

УДК 539.3

Ткачук М.А., Сапожников В.М., Шеремет В.М., Васильєва Т.О., Грабовський А.В.

НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ДИСКРЕТНОГО ЗМІЦНЮВАННЯ ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН: НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПРИПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ

Вступ. Сучасні машини працюють в умовах інтенсивних механічних навантажень. Основні їх елементи здійснюють взаємний рух з тертям під дією значних сил. Як приклади – колінчасті вали та поршні двигунів, вали верстатів, осі автомобілів, підшипники, ротори турбін. Спільними рисами цих елементів машин є наступні: 1) вони є основними елементами машин, а після їх виходу із ладу або виходить з ладу вся машина, або відбувається аварія; 2) міцність і надійність роботи цих елементів на 80-90 % визначається не «об'ємною» міцністю, а «поверхневою». Це значить, що великий контактний тиск, тертя та зношування призводять до втрати міцності поверхневих шарів при багатоциклових навантаженнях. Для таких деталей застосовують різні способи поверхневого зміцнення: азотування; цементация; наплавка міцного матеріалу; нанесення покриття.

Проте традиційні способи мають суттєві недоліки. По-перше, традиційні способи забезпечують або підвищення міцності, але при цьому зменшують зносостійкість, 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.

Таким чином, виникає проблема підвищення ресурсу таких високонавантажених деталей. Основна ідея, яка висувається: потрібно йти не шляхом компромісів, а шляхом синергетики. Потрібно відмовитися від традиційного напрямку при вирішенні проблеми, наприклад, тільки за рахунок підвищення твердості поверхні. Потрібно знайти та обґрунтувати альтернативне рішення, яке радикально підвищить міцність та зносостійкість 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 деталей, і для її ремонту.

Така нетрадиційна задача є не тільки технологічною, але й науковою. При цьому наукова частина роботи є дуже важливою, оскільки ідея технологічного процесу уже існує і описана в роботах [1-5]. Вона полягає у проведенні не континуального, а дискретного зміцнення. Ідея була частково перевірена на практиці. Є окремі позитивні результати. Проте потрібно розробити наукову основу технології, оскільки деякі технологічні параметри визначаються для конкретних деталей методом проб та помилок. У результаті ми повинні одержати нове теоретичне обґрунтування технології дискретного зміцнення. Крім того, дані дослідження переслідують ще одну мету. У світі на даний час дуже багато машин, деталі яких зміцнені за традиційними технологіями. Їх ресурс уже вичерпався або вичерпується. Тому ставиться задача розробити технологію, що може зміцнювати і елементи машин, які зміцнені «чужим» способом. Це робить дану проблему ще більш важливою. І, нарешті, дані теоретичні розробки та числові результати будуть корисними при розробці інших технологічних рішень.

Формулювання проблеми. 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 показала, що, наприклад, такою слабкою ланкою у тепловоза 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, оснащено 16-ти-циліндровим дизелем 5Д49. Колінчастий вал дизеля виготовляють із сталі, яку легують хромом, молібденом та ванадієм, а для надання валу високої зносостійкості 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 того щоб зміцнити поверхневий шар 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 понад 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. В результаті там, де цей шар найтонший, виникають втомні віспоподібні вививи металу глибиною до 0,5 мм, що вимагає перешліфування вала в наступний менший ремонтний розмір [1-7]. 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. В результаті цього 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 кількості грамів металу [1-7]. Те ж саме – для колінчастих двигунів типу Д-80 із чавуна, модифікованого магнієм.

Крім тепловозів, подібні проблеми виникають при ремонті інших важких машин – прокатних станів, турбін, потужних металорізальних верстатів, морських та річкових суден тощо. Тому багатьма авторами [1-7] 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. Також були вивчені їх можливості щодо використання для реалізації завдань даної роботи. Зокрема, були досліджені методи наплавлення, напилення, іонного імпульсного азотування, дифузійного борування, поверхневого гартування, плазмових технологій, холодного пластичного деформування та різання, модифікування за допомогою УЗК, нанесення мікро- і макрорельєфів, нанесення покриттів змінної товщини, гібридних технологій, а також дискретних покриттів. Об'єктами досліджень служили колінчасті вали ДВЗ, поршні, зубчасті колеса, поршневі пальці, гільзи, шпинделі верстатів, валки прокатних станів, ротори електричних машин, вали турбін.

Відповідно, лідерами у розробці та використанні цих процесів є фірми Японії, Німеччини, США та інших країн [1-5]. Аналогічні розробки здійснювалися у Радянському Союзі. На підприємствах військово-промислового комплексу, наприклад, широке застосування знайшли технології іонно-плазмового напилення (типу «Булат» та інші), керамічні покриття (Al_2O_3), лазерне зміцнення та інші технології.

