

5.Hoon Sohn, Charles R Farrar (2001). *Damage diagnosis using time series analysis of vibration signals*, 2001/06/01 <https://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/10/3/304>

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ЗМІЦНЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС МЕХАНІЧНИХ КОРОБОК ПЕРЕДАЧ АВТОМОБІЛЯ

Бабак О., Пасічник О., Вичавка А., Войтюк С.  
Хмельницький національний університет, Україна

### **Анотація**

*Без отримання теоретичних і експериментальних даних про зміну структури та властивостей зміцнених поверхневих шарів неможливий науковий вибір найбільш ефективних технологій підвищення зносостійкості. Сучасна промисловість не має систематизованих і обґрунтованих рекомендацій щодо використання технологічних і комплексних методів вибору режимів зміцнюючої обробки. Це відбувається незважаючи на те, що було досягнуто значних успіхів у вивченні процесів структуроутворення при модифікації поверхні. Це не дозволяє повністю використовувати потенційні можливості більшості високоефективних зміцнюючих процесів у певних умовах автомобілебудівного виробництва. Це також перешкоджає їх широкому промислового використанню, знижує практичну цінність існуючих наукових і практичних розробок у цій галузі та обмежує їх застосування.*

### **Ключові слова**

*Поверхнєве зміцнення, фінішне плазмове зміцнення, цементация, термічна обробка, зносостійкість*

## RESEARCH ON THE EFFICIENCY OF TECHNOLOGIES FOR STRENGTHENING GEAR WHEELS OF AUTOMOTIVE MANUAL TRANSMISSIONS

Babak O., Pasichnyk O., Vychavka A., Voytyuk S.  
Khmelnyskyi National University, Ukraine

### **Abstract**

*Without obtaining theoretical and experimental data on the change in the structure and properties of the modified surface layers, it is impossible to scientifically select the most effective strengthening technologies. Modern industry does not have systematic and substantiated recommendations for the use of strengthening methods and comprehensive methods for selecting strengthening treatment modes. This is despite the fact that significant progress has been made in studying the processes of structure formation during surface modification. This does not allow the full potential of most highly effective strengthening processes to be used in certain*

*conditions of automotive production. This also hinders their widespread industrial use, reduces the practical value of existing scientific and practical developments in this field, and limits their application.*

**Keywords**

*Surface hardening, plasma finishing hardening, carburizing, heat treatment, wear resistance*

**Вступ**

Зубчасті колеса є найбільш масовими деталями у машинобудуванні. Розробка зубчастих передач для високошвидкісних прецизійних машин і агрегатів є необхідною завдяки тенденції транспортного машинобудування до збільшення потужності, навантажень і швидкостей. Технології зміцнення зубчастих коліс і шестерень необхідні для забезпечення надійності трансмісій транспортних засобів, мотоциклів, автомобілів та інших транспортних засобів. Враховуючи тенденцію зниження ваги транспортних машин, необхідно використовувати зубчасті колеса, які мають високу міцність [1, 2, 3, 4].

**Об'єкт та методи дослідження**

Об'єктом дослідження є процес поверхневого зміцнення зубчастих коліс механічних коробок передач автомобілів.

Дослідження стосується методів і технологій поверхневого зміцнення зубчастих коліс механічних коробок передач автомобілів.

Зміцнення поверхні та нанесення зміцнюючих покриттів є найбільш важливим напрямком у машинобудуванні. У сфері поверхневого зміцнення існує та використовується понад 130 технологій. У зв'язку з обмеженістю інформації, протиріччями та суперечливими тенденціями розвитку окремих технологій застосування економічно неефективних рішень може завдати шкоди економіці України. Невдалі конструктивні та технологічні рішення на виробництві можуть погіршувати стан справ і посилювати негативні наслідки[1].

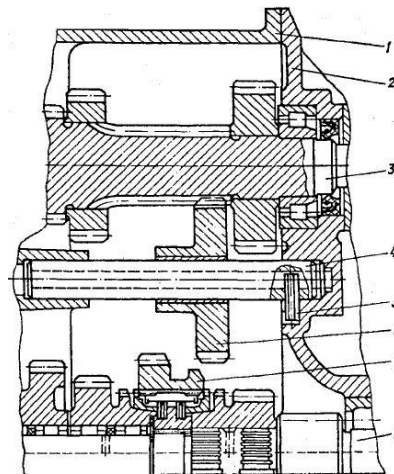
**Постановка завдання**

Мета роботи полягає в тому, щоб дослідити високоефективні методи поверхневого зміцнення та покращення на основі трибологічних особливостей зубчастих коліс механічних коробок передач автомобілів.

