенесенні. При цьому внаслідок короткочасності процесу гомогенізація складу не встигає статися. Розкид значень концентрації хрому складає близько 37 %, нікелю ~ 21 %. Товщина зони з підвищеним вмістом Ni і Cr дорівнює ~ 1 мм. У перехідній зоні (у підшарі) кількість хрому і нікелю досить різко зменшується (точки 8 – 10). Таким чином, товщина перехідного шару – близько 290 мкм. Проте слід звернути увагу на великий розкид концентрації легуючих елементів в цій області: в точці 8 вміст Cr 0,7%, Ni 1,01%, в точці 9 відповідно 11 і 7,3%, а в точці 11 ці елементи вже не реєструються. Це свідчить про неоднакову товщину перехідного шару.

3. Відсутність вирівнювання складу в областях, що граничать, свідчить про незначну роль дифузії у процесі ДЕЗ внаслідок малої тривалості розряду і високої швидкості охолодження. Хімічний склад змінюється головним чином за рахунок перемішування і розчинення графіту. Розчинення графіту призводить до значного підвищення вмісту вуглецю у «білому» (аустенітному) шарі – з 0,08 % в матеріалі електрода до 2,88-2,89 % у верхній зоні плями розряду, де досягається найвища температура. У міру віддалення від поверхні температура знижується, що супроводжується зменшенням розчинності графіту, і вміст вуглецю поступово знижується – до 1,06 % на відстані ~ 900 мкм, а потім починає збільшуватися – до 1,62 % на відстані ~ 1500 мкм. Таким чином, вміст легуючих елементів за глибиною зони зменшується, а кількість вуглецю змінюється немонотонно, досягаючи мінімуму на певній відстані від

поверхні.

4. Комбінований метод дискретно-континуального зміцнення двох контактуючих деталей призводить до якісно нових ефектів. Це можна пояснити тим, що зміна мікроструктури матеріалів цих тіл, що контактують, призводить, з одного боку, до наноефектів, тобто до зміни їхніх поверхонь профілів у навантаженому стані, а, з іншого боку, – до макроефектів, тобто до припрацювання їх макрогеометрії.

Отже, можна зазначити, що значущими чинниками при ДКЗ є форма зон дискретного зміцнення (ЗДЗ) та властивості матеріалу корундового шару, утвореного ГПО.

Як результат, маємо позитивні ефекти при застосуванні ДКЗ із точки зору впливу на трибомеханічні характеристики.

Аналіз результатів, описаних у цій роботі та попередніх [1-4], свідчить про можливість впливу на розподіл контактного тиску між дискретно-континуально зміцненими деталями ТдЕС за рахунок варіювання режимів технологічної операції зміцнення. При цьому змінюються і еквівалентні напруження, і повні переміщення. Тим самим забезпечується досягнення того чи іншого бажаного результату. Таким чином, обґрунтовано можливість та доцільність постановки та розв'язання оптимізаційної задачі за певними критеріями, наприклад, за рівнем еквівалентних напружень, повних переміщень або контактного тиску.

Перша із вимог напряму впливає на довговічність у спряженні елементів ТдЕС. У свою чергу, зростаючий рівень навантажень у цьому спряженні призводить до зростання зношування, тертя і напружень. Отже, запускаються прогресуюча спіраль «навантаження – контакт – тертя – зношування», що спричиняє погіршення показників міцності, довговічності та ККД.

Друга із означених вище вимог напряму впливає на ККД ТдЕС у складі яких є дискретно-континуально зміцнені деталі.

Крім перелічених, можна навести й інші реальні та потенціальні приклади контактної взаємодії дискретно, континуально або дискретно-континуально зміцнених деталей конструкцій елементів військової та цивільної техніки. Для кожного із випадків можливо сформулювати оптимізаційну задачу під заданий критерій чи обмеження. Разом із тим розроблена модель аналізу напружено-деформованого стану із урахуванням контактної взаємодії, що лежить в основі розв'язання задач синтезу, може бути застосована у будь-якому випадку. Для варіантів тільки дискретного або тільки континуального варіантів зміцнення варіативними можуть бути фізико-механічні властивості поверхневого шару (шорсткості) або хвилястість поверхні обробленої деталі. Це – аналоги мікроевластивостей зон дискретного зміцнення, відповідно.

Висновки.

У результаті здійснених досліджень можна зробити такі висновки.