Проте дані технології мають суттєві недоліки. Як зазначалося вище, одним із альтернативних рішень у такому випадку є технологія дискретного зміцнення [1-7]. У попередніх роботах [8-10] описані проблемні питання, що постають при цьому: вибір зміцнюючого матеріалу; обґрунтування режимів нанесення зон дискретного зміцнення; пошук раціональних параметрів розташування зон дискретного зміцнення. У цих роботах частково були розв'язані деякі задачі. Зокрема, визначено рекомендований інтервал коефіцієнта дискретності (тобто відносної площі зміцнених зон), який лежить у межах 0,65 – 0,75. Проте при цьому розглядалася або одинична зона дискретного зміцнення, або їх періодична структура з шаховим розташуванням даних зон по поверхні зміцнення. У даній роботі розглядається вплив варіантів розташування цих зон на характеристики напружено-деформованого стану приповерхневих шарів зміцнюваних деталей.

Розрахункова схема. Розглянемо поставлену задачу на прикладі трьох варіантів нанесення зон дискретного зміцнення (рис. 1).

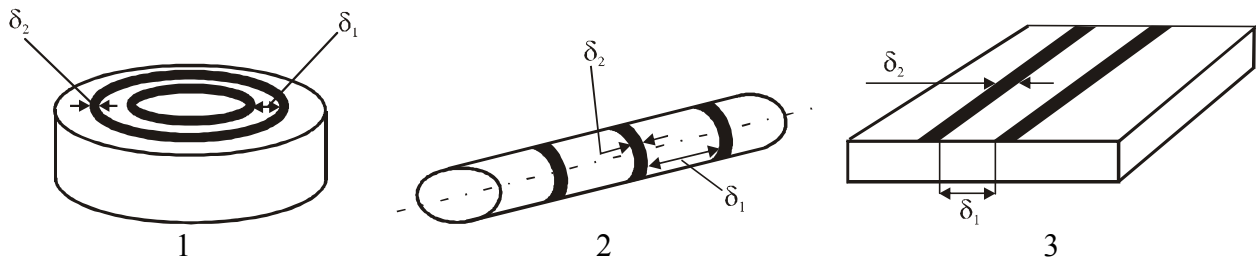


Рисунок 1 – Варіанти нанесення зон дискретного зміцнення:

1 – концентричні кола; 2 – система циліндричних смуг; 3 – система паралельних смуг

У цих випадках коефіцієнт дискретності приблизно дорівнює (див. рис. 1):

$$\gamma = \frac{\delta_2}{\delta_1 + \delta_2}. \quad (1)$$

Задаємося основним матеріалом деталі – чавун високоміцний легований з кулястим графітом, модифікований магнієм (ТУ Д70.05 ДТ: 1978). Матеріал зміцнюваних зон - сталь 08X18H10T.

Залежно від коефіцієнту γ буде різним профіль деформованої (початково – плоскої) поверхні деталі. Ставиться задача на основі числового експерименту визначити ці залежності.

Моделі та результати. Геометричні та скінченно-елементні моделі досліджуваних областей – на рис. 2.

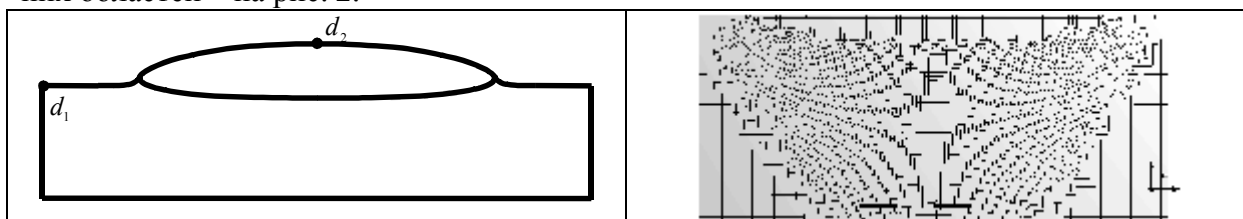


Рисунок 2 – Геометричні та скінченно-елементні моделі досліджуваних областей

На рис. 3 наведені типові розподіли переміщень поверхонь зміцнюваних деталей. На рис. 4 – результуючі залежності досліджень, на основі яких можна в кінцевому результаті побудувати в процесі подальших досліджень залежності

$$\Delta_i(\gamma) = (W_{\max} - W_{\min}) / p, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2)$$

де W_{\max}, W_{\min} – максимальні та мінімальні значення переміщень точок поверхні для i -го варіанту (див. рис. 1), мкм; p – величина прикладеного тиску (у даному випадку – 1 кПа). Тут вони наведені для варіанту 1 (див. рис. 1). Для інших варіантів картини аналогічні.