Щоб досягти поставленої мети, необхідно вирішити такі проблеми:

1. Дослідити існуючі методи покращення зносостійкості зубчастих коліс і запропонувати ідеї для їх впровадження;
2. Дослідити ефективність електроіскрового зміцнення зубчастих коліс експериментально;
3. З'ясувати, наскільки ефективним є зубчасте колесо після електроіскрового легування з різними структурами металевої матриці.
4. Розробити електроіскрове легування для обробки зубчастих коліс.

Циліндричні прямозубі зубчасті колеса з зовнішнім зачепленням середнього модуля (від 2 до 6 мм) широко використовують у транспортному машинобудуванні (рис. 1). Вони в основному виготовляються з цементованих сталей (12Х2Н4А, 20Х3МВФ та ін.) і азотованих сталей (40ХНМА, 38ХМЮА та ін.) за традиційними технологіями: 1) зубофрезерування, зубошліфування, азотування; 2) зубофрезерування, зубошліфування, азотування.



*Рис. 1. Проміжна шестерня заднього ходу механічної коробки передач автомобіля ЗАЗ-1103:*

*1 – корпус коробки; 2 – корпус зчеплення; 3 – ведучий вал; 4 – вісь проміжної шестерні заднього ходу; 5 – проміжна шестерня заднього ходу; 6 – проміжна шестерня заднього ходу; 7 – ведена шестерня заднього ходу; 8 – ведуча шестерня головної передачі.*

Підвищення здатності витримувати більше навантаження є основною тенденцією в виробництві зубчастих коліс цієї групи, яка характеризується зносостійкістю, контактною міцністю та міцністю на згин. Удосконалення методів механічної та хіміко-термічної обробки призвело до технологічного підвищення надійності зубчастих коліс. Основним завданням механічної обробки коліс є забезпечення якості поверхні

відповідної точності та шорсткості, одночасно підвищуючи стійкість зуборізних інструментів при обробці матеріалів з твердістю більше HRC 40.

Зубці коліс зубчастих передач є основним фактором, який визначає працездатність коліс. При роботі передачі зубці піддаються циклічному контактному навантаженню сили  $F_n$ , коли вони проходять через зону зачеплення. Це викликає контактні напруження  $\sigma_H$  та напруження згину  $\sigma_F$  в перерізі ніжки зубця (рис. 2). Це напруження змінюється протягом певного переривчасто-періодичного циклу, оскільки входження в зачеплення зубців є періодичним. Час дії напруження  $\sigma_F$  колеса за один оборот  $t_1$  дорівнює часу зачеплення одного зубця шестерні  $t_2$ . Напруження  $\sigma_H$  діють ще менш ефективно. Ця кількість часу дорівнює часу, який залишається в зачепленні конкретної точки поверхні зубця.

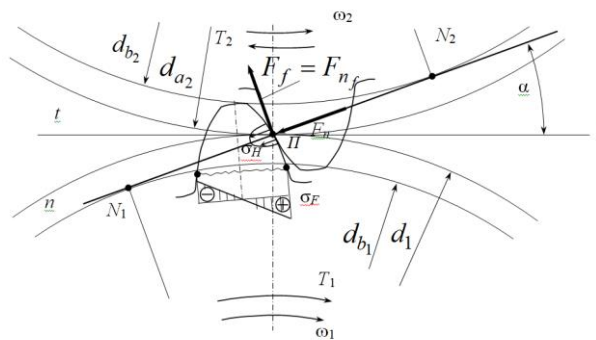


Рис. 2. Напружений стан зубця шестерні

Цементация є традиційним методом зміцнення зубчастих коліс. Цементация — це процес дифузійного насичення вуглецем поверхневого шару сталевих деталей. Метою цементации є досягнення високої твердості та зносостійкості поверхні та в'язкої серцевини деталі. Механічно оброблені деталі з припуском на шліфування 50–100 мкм піддаються цементации. Коли частина деталі піддається цементации, інші ділянки захищаються тонким шаром міді, нанесеним електролітичним способом, або спеціальними вогнетривкими обмазками.