1. У роботі розроблено підхід до аналізу напружено-деформованого стану дискретно-континуально зміцнених деталей конструкцій військових та цивільних машин із урахуванням контактної взаємодії. Цей підхід відрізняється від відомих тим, що у розробленій моделі враховується чинники, які раніше не розглядалися як варіативні. Це дає можливість цілеспрямованого пошуку раціональних проектно-технологічних рішень при проектуванні, технологічній підготовці виробництва та виготовленні вузлів, що містять контактуючі зміцнені деталі військової техніки за певними критеріями.

2. Побудована параметрична модель містить фрагменти двох деталей, одна із яких зміцнена дискретно, а інша – континуально. Цим самим забезпечується, на відміну від

попередніх моделей, варіативність властивостей досліджуваної системи тіл, а, отже, і можливість здійснення багатоваріативного аналізу напружено-деформованого стану з урахуванням контактної взаємодії.

3. Розроблена структурна схема пристрою для зміцнення деталей військових та цивільних машин, а також визначені властивості цих зміцнених зразків.

Розроблений підхід, конструкція установки, моделі та методи досліджень застосовні до досліджень напружено-деформованого стану контактуючих дискретно-континуально зміцнених деталей конструкцій військових та цивільних машин задля підвищення їх технічних характеристик.

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. Грабовський А.В., Ткачук М.М., Кравченко С.О., Ткачук М.А., Льозний О.С., Ткачук Г.В., Новіков М.К. Ефект температурного впливу на контактну взаємодію дискретно-континуально зміцнених тіл. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР. 2025. № 1. С. 27-46. 2. Високотехнологічні автономні турбодетандерні електричні станції задля енергобезпеки та енергонезалежності: монографія/ М. А. Ткачук та ін.; за заг. редю М. М. Ткачука. Харків: ФОП Панов А. М. 2025. 196 с. 3. Ткачук М. М., Новіков М., Грабовський А., Кравченко С., Ткачук М. А., Подреза С. Створення технології дискретно-континуального зміцнення елементів автономних турбодетандерних електростанцій. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР. 2024. № 1. С. 121–131. 4. Tkachuk N. A., Kravchenko S. A., Pylev V. A., Parsadanov I. V., Grabovsky A. V., Veretelnik O. V. (2019) Discrete and Continual Strengthening of Contacting Structural Elements: Conception, Mathematical and Numerical Modeling. Science and Technique. 18 (3), 240–247. 5. Sobol, O. V., Pinchuk, N. V., Meylekhov, A. A., Subbotina, V. V., Dur, O., Stolbovoy, V. A., & Kovteba, D. V. (2020). Structural engineering of multi period (TiMo) N/ZrN vacuum arc coatings. Functional materials, 4, 737. 6. Postelnyk, H. O., Pinchuk, N. V., Meylekhov, A. A., Zhadko, M. A., Andreev, A. A., & Stolbovoy, V. A. (2021). Influence of Bias Potential Magnitude on Structural Engineering of ZrN-Based Vacuum-Arc Coatings. Physics and Chemistry of Solid State, 22(1), 66-72. 7. Sobol', O., Dur, O. (2020). Structural Engineering of Nanocomposite Coatings Based on Tungsten and Titanium Carbides. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Zajac, J., Peraković, D. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 8. Subbotina, V., Sobol, O., Belozarov, V., Subbotin, A., Smyrnova, Y. (2020). A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on D16 alloy during microarc oxidation in electrolytes of different types. Eastern-european journal of enterprise technologies, vol. 4, no. 12 (106), pp. 14–23. 9. Субботін О. В., Білозеров В. В., Волков О. О., Субботіна В. В., Шевцов В. М. Фрикційні властивості МДЮ-покриттів на алюмінієвих сплавах. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР. 2022. № 2. С. 59–63. 10. Shen, D., Cai, J., Guo, C., Liu, P. (2013), “Evolution of residual stresses in micro-arc oxidation ceramic coatings on 6061 Al alloy”, Chinese journal of mechanical engineering, Vol. 26, Iss. 6, pp. 1149–1153. 11. Dean, J., Gu, T., Clyne, T.W. (2015), “Evaluation of residual stress levels in plasma electrolytic oxidation coatings using a curvature method”, Surface and coatings technology, Vol. 269, pp. 47–53. 12. Martin, J., Leone, P., Nomine, A., Veys-Renaux, D., Henrion, G., Belmonte, T. (2015), “Influence of electrolyte ageing on the plasma electrolytic oxidation of aluminium”, Surf Coat Technol, Vol. 269, pp. 36–46. 13. Matykina, E., Arrabal, R., Mohedano, M., Mingo, B., Gonzalez, J., Pardo, A. (2017), “Recent advances in energy efficient PEO processing of aluminium alloys”, Transactions of nonferrous metals society of China, Vol. 27, pp. 1439–1454. 14. Javidi, M., Fadaee, H. (2013) “Plasma electrolytic oxidation of 2024-T3 aluminum alloy and investigation on microstructure and wear behavior”, Applied surface science, Vol. 286, pp. 212–219. 15. Subbotina, V., Sobol, O., Belozarov, V., Subbotin, A., Smyrnova, Y. (2020), “A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on D16 alloy during microarc oxidation in electrolytes of different types”, asterneuropean journal of enterprise technologies, Vol. 4, № 12 (106), pp. 14–23. 16. Dyyak, I.I., Prokopyshyn, I.I., Prokopyshyn, I.A., Styahar, A.O. (2024). Numerical Analysis of Contact Between Elastic Bodies in the Presence of Thin Coating and Nonlinear Winkler Surface Layers. In: Altenbach, H., Bogdanov, V., Grigorenko, A.Y., Kushnir, R.M., Nazarenko, V.M., Eremeyev, V.A. (eds)

