

УДК 621.9.048.6

DOI 10.36910/775.24153966.2022.74.23

О.Д. Клименко, Ю.В. Муравинець, В.С. Пуць
Луцький національний технічний університет

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ

Розглянуто основні операції фінішної обробки зубчастих коліс, намічені напрямки вдосконалення методів формування поверхневого шару матеріалу з необхідними властивостями.

Ключові слова. Зубчаста передача, надійність, метод обробки, поверхнєве пластичне деформування.

O.D. Klymenko, Yu.V. Muravynets, V.S. Putz

INCREASE OF GEAR RELIABILITY

The basic operations of finish treatment of gear-wheels are considered, directions of perfection of methods of forming of superficial layer of material are set with necessary properties.

Keywords. Gear-wheel, method of treatment, superficial plastic deformation.

Постановка проблеми

Актуальним завданням машино- і приладобудування є забезпечення міцності, надійності і довговічності як елементів механізмів в цілому, так і їх складових деталей при мінімальних матеріаловмістимості і затратах на виготовлення. У переважній більшості агрегатів і машин забезпечення точності передачі кінематичних рухів та крутних моментів покладено на різноманітні зубчасті зачеплення, основною ланкою яких є зубчасте колесо.

Руйнування деталей машин починається з їх поверхневих шарів, властивості яких формує технологія оброблювання, що являє собою сукупність операцій, взаємозв'язаних і взаємозалежних між собою. Саме на цьому етапі і, в основному, на етапі фінішної обробки, формується надійність зубчастих передач. Без сумніву, умови експлуатації мають вагомий вплив на якість робочих поверхонь деталей, як правило, погіршуючи їх, однак, основа показників якості стану матеріалу поверхонь закладається технологією виготовлення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Стосовно зубчастих коліс якість поверхневих шарів обумовлюється сукупністю характеристик:

- точністю розміщення поверхонь відносно базових;
- макрогеометрією та хвилястістю поверхонь і їх шорсткістю;
- структурою поверхневих шарів і серцевини;
- напруженим станом матеріалу.

Відхилення хоч би однієї з характеристик, які обумовлюють якість поверхневого шару матеріалу зубчастого колеса, від заданих параметрів приводить до зміни його довговічності та надійності.

Метою роботи є аналіз існуючих методів обробки зубчастих коліс і виявлення основних напрямків їх вдосконалення з позиції їх надійності.

Матеріали і результати досліджень

На етапі виготовлення зубчастих коліс формуються необхідні показники надійності, регламентуються забезпеченням параметрів точності виготовлення складових елементів колеса (маточини, зубчастого вінця тощо), і безпосередньо геометричної форми зубів та технологічним забезпеченням параметрів якості поверхонь зубів, їх матеріалу та структури.

При цьому, якщо для кінематичних зубчастих передач визначальною є геометрична точність коліс і їх зубів, для зубчастих коліс силових передач – якість і структура матеріалу як поверхневих шарів, так і серцевини зуба набуває першочергового значення, що підтверджується багатьма дослідженнями.

Точність виготовлення зубчастих коліс, в тому числі і силових передач, регламентується наперед встановленою точністю безпосередньо самої передачі, до якої належить цілий комплекс показників (показник кінематичної точності, так звана кінематична похибка, накопичена похибка кроку, радіальне биття тощо). Ступінь точності тої чи іншої передачі, забезпечувана цією точністю надійність регламентовані стандартом і технологічною задачею є її неодмінне

забезпечення, оскільки, в протилежному випадку, виготовлені деталі передачі, в тому числі і зубчасті колеса, є бракованими. Для силових коліс має місце інша ситуація щодо якісного стану їх матеріалу.

Регламентовані стандартом показники надійності, до яких належать працездатність та відмова, недостатньо зручні для аналізу і оцінки технологічних процесів виготовлення зубчастих коліс. Тому проф. Гулідою Е.М. запропонована низка так званих непрямих показників надійності і методика адекватного відображення з їх допомогою впливу технологічних факторів на надійність зубчастих коліс. Для кількісної оцінки надійності зубчастих коліс запропоновано застосування наступних непрямих показників:

- ступінь точності τ зубчастого колеса (ГОСТ 1643-81);
- показники шорсткості поверхонь R_a ;
- хвилястість, що характеризується висотою хвилі W ;
- структура поверхневого шару, що характеризується мікротвердістю H_μ ;
- залишкові напруження σ_0 ;
- структура, характеристикою якої для кількісної оцінки є твердість H (HB , HRC).