Сталі з низьким вмістом вуглецю 0,1–0,2% піддають цементации. Після цементации концентрація вуглецю на поверхні досягає 1,0%. Зазвичай глибина цементованого шару становить 0,5–2,5 мм при вмісті вуглецю порядку 0,4% [4]. Завжди проводять гартування з низьким відпуском, щоб досягти високої твердості поверхні та в'язкої серцевини після цементации.

Виготовлення зубчастих коліс автомобілів використовує стандартну технологію, яка включає цементацію, високий відпустку та повторний нагрів під загартування протягом усього циклу виробництва. Цей тип обробки застосовується приблизно на 80% зубчастих коліс. Гартування зубчастих коліс призводить до значного спотворення форми зубів, і точність шестерень знижується. Витривалість знижується через гартівні тріщини та надлишкове напруження. Для зменшення гартівних деформацій використовуються різні конструкції гартувальних баків, автоматичне загартування під пресом, загартування в газі високого тиску та вибір гартівних рідин.

Метою дослідження є вивчення високоефективних методів поверхневого зміцнення та покращення на основі трибологічних особливостей зубчастих коліс механічних коробок передач автомобілів.

Зносостійкість зубчастих коліс автомобілів можна підвищити за допомогою відомих технологій нанесення зносостійких покриттів, таких як вакуумне іонно-плазмове напилення, електроіскрове легування, фінішне плазмове зміцнення, а також технологій модифікування поверхні, таких як лазерне та плазмове гартування. У процесі вивчення існуючих підходів до підвищення зносостійкості зубчастих передач було обрано фінальну плазмову обробку.

Процес лазерного та плазмового гартування, який проводиться в повітряному середовищі, може призвести до окислення оброблюваної поверхні. Процес електроіскрового легування не дозволяє створювати тонкоплівкові покриття товщиною до декількох мікрометрів. При вакуумному іонно-плазмовому напиленні температура оброблюваних виробів під час нанесення покриття коливається від 250 до 500 °C. Товщина покриття значною мірою залежить від різнотовщинності виробу та його розташування по відношенню до випарника.

Останнім часом було опубліковано багато статей про застосування алмазних і алмазоподібних плівок для зміцнення зубчастих передач і технологічних деталей. Німеччина навіть випустила спеціальний стандарт VOI 2840 для алмазоподібних покриттів. Впровадження цих процесів залежить від використання дорогого вакуумного устаткування.

Нові промислові технології включають фінішне плазмове зміцнення зубчастих коліс, яке дозволяє наносити покриття алмазоподібного тонкоплівкового (до 3 мкм) покриття в без вакуумному просторі при атмосферному тиску. Зміцнення зубчастих коліс відбувається без зміни вихідної шорсткості робочих поверхонь при інтегральній температурі нагріву виробу до 100 °C.

Ця технологія використовує введення пар рідких технологічних препаратів у дуговий плазмотрон для нанесення алмазоподібних тонкоплівкових покриттів. Після цього плазмохімічні реакції наносять покриття на матеріал.

Металоорганічні та органічні сполуки в рідкому стані використовуються для отримання алмазоподібних покриттів на основі оксікарбонітрида кремнію. При однозмінній роботі установки технологічні препарати витрачаються не більше 0,5 л/хв. Аргон використовується як плазмоутворюючий газ дугового плазмотрона. Це тому, що він необхідний для довговічності та надійності компонентів плазмотрона під час тривалого процесу. У цьому випадку стійкість катодного та анодного вузла плазмотрона під час завершення плазмового зміцнення досягає приблизно 1000 годин безперервної роботи.

Аморфний стан покриття, що наноситься, має підвищену твердість (до 53 ГПа), високий питомий електричний опір ( $10^{10}$  Ом·м), низький коефіцієнт тертя та хімічну інертність. Підвищена швидкість охолодження осаджуваного покриття та наявність елементів-аморфізаторів є однією з основних особливостей фінішного плазмового зміцнення. Відомо, що аморфні матеріали не мають дефектів, властивих кристалічним тілам. Вони ізотропні, не мають меж і дислокацій зерен, їх структура гомогенна та їх більш складна дифузія по вакансіям. Аморфні покриття служать бар'єрними плівками, які перешкоджають швидкій дифузії, а також пасивуючими плівками, які підвищують стійкість матеріалів до корозії та запобігають корозійному розтріскуванню під напругою та водневому окрихчуванню.