Величина Δ_i , визначена за допомогою (2), є кількісною характеристикою так званого « Δ -ефекту» [8-10]. Він полягає у тому, що дискретно зміцнені поверхні, які плоскі до навантаження, приймають хвилясту форму після навантаження. Це призводить до збільшення маслоємності поверхності та покращення трибологічних характеристик (коефіцієнт тертя, зношуваність). Таким чином, опосередковано цей коефіцієнт є індикатором ефективності застосування технології дискретного зміцнення.

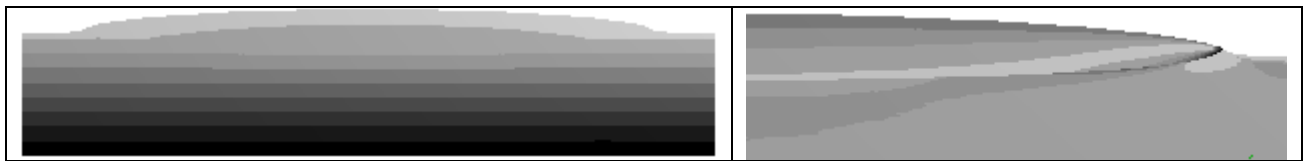


Рисунок 3 – Типові розподіли переміщень та інтенсивності напружень за Мізесом на картині деформованих поверхонь зміцнюваних деталей

