

УДК 621.9.048.6

О.Д. Клименко, канд. техн. наук  
Е.Л. Селезньов, канд. техн. наук

## ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗМІЦНЕННЯ ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВОЮ ОБРОБКОЮ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС

Луцький державний технічний університет, e-mail: admin@omt.dtu2.lutsk.ua

*Наведено результати дослідження впливу вібраційно-відцентрового зміцнення на зносостійкість зубчастих коліс силових передач.*

### Вступ

Надійність зубчастих коліс обумовлено передусім якістю матеріалу їх поверхневих шарів. Знаючи конструкційні фактори та умови експлуатації, можна через технологію обробки впливати на формування якості поверхневих шарів, а отже, на надійність зубчастих коліс. У технологічному процесі виготовлення зубчастих коліс, зокрема, силових передач, для зміцнення бокових поверхонь їх зубів доволі широко використовують і деякі різновиди поверхневого пластичного деформування (ППД).

### Аналіз досліджень і публікацій

Основний недолік методів поверхневого пластичного деформування [1; 2] для якісного зміцнення матеріалу бокових поверхонь зубів зубчастих коліс силових передач – недостатній рівень енергії деформування. Саме це стає на заваді в забезпеченні належних параметрів зміцнювальної обробки – високого градієнта залишкових стискальних напружень, значної поверхневої мікротвердості в поєднанні із формуванням зносостійкого поверхневого мікрорельєфу. Характерною відмінною ознакою вібраційно-відцентрового зміцнення коліс (ВВЗК) силових передач є підвищений, порівняно з традиційними методами ППД, рівень енергії деформування. Саме це є умовою високої ефективності процесу ВВЗК.

### Постановка завдання

Брак літературних даних щодо впливу технологічних параметрів процесів інтенсивного зміцнення на експлуатаційні властивості оброблених деталей зумовлює потребу в проведенні порівняльних випробувань, зміцнених вібраційно-відцентровою обробкою зубчастих коліс.

Необхідність цих досліджень підтверджується і тим, що запропоновано нові технологічні процеси виготовлення зубчастих коліс, в яких традиційні оздоблювально-викінчувальні операції, а подекуди і термооброблювальні, замінено вібраційно-відцентровим зміцненням.

### Дослідження впливу

### вібраційно-відцентрового зміцнення коліс на зносостійкість матеріалу

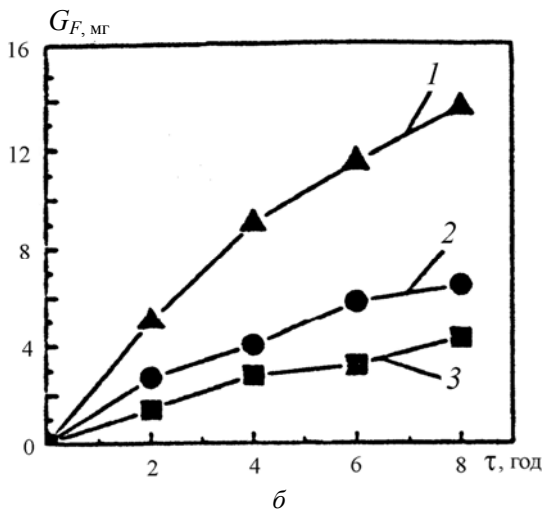
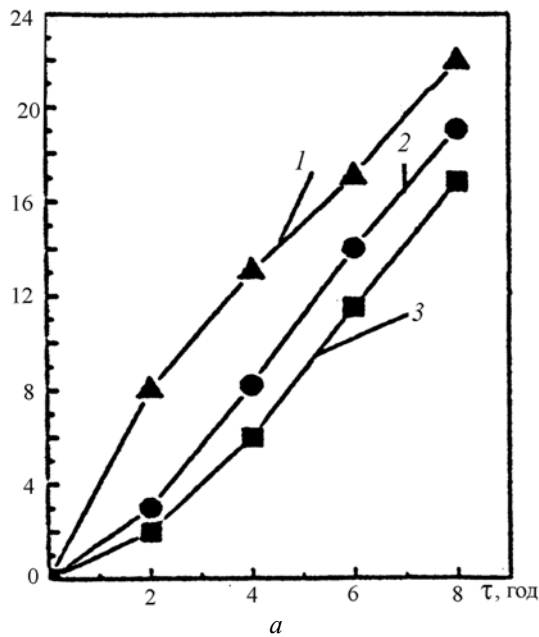
Дослідження впливу технологічних параметрів процесу ВВЗК на фізико-механічні властивості матеріалу зміцнених коліс і показники якості оброблених зміцненням бокових поверхонь зубів мають вагомим значення для оцінки технологічних можливостей цього методу [3]. Однак самі по собі вони недостатні для здійснення оптимізації технологічних параметрів процесу ВВЗК, оскільки не відображають безпосереднього впливу параметрів на експлуатаційні властивості матеріалу зміцнених зубчастих коліс, їх надійність і довговічність. Тому, враховуючи умови експлуатації зубчастих коліс силових передач, характер руйнувань і пошкоджень матеріалу робочих поверхонь їх зубів, як критерій оцінки ефективності ВВЗК обрано опір зміцненого матеріалу зношуванню внаслідок взаємного тертя зубів в середовищі мастила та опір матеріалу втомному руйнуванню.