Ці показники охоплюють параметри геометричної точності (τ), стану поверхні (R_a та W), стану і якості матеріалу (σ_0 , H_μ), що дозволяє адекватно спрогнозувати, за умов дотримання обумовлених правил експлуатації, ресурс, довговічність, а також надійність виготовлених зубчастих коліс.

В загальному вигляді виготовлення зубчастих коліс силових передач передбачає підготовчі операції із неодмінною термообробкою для покращення механообробних властивостей матеріалу, зубоформівні, термічні чи хіміко-термічні для надання матеріалу зубів відповідних фізико-механічних властивостей, так звані зміцнювальні, і оздоблювально-викінчувальні (ОВО), метою яких є забезпечення поверхням зубів відповідної якості.

Відмінності, що обумовлені тою чи іншою групою матеріалу, незначні і, як правило, полягають в характері та режимах термічних впливів на підготовчельних та зміцнювальних операціях, обумовленій цим кількістю шліфувальних операцій на етапах зубоформування та відповідними різновидами застосовуваних ОВО.

Узагальнений аналіз впливу технологічних операцій виготовлення зубчастих коліс на формування показників їх якості, що обумовлюють надійність силових зубчастих коліс, показує, що всі технологічні операції впливають на всі без виключення непрямі показники надійності зубчастих коліс, що узгоджується із теорією технологічної спадковості.

Проведений аналіз типових технологічних процесів виготовлення сталевих зубчастих коліс силових передач свідчить, що запроваджені в них операції, будучи в основному зорієтованими на формування геометрії зубчастого вінця і профілю зубів, тобто забезпеченні геометричної точності, малоефективні і малокеровані стосовно забезпечення якості матеріалу і таких її показників як структура, залишкові напруження, твердість та мікротвердість поверхневих шарів, а також, що немаловажно, пластичності матеріалу серцевини зубів. Передбачені для цього термічні і хіміко-термічні зміцнювальні операції теж недостатньо ефективні, бо підвищуючи твердість матеріалу для покращення опору зношуванню зменшують пластичність серцевини, а отже не протистоять втомному викришуванню і зламу.

Таким чином, можна укрупнено представити виготовлення сталевих зубчастих коліс чи їх зубчастих вінців у вигляді трьох груп операцій:

- формоутворювальні, покликані створити профіль зубів, як правило різанням;
- термооброблювальні, що мають за мету надати матеріалу зубів належну міцність;
- оздоблювально-викінчувальні, які призначені для забезпечення належної точності геометричних параметрів зубів та якості їх поверхні.

Розгляд цих операцій з точки зору фізико-механічного стану матеріалу зубів свідчить, що переважаюча більшість з них супроводжується утворенням у поверхневому шарі матеріалу напружень розтягу. Особливою мірою це стосується термооброблювальних операцій із неодмінно слідуючим за ними шліфуванням.

В силу теорії технологічної спадковості, яка ґрунтується на постулаті, що всі впливи на матеріал заготовки накопичуються, в кінцевому результаті, визначають ту чи іншу несучу здатність деталі, по суті виготовлення зубчастих коліс пов'язане із наведенням і перерозподілом у матеріалі зубів технологічних напружень розтягу. Технологічні напруження розтягу сумуючись із експлуатаційними, теж, як правило, розтягуючими напруженнями, досягають при експлуатації,

особливо силових передач, значень, близьких до межі текучості матеріалу, що прискорює утворення і швидкість зростання дефектів на поверхні профілю зубів.

В результаті, хоч і шліфовані, шевінговані та хонінговані поверхні профілю зубів мають високий клас чистоти, їх зносостійкість чи втомна міцність незначна, бо мікротріщини поверхневого шару під впливом напружень розтягу швидко розростаються, сприяють прискоренню зношування матеріалу, його стиранню та викришуванню, утворенню втомних мікротріщин, що призводить до руйнування зубів, причому доволі часто за кількості циклів вельми далекої до розрахункової. І забезпечена на етапі термічного оброблювання висока твердість матеріалу зубів не тільки не стає на заваді цьому процесу, а може і прискорити його в силу втрати матеріалом при високій твердості пластичності.