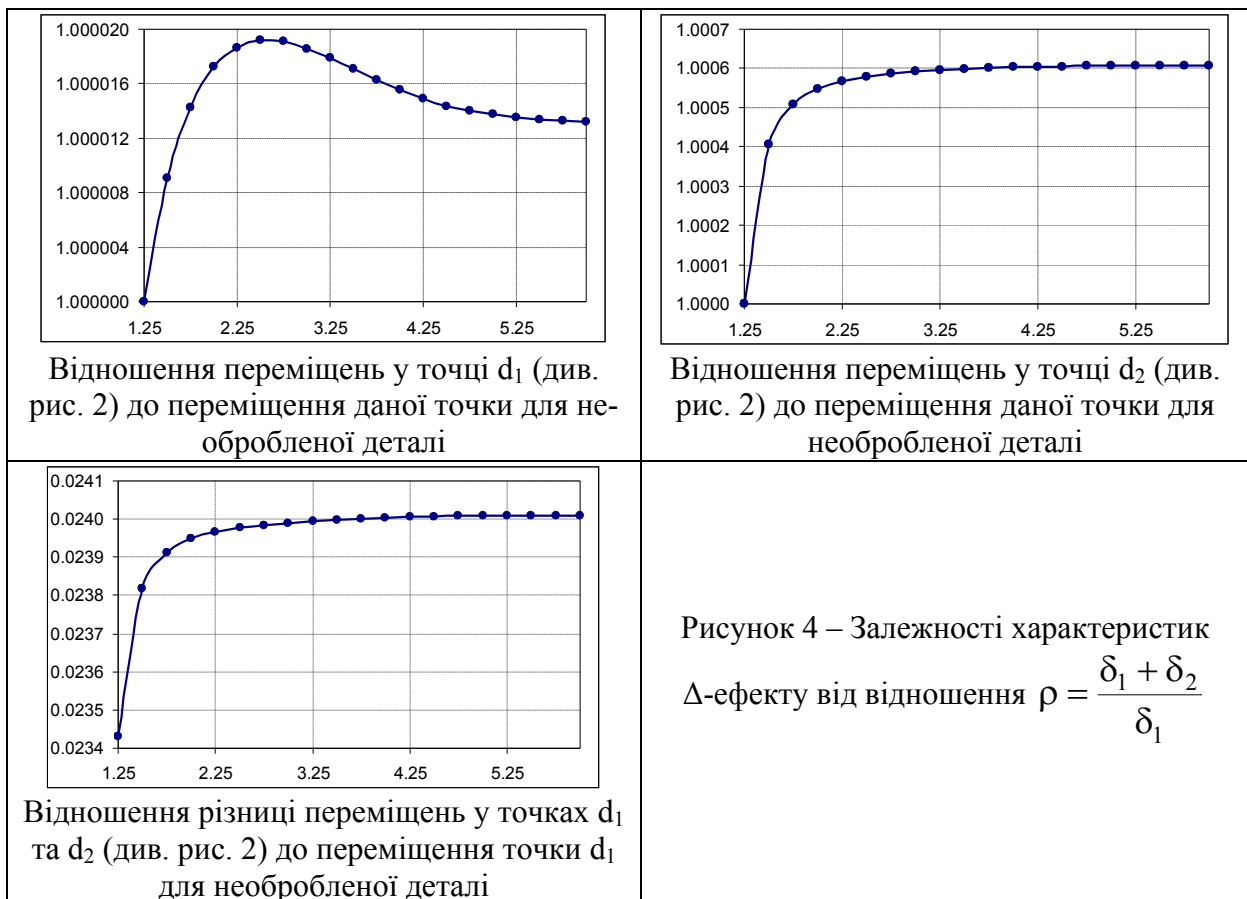


Рисунок 4 – Залежності характеристик Δ -ефекту від відношення $\rho = \frac{\delta_1 + \delta_2}{\delta_1}$

Висновки. Аналіз одержаних результатів свідчить про те, що коефіцієнт дискретності досить сильно впливає як на характер напружено-деформованого стану приповерхневих шарів, так і на величину Δ -ефекту. Крім того, на Δ -ефект також впливає варіант нанесення зміцнювального покриття. Таким чином, дані чинники є значущими та варійованими для пошуку раціональних схем нанесення зміцнювальних покриттів та

параметрів дискретності. Визначення даних залежностей із використанням запропонованого підходу є завданнями для подальших досліджень.

Література: 1. Двигуни внутрішнього згоряння: серія підручників у 6 томах / За ред. А.П. Марченка та А.Ф. Шеховцова. – Харків: Прапор, 2004. 2. Гончаров В.Г. Повышение износостойкости коленчатых валов форсированных дизелей большой мощности / В.Г. Гончаров, Э.К. Посвятенко, С.С. Дяченко // Резание и инструмент в технологических системах. – 2009. – Вып. 77. – С. 53–65. 3. Гончаров В.Г. Повышение износостойкости трибосистем / В.Г. Гончаров, Б.В. Савченков // Автомобильный транспорт: Сб. научн. тр. Харьк. нац. авт.-дор. ун-та. – Х., 2003. – Вып.13. – С. 117–119. 4. Гончаров В.Г. Исследование изменения характеристик трения по глубине дискретного слоя / В.Г. Гончаров, А.К. Олейник, Г.Г. Гринченко // Збірник наукових праць Запорізького національного техніч. ун-ту. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2003. – С. 100–101. 5. Влияние режимов дискретного упрочнения на эксплуатационные свойства деталей автомобилей / Б.В. Савченков, В.Г. Гончаров, Н.Г. Александров, А.Л. Самсоник // Автомобильный транспорт: Сб. научн. тр. Харьк. нац. авт.-дор. ун-та. – Х., 2005. – Вып.16. – С. 83–85. 6. Гончаров В.Г. Підвищення ресурсу транспортної техніки удосконаленням технології ремонту колінчастих валів: Автореф. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / В.Г. Гончаров: Харківський національний автомобільно-дорожній ун-т. – Х., 2008. – 19 с. 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. 147-156. 8. 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. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – №2. – С. 118-123. 9. Гончаров В.Г. Наукові основи зміцнення поверхонь високонавантажених елементів двигунів / В.Г. Гончаров, Н.А. Ткачук, С.С. Дьяченко, С.А. Кравченко, В.М. Шеремет // Вісник НТУ «ХПИ». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – 2009. – №28. – С.20-30. 10. Шеремет В.М. Дослідження напружено-деформованого стану деталей машин з дискретним зміцненням / В.М. Шеремет, М.А. Ткачук, Т.О. Васильєва // Вісник НТУ «ХПИ». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – 2010. – №19. – С.150-155.

Ткачук М.А., Сапожников В.М., Шеремет В.М., Васильєва Т.О., Грабовський А.В.

**НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ДИСКРЕТНОГО ЗМІЦНЮВАННЯ
ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН: НАПРУЖЕНО-
ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПРИПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ**

У статті поставлено задачу визначення раціональних параметрів дискретного зміцнення деталей високонавантажених конструкцій на основі дослідження деформації поверхневого шару. Розв'язана задача методом скінченних елементів. На частинних випадках продемонстровано вплив різних чинників на деформованість поверхні.

Tkachuk M.A., Sapozhnikov V.M., Sheremet V.M., Vasilyeva T.O., Grabovskiy A.V.

**NEW TECHNOLOGIES OF DISCRETE STRENGTHENING OF HIGH-LOADED
MACHINES ELEMENTS: STRESS-STRAIN STATE OF SURFACE LAYERS**

In the paper a problem of discrete strengthening rational parameters determination for high-loaded constructions details is set on the basis of surface layer deformation research. This task is solved by finite element method. The influence of different factors on surface deformation is shown on special cases.