Дослідження впливу технологічних параметрів процесу ВВЗК на зносостійкість зміцненого матеріалу проводили на машині тертя МТ-1М в умовах сталь по сталі в середовищі мастила при швидкості взаємного ковзання 0,9 м/с і питомому навантаженні 1–2 МПа.

Результати досліджень графічно зображено на рисунку.

Дослідження проводили на кільцевих зразках, зміцнених вібраційно-відцентровою зміцнювальною обробкою з технологічними параметрами, аналогічними зміцненню зубчастих коліс із ідентичними показниками якості зміцнювальної обробки, тобто товщини зміцненого шару, поверхневої мікротвердості і напруженого стану матеріалу, а також шорсткості обробленої поверхні. Дослідження проводили на зразках і зубчастих колесах, виготовлених зі сталі 40Х, яку найбільш широко використовують для виготовлення зубчастих коліс.

$G_F, \text{мг}$



Кінетика зношування пари сталь 40X – сталь 40X після поверхневого зміцнення вібраційно-відцентровою обробкою в середовищі мастила:  
 а – кільце; б – вкладка;  
 1 – нормалізація; 2 – гартований матеріал;  
 3 – поверхнєве зміцнення;  
 $G_F$  – вагове зношування;  $\tau$  – тривалість тертя

Результати випробувань порівнювали із даними аналогічних випробувань для нормалізованого та гартованого в мастилi з низьким (близько 200 °С) відпуском стану матеріалу.

Після гартування зразки-кільця зі сталі 40X мали твердість HRC 52–54. Після термообробки чи нормалізації кільця шліфували електрокорундовим кругом до шорсткості поверхні

$R_a = 0,8\text{--}1,2$  мкм,

яка аналогічна шорсткості бокової поверхні зубів досліджуваних зубчастих коліс.

Зміцнені вібраційно-відцентровим методом з використанням сталевих загартованих кульок зразки-кільця мали шорсткість поверхні

$R_a = 1,0\text{--}1,25$  мкм,

товщину зміцненого шару

$a = 1,4\text{--}1,6$  мм,

мікротвердість приповерхневих шарів для сталі 40X – 8,9 ГПа.

Дослідження на зношування матеріалу зразків проводили за двох рівнів питомого навантаження: 1 та 2 МПа.

Як впливає з даних порівняльного дослідження зношування матеріалу пари сталь 40X – сталь 40X, зображених на рисунку, зношування зразків, зміцнених вібраційно-відцентровою обробкою, у разі тертя з питомим навантаженням 1 МПа менше в 1,2 разу порівняно з гартованими і в 1,3–1,4 разу – порівняно з нормалізованими зразками.

Зношування вкладок, що контактують зі зміцненими за цим методом кільцями, зменшується у 3,5 разу порівняно з нормалізованими та в 2 рази щодо гартованих вкладок. Це явище характерне для зміцнювальних технологій і пояснюється зменшенням коефіцієнта тертя трибопари [4].

За питомого навантаження 2 МПа (графічно не показано) зносостійкість матеріалу зміцнених зразків зростає в 2,2 разу порівняно з нормалізованими і в 1,4 разу щодо гартованих зразків. Відповідно в 2,0 і 4,6 разу зростає при цьому і зносостійкість матеріалу вкладок.

Схожі за своїми закономірностями і результати дослідження зношування пари сталь 45 (кільце) – сталь 40X (вкладка).

Абсолютне зношування зразка-кільця зі сталі 45 при цьому зростає порівняно зі сталлю 40X, що зумовлено, очевидно, відсутністю легуючих елементів у його матеріалі.