Нівелювати негативний вплив технологічних напружень розтягу мали б оздоблювально-викінчувальні операції, які покликані надати зубчастому колесу не тільки належних геометричних параметрів, а і необхідних фізико-механічних властивостей матеріалу. Однак, сучасні оздоблювально-викінчувальні операції, в якості яких для сталевих зубчастих коліс рекомендують, як правило, шліфування і полірування поверхонь зубів після термооброблювання, шевінгування та хонінгування і зрідка взаємне притирання поверхонь зубів, неспроможні компенсувати негативного впливу технологічних напружень розтягу, не в силах суттєво вплинути на напружений стан і структуру поверхневого шару матеріалу зубів.

Як вихід з даної ситуації не завжди виправдано рекомендують при виготовленні важковантажених зубчастих коліс перейти на використання дорогих покращених матеріалів підвищеної твердості і міцності. Однак, це не тільки суттєво підвищує затрати на виготовлення зубчастих коліс, а доволі часто не забезпечує і бажаного результату, бо тверді матеріали більш чутливі до впливу циклічності експлуатаційних навантажень, концентрації напружень у окремих ділянках поверхонь деталей. А зуби зубчастих коліс в процесі їх експлуатації, особливо для групи силових передач, саме відчувають вплив значних згинаючих та контактних напружень, їх концентрацію в ділянках радіусних переходів.

Як свідчать дослідження таких провідних вчених, як Іванова В.С., Олійник Н.В., Папшев Д.Д., Кудрявцев І.В., Саверин М.І., Шнайдер Ю.П., лише технології, що в комплексі вирішують проблему забезпечення належної якості поверхні матеріалу зубів, а саме її мікрорельєфу, структури матеріалу, його мікротвердості з належною глибиною зміцнення, а також із забезпеченням значних за градієнтом напружень стиску у приповерхневому шарі матеріалу зубів за обов'язкової умови поєднання із збереженням пластичності основної серцевини матеріалу спроможні суттєво підвищити показники надійності і довговічності зубчастих коліс.

З арсеналу сучасних технологічних засобів цим вимогам найбільш повно відповідає технологічний процес зміцнення деталей поверхневим пластичним деформуванням (ППД), більш як сотня різновидів якого доволі широко і успішно використовується у машинобудуванні.

Статичні, динамічні, комбіновані у поєднанні із термічними, хімічними та фізичними впливами способи зміцнення ППД успішно використовують для підвищення експлуатаційних параметрів (міцності, опору втомі та крихкому руйнуванню, зносостійкості тощо) найрізноманітніших деталей - від простих осей і валиків до об'ємних і складних за профілем панелей крил літаків, барабанів і реборд їх коліс тощо.

Втомне руйнування зубів колеса (викришування або злам) пропорційне межі витривалості σ_r (контактній чи на згин). В свою чергу межа витривалості регламентується якістю поверхневого шару зуба колеса і його структурою. Знаючи межу витривалості в залежності від значень показників якості поверхневого шару і структури матеріалу, можна, наприклад, визначити середнє напруження до відмови

$$T_{cp} = N_0 [60n_u (\sigma_e / \sigma_r)^k],$$

де N_0 – базова кількість циклів напружень; n_u – частота циклів напружень, хв.⁻¹; σ_e – напруження, дія якого еквівалентна сумарній дії напружень $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ при відповідній їх повторюваності n_1, n_2, \dots, n_n ; σ_r – межа витривалості, що залежить від асиметричності циклів навантаження, концентрації, якості поверхневих матеріалів, структури тощо; k – показник ступеня кривої витривалості.

Відповідно, змінюючи якість поверхневого шару, структуру можна змінити σ_r , а отже і T_{cp} , тобто надійність зубчастого колеса.

Суттєвий вплив на межу витривалості матеріалу зубів коліс мають залишкові напруження. Для сталей підвищеної твердості наявність напружень стиску призводить до суттєвого підвищення межі витривалості, а розтягу - пониження. В свою чергу, характер (знак) залишкових напружень залежить не тільки від методів оброблювання, а і від режимів їх здійснення. Результати досліджень ряду вчених свідчать, що межа витривалості при згині цементованих і загартованих зубів коліс з сталі 12Х2Н4А, які шліфовані при підвищених режимах, понижується на 43% порівняно із ретельно шліфованими.

Зношувальність зубів із зміцнених та малопластичних матеріалів обумовлюється в першу чергу шорсткістю оброблених поверхонь, понижаючись при зменшенні шорсткості. Це підтверджено дослідженнями на зразках, виготовлених із загартованої сталі У8, які показали, що зменшення шорсткості з 4,7 до 2,9 мкм дозволило знизити зношування на 30%.