Після завершення плазмового зміцнення профіль підкладки повторюється покриттям. Поперечний шліф, отриманий за допомогою багатоцільового скануючого (растрового) мікроскопа ISM-6460LV, показаний на рис. 3. Під покриттям немає мікротріщин, пор або інших дефектів. Зміцнююче покриття у вигляді оптично прозорої плівки створює райдужні відтінки від фіолетово-блакитного до зелено-червоного на полірованій поверхні.

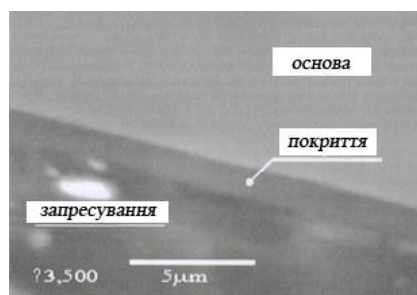


Рис. 3. Поперечний шліф зразка з покриттям фінішного плазмового зміцнення (x3000)

Фінішне плазмове зміцнення має кілька переваг у порівнянні з альтернативними методами зміцнення, такими як іонно-плазмове напилення, лазерне та електроімпульсне зміцнення, епіламірування та нанесення кластерних покриттів. Фінішне плазмове зміцнення має такі переваги - висока відтворюваність і стабільність зміцнення за рахунок подвійного ефекту від нанесення зносостійкого покриття та структурних змін у тонкому приповерхневому шарі

Параметри шорсткості поверхні не змінюються після процесу зміцнення; процес обробки не викликає деформацій деталей при мінімальному нагріванні (не більше 100–120°C); можна зміцнити місцеві (за глибиною та площею) об'єми деталей, зберігаючи вихідні властивості матеріалу в іншому обсязі; і на поверхні зміцнення утворюються залишкові напруження стиску, що підвищує втомну міцність виробу під час циклічного навантаження.

Недостатня продуктивність, підвищені рівні шуму та ультразвукове випромінювання є недоліками фінішного плазмового зміцнення.

### Результати та їх обговорення

Результати досліджень показують, що використання фінішного плазмового зміцнення покращує зносостійкість стандартної технології. Сприятлива форма мікрорельєфу та додаткове зміцнення поверхневого шару пояснюють цей ефект. Розроблена технологія забезпечує на 30% кращу зносостійкість зубчастих коліс, ніж стандартні зразки, як показано на (рис. 4). Формування мікрорельєфу в умовах змащування при рідинному режимі тертя є фактором, який сприяє високій зносостійкості зразків, а також їхньому корисному впливу залишкових напружень [5, 6, 7, 8, 9].

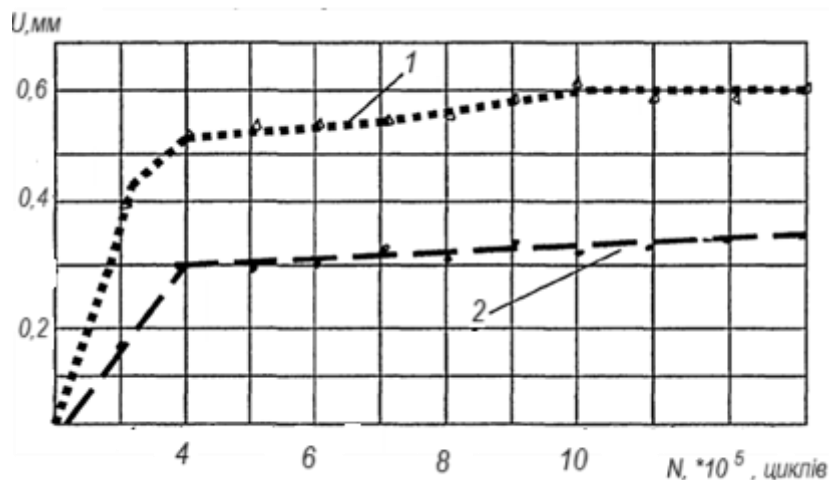


Рис. 4. Графік залежності зносу зразків від кількості циклів навантаження сталі 40ХНМА (варіант 1 - стандартний; варіант 2 - фінішне плазмове зміцнення)

Як відомо, знос металів при контактній-рідинній терті (в якому працюють розглянуті колеса) є результатом пластичних контактних деформацій на нерівностях і пов'язаних процесів, таких як втому, захоплення та окислення. Зміцнення (варіант 2) створює мікрорельєф з меншою висотою нерівностей і радіусами заокруглення вершини більшими, ніж при традиційному методі зміцнення зубчастих коліс. Зазначені характеристики мікрорельєфу дозволяють підтримувати рідинний режим тертя, що дозволяє зубчастій передачі працювати протягом усього періоду експлуатації при мінімальному зносі [10].