Так, за питомого навантаження 1 МПа зношування зразка зі сталі 45 в 1,7 разу більше, ніж для сталі 40X, а за 2 МПа – в 2 рази.

Однак тенденція до зменшення зношування зміцнених вібраційно-відцентровою обробкою зразків щодо гартованих і нормалізованих зберігається.

Так, при терті з питомими навантаженнями 1 МПа зношування зміцненого матеріалу в 1,1 разу менше, ніж гартованого і в 1,15 – від нормалізованого стану.

Менше тут і зношування вкладок (в 1,3 разу щодо нормалізованого і в 1,1 – щодо гартованого стану).

Значно вища ефективність поверхневого ВВЗК проявляється зі зростанням питомого навантаження тертя.

Так, якщо питоме навантаження 2 МПа, то під час тертя зносостійкість зміцнених зразків в 1,5 разу вища порівняно з нормалізованими і в 1,2 разу порівняно з гартованими зразками. Зносостійкість матеріалу вкладок при цьому збільшується в 1,2 та 1,8 разу відповідно.

Таким чином, як впливає з результатів експериментального дослідження впливу ВВЗК на зносостійкість їх матеріалу поверхневе зміцнення внаслідок формування відповідного мікрорельєфу робочої бокової поверхні сприяє підвищенню опору зношуванню матеріалу в середньому на 20–25% порівняно з нормалізованим і на 15–20% порівняно з гартованим вихідним станом матеріалу.

Унаслідок поліпшення умов зношування, що проявляється в зменшенні коефіцієнта тертя трибопари, знижується при цьому в середньому на 10–15% і зношування матеріалу контактуючої зі зміцненою цим методом поверхні деталі.

Порівняльні натурні випробування зміцнених вібраційно-відцентровою обробкою зубчастих коліс проводили на спеціальному стенді в такій послідовності. Зміцнене цим методом зубчасте колесо встановлювали на шпонці на ведучому валу випробувального стенда.

У зубчасте зачеплення з ним вводили розміщене на веденому валу аналогічне еталонне зубчасте колесо, виготовлене за традиційною заводською технологією.

Від електродвигуна приводу стенда ведучому валу надавали обертового руху, який досліджуваним зубчастим колесом передавався еталонному колесу, утворюючи зубчасту передачу. Значення крутного моменту на ведучому валу при цьому становило 150 Н·м.

Вмикаючи розміщений на веденому валу гальмівний механізм, пригальмовували еталонне зубчасте колесо, навантажуючи тим самим бокову робочу поверхню зубів та імітуючи реальні умови експлуатації силової зубчастої передачі. Гальмівний момент при цьому змінювали в діапазоні 15–30 Н·м, а частоту обертання ведучого вала в межах 500–3000 хв<sup>-1</sup>.

Після 10<sup>6</sup> циклів навантаження бокової поверхні зуба здійснювали реверс електродвигуна приводу стенда і впродовж чергових 10<sup>6</sup> циклів зношували протилежну поверхню зубів досліджуваних зубчастих коліс.

Після цього випробувальний стенд вимикали і виконували вимірювання.

Результати випробувань оцінювали за значенням лінійного зношування бокової поверхні зуба на ділянці ділильного кола.

Під лінійним зношуванням у цьому випадку розуміли зменшену порівняно з заміряною до випробувань товщину зуба на ділянці ділильного кола, яку вимірювали на всіх без винятку зубах досліджуваних коліс і опосередковували.

Товщину зуба на ділянці ділильного кола замірювали кромковим індикаторним зубоміром моделі ЗИМ-16 та ЗИМ-32 за стандартною методикою з точністю 0,01 мм. Дослідження проводили на виготовлених зі сталі 40Х прямозубих циліндричних зубчастих колесах з модулем  $m = 5$  мм і кількістю зубів  $z = 27$ .

Еталонні зубчасті колеса виготовляли за типовим заводським технологічним процесом, що включав такі основні операції:

- першу термічну операцію для поліпшення механообробних властивостей матеріалу;
  - зубофрезерувальну операцію;
  - другу термічну операцію для забезпечення належної твердості матеріалу поверхонь зубів;
  - шліфувальну операцію для забезпечення геометричної точності бокових поверхонь зубів.
- Натурні порівняльні випробування зміцнених вібраційно-відцентровою обробкою коліс проводили для зубчастих коліс, виготовлених за двома запропонованими варіантами.