Selected Problems of Solid Mechanics and Solving Methods. Advanced Structured Materials, vol. 204. Springer, Cham. **17.** Martynyak, R.M., Prokopyshyn, I.A. & Prokopyshyn, I.I. Contact of Elastic Bodies with Nonlinear Winkler Surface Layers. *J Math Sci* 205, 535–553 (2015). **18.** Prokopyshyn, I.I., Styahar, A.O. Numerical Analysis of Contact of the Elastic Bodies One of which Has a Discontinuous Thin Coating. *Mater Sci* 57, 734–744 (2022). **19.** Prokopyshyn, I.I., Styahar, A.O. Investigation of Contact between Elastic Bodies One of Which has a Thin Coating Connected with the Body through a Nonlinear Winkler Layer by the Domain Decomposition Methods. *J Math Sci* 258, 477–506 (2021). **20.** Kinderlehrer D., Stampacchia G. *An Introduction to Variational Inequalities and Their Applications. Classics in Applied Mathematics (Vol. 31).* SIAM, 2000. 333 p. **21.** Trémolières R., Lions J.-L., Glowinski R. *Numerical Analysis of Variational Inequalities.* Amsterdam: Elsevier, 2011. 775 p. **22.** Pohrt, R., Popov, V. L. (2013). Contact mechanics of rough spheres: Crossover from fractal to hertzian behavior. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Tribology*, 2013, Article ID 974178, 4 p. **23.** Li, Q., Pohrt, R., Lyashenko, I. A., Popov, V. L. (2018). Boundary element method for nonadhesive and adhesive contacts of a coated elastic half-space. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 1350650119854250. **24.** Ciavarella M. (2015). Adhesive rough contacts near complete contact. *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 104, pp. 104–111. **25.** Persson B.N.J. (2001). Elastoplastic contact between randomly rough surfaces. *Physical Review Letters*, vol. 87(11), pp. 116101. **26.** Pohrt R., Popov V. L. (2013). Contact stiffness of randomly rough surfaces. *Scientific reports*, vol. 3(1): 3293. **27.** Li Q., Popov V. L. (2019). Adhesive contact between a rigid body of arbitrary shape and a thin elastic coating. *Acta Mechanica*, vol. 230, iss. 7, pp. 2447–2453.

Ткачук М. А., Грабовський А. В., Кравченко С. О., Ткачук М. М., Лещенко В. М., Кохановська О. В., Марусенко С. І., Храмцова І. Я., Бондаренко Л. М., Коба А. М., Льозний О. С.

СИНТЕЗ ПРОЄКТНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ УСТАНОВОК ДЛЯ ДИСКРЕТНОГО ЗМІЦНЕННЯ МАШИНОБУДІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ

У роботі описаний процес синтезу проєктно-технологічних рішень установок для дискретного зміцнення машинобудівних конструкцій. Проаналізовані процеси і стани, що реалізуються при дискретно-континуальному зміцненні елементів конструкцій військової та цивільної техніки.

M. A. Tkachuk, A. Grabovskiy, S. Kravchenko, M. M. Tkachuk, V. Leshchenko, O. Kokhanovska, S. Marusenko, I. Khrantsova, L. Bondarenko, A. Koba, O. Loznyi

SYNTHESIS OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS OF INSTALLATIONS FOR DISCRETE STRENGTHENING MACHINE-BUILDING STRUCTURES

The paper describes the process of synthesis of design and technological solutions for installations for discrete strengthening of machine-building structures. The processes and states that are implemented during discrete-continuous strengthening of structural elements of military and civil equipment are analyzed.