### **Висновки**

Фінішне плазмове зміцнення покращує навантажувальну здатність і зносостійкість зубчастих коліс. Результати випробувань показали, що зубчасті колеса, зміцнені за новою технологією, мають більшу зносостійкість на тридцять відсотків порівняно з зразками, зміцненими за традиційною технологією.

Тим не менш, для того, щоб використовувати технологію фінішного плазмового зміцнення в конкретному технологічному процесі, необхідно виконати низку робіт. Ці роботи включають визначення номенклатури виробів і поверхонь, які потребують зміцнення, а також відповідну підготовку виробничої бази (придбання та виготовлення стандартизованого та нестандартного устаткування, інструментів і приладів; підготовка виробничих приміщень і комунікацій).

### **Література**

1. Афтаназів І. С. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням : навч. посіб. / І. С. Афтаназів, А. П. Гавриш, П. О. Китичок. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 516 с.
2. Інженерія поверхні : підручник / К. А. Ющенко, Ю. С. Борисов, В. Д. Кузнецов, В. М. Корж. – Київ : Наукова думка, 2007. – 559 с.
3. Погребна Н. Е. Способи зміцнення металів : навч. посіб. / Н. Е. Погребна, В. З. Куцова, Т. В. Котова. – Дніпро : НМетАУ, 2021. – 89 с.
4. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин : навч. посіб. / А. Г. Фесенко [та ін.]. – Дніпро : РВВ ДНУ, 2015. – 104 с.

5. Пасічник О.А., Кузьменко А.Г., Бабак О.П. Вибір схеми лабораторних трибологічних випробувань та врахування масштабного фактора// Вісник Технологічного університету Поділля. – 2001. - №3. Ч.1 (33). – С. 39 – 41.
6. Пасічник О.А. Деякі аспекти лабораторних випробувань вузлів тертя на зношування// Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції "Наука і освіта 2004". Том 61. Технічні науки. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2004. – С. 62 – 64.
7. Пасічник О.А. Методологічні аспекти лабораторних випробувань вузлів на тертя та зношування при розрахунково-експериментальній оцінці величини зносу// Проблеми трибології. – 2005. - №1. – С. 80 – 83.
8. Пасічник О.А., Бабак О.П. Комп'ютеризований комплекс для вимірювання лінійних переміщень та зносу на основі індуктивного датчика// Проблеми трибології. – 2005. - №3. – С. 110 – 113.
9. Кузьменко А.Г., Пасічник О.А, Бабак О.П., Луценко В.В. Розробка програмного забезпечення для комп'ютеризації розрахунків параметрів закономірності зношування// Проблеми трибології. – 2006. - №.4 – С. 40 – 42.
10. Пасічник О.А., Бабак О.П. Вичавка А.А. Застосування інформаційних технологій в трибологічних вимірюваннях // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції "Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування" – Миколаїв: НУК, 2016 – С. 72 - 74.

## ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РОСЛИННИХ ОЛИВ ДЛЯ ТЕХНІЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ

Гетьман М.В.

Хмельницький національний університет, Україна

### *Анотація*

*Мастильні матеріали на основі мінеральних олив відіграють важливу роль у багатьох галузях промисловості — зокрема, для розсіювання тепла, зниження тертя між рухомими й нерухомими частинами механізмів. Водночас такі мастила мають значний негативний вплив на навколишнє середовище через труднощі утилізації відпрацьованої оливи та їхню токсичність у разі розливу, особливо в екологічно чутливих зонах.*

*У цьому огляді розглядаються можливості хімічної модифікації різних видів рослинних олій з метою покращення їхніх властивостей для використання як основи біомастил. Створення та впровадження мастильних матеріалів і промислових рідин на основі рослинної сировини має надзвичайно*