За першим варіантом типовий технологічний процес виготовлення, за яким виготовляли еталонні зубчасті колеса, доповнювали заключною оздоблювально-викінчувальною операцією поверхневого зміцнення робочих бокових поверхонь зубів вібраційно-відцентровим способом з використанням сталевих загартованих кульок.

Технологічний процес виготовлення зубчастих коліс за другим варіантом включав такі основні технологічні операції:

- термічну операцію для поліпшення механообробувальних властивостей матеріалу;
- зубофрезерувальну операцію з новою модифікованою схемою обкочувального руху [5];
- шліфувальну операцію для забезпечення геометричної точності бокових поверхонь зубів;
- зміцнення радіусних переходів у ніжку зуба вібраційно-відцентровим способом з використанням деформувальних елементів для забезпечення міцності матеріалу зубів і підвищення його опору втомі;
- зміцнення бокової поверхні зубів вібраційно-відцентровим способом із використанням сталевих загартованих кульок для підвищення зносостійкості матеріалу бокової поверхні зубів.

Порівняно з типовим технологічним процесом

виготовлення зубчастих коліс тут термічну зміцнювальну операцію замінено зміцненням поверхневим пластичним деформуванням вібраційно-відцентровою обробкою.

Як впливає з результатів досліджень, додаткове включення до типового технологічного процесу виготовлення коліс операції ВВЗК з використанням сталевих загартованих кульок у середньому на 40–45% підвищує зносостійкість матеріалу робочої бокової поверхні зубів завдяки формуванню стійкого до зношування мікрорельєфу з “масляними кишнями”. При цьому завдяки поліпшенню умов роботи трибопари на 10–15% зменшується і лінійне зношування бокової поверхні зубів контактуючого із зміцненим веденого зубчастого колеса, що виготовлене за типовим технологічним процесом.

Лінійне зношування зубів коліс, для яких замість термічної операції було запроваджено двоетапне зміцнення радіусного переходу в ніжку зуба деформівними елементами та їх бокової поверхні сталевими кульками, наближається до рівня зношування зубчастих коліс, виготовлених за типовим технологічним процесом, несуттєво на 3–5% перевищуючи його. Як і в попередньому випадку, зношування матеріалу контактуючого зі зміцненим матеріалом зубчастого колеса зменшується. Поряд з тим незалежно від специфіки технологічних процесів виготовлення коліс підвищення твердості їх матеріалу зменшує лінійне зношування бокової поверхні зубів.

#### Висновок

А.Д. Клименко, Э.Л. Селезнев

Эффективность упрочнения вибрационно-центробежной обработкой зубчатых колес

Приведены результаты исследования влияния вибрационно-центробежного упрочнения на износостойкость зубчатых колес силовых передач.

A.D. Klymenko, E.L. Selesnev

Some effects of gear wheels strengthening with vibration-centrifugal processing

There are some researching results of vibration-centrifugal strengthening influence on gear wheels power transmissions demolition stability.

Результати порівняльних натурних випробувань зубчастих коліс підтверджують ефективність зміцнювальної операції ВВЗК як додаткової до типового технологічного процесу виготовлення коліс, що виявляється в зростанні до 40–45% опору їх матеріалу зношуванню.

Цілком виправдана з погляду надійності та довговічності зубчастих коліс силових передач низьких (у межах 9–10) квалітетів точності також заміна вартісної й енергоємної термічної операції на двоетапне зміцнення бокової поверхні зубів ВВЗК, що суттєво зменшує собівартість їх виготовлення.

#### Література

1. *Увеличение ресурса машин технологическими методами* / В.А. Долецкий, В.Н. Бунтов, Ю.А. Леженкин и др. – М.: Машиностроение, 1978. – 216 с.
2. *Проскураков Ю.Г.* Технология упрочняющей и формообразующей обработки металлов. – М.: Машиностроение, 1971. – 208 с.
3. *Афтаназив И.С., Берник П.С., Сивак Р.И., Клименко А.Д.* Вибрационно-центробежная упрочняющая обработка деталей машин. – Винница: ВДАУ, 2002. – 235 с.
4. *Бабей Ю.И.* Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. – К.: Наук. думка, 1988. – 240 с.
5. *Грицай І.Є.* Основи підвищення ефективності процесу нарізання циліндричних зубчастих коліс черв'ячними фрезами: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – К., 2003. – 32 с.

Стаття надійшла до редакції 20.05.05.