Зміцнення (наклепування) поверхневих шарів зубів дробом, здійснене після термічного оброблювання, суттєво підвищує втомну міцність залежно від вихідної (до термообробки) шорсткості поверхні. Межа витривалості із зменшенням шорсткості зростає.

Поверхнєве зміцнення суттєво впливає і на зношування матеріалу зубів. Зразки із відпаленої сталі 45 зі ступенем наклепування поверхневого шару 220 ÷ 230 % мають зношування на 30-33 % менше, чим незміцнені, до того ж, із нижчою шорсткістю поверхні.

Межа витривалості також залежить від структури основного матеріалу. Результати досліджень на втому при згині зубчастих коліс $m_n = 7$ мм показали, що при однаковій твердості і глибині цементованого шару межа витривалості вища у тих коліс, які мають більшу твердість серцевини зуба. Однак, очевидно, що підвищення твердості серцевини доцільно лише до певної межі.

Підсумовуючи відмічене, слід відзначити, що:

1. Якість поверхневого шару має суттєвий вплив на значення меж згинальної та контактної витривалості зубчастих коліс, а також на інтенсивність їх зношування та заїдання.
2. Надійність зубчастого колеса знаходиться у функціональній залежності від меж згинальної та контактної витривалості, інтенсивності зношування та протизадирної стійкості.
3. Умови експлуатації змінюють якість робочого поверхневого шару зубів, а отже, межу згинальної та контактної витривалості, інтенсивність зношування та протизадирну стійкість, тобто впливають на надійність зубчастого колеса.

З метою надання поверхневим шарам зубів зубчастих коліс належної якості і фізико-механічних властивостей в технологічному процесі виготовлення застосовують оздоблювально-викінчувальні та зміцнювальні операції. Викінчувальне оброблення зубів коліс в залежності від вимог до їх якості і типу виробництва здійснюють такими методами: шліфуванням, хонінгуванням, притиранням, припрацьовуванням, електрохімічними способами обробки, гідроабразивним оброблюванням, електролітичним поліруванням, обкатуванням парних коліс з еталонами і шевінгуванням.

В технологічних процесах виготовлення зубчастих коліс, в тому числі і силових передач, з метою зміцнення бокових поверхонь їх зубів доволі широко використовують і деякі різновиди ППД, зокрема, обкатування роликками та валками-шестернями, дробоструменеве і вібраційне об'ємне оброблювання, карбування (іноді зустрічається в літературі під назвою "чеканка"), пластичне обкатування викружок зубів задніми поверхнями різального інструменту, зміцнення різанням. Їх використання забезпечує підвищення мікротвердості, утворення в поверхневих шарах матеріалу стискальних залишкових напружень, зменшення негативного впливу поверхневих ушкоджень попередніх оброблювальних операцій тощо.

До основного недоліку згаданих вище способів ППД стосовно їх використання для якісного зміцнення матеріалу бокових поверхонь зубів зубчастих коліс силових передач є недостатній рівень енергії деформування. Саме ця обставина стає на заваді у забезпеченні необхідних параметрів зміцнювальної обробки - високого градієнту залишкових стискальних напружень, значної поверхневої мікротвердості в поєднанні із формуванням зносостійкого поверхневого мікрорельєфу. Виключенням є хіба що карбування, однак, воно малопродуктивне.

Це обумовлює потребу пошуку, розробки і дослідження для зубчастих коліс нових методів зміцнення бокових поверхонь їх зубів поверхневим пластичним деформуванням, спроможних при високій продуктивності забезпечити якісне зміцнювальне оброблення їх матеріалу.

Відносно новий метод вібраційно-відцентрової зміцнювальної обробки зубчастих коліс дозволить істотно розширити сферу промислового використання зміцнювальних технологій,

підвищити надійність і довговічність зубчастих передач. Високий рівень енергії деформування, характерний зносостійкий мікрорельєф оброблених поверхонь дають підставу для заміни в технологічному процесі виготовлення зубчастих коліс ряду вартісних і енергомістких термічних операцій із супутніми оздоблювально-викінчувальними на дешеву і високопродуктивну операцію поверхневого зміцнення. З урахуванням масовості виготовлення зубчастих коліс це дасть значний економічний ефект.

Якісне зміцнення бокових поверхонь зубів вібраційно-відцентровою зміцнювальною обробкою при високій енергії деформування дасть змогу під час виготовлення зубчастих коліс замінити дорогі леговані та покращенні конструкційні сталі на дешевші матеріали, що суттєво знизить собівартість виготовлення деталей зубчастих передач.

Висновки

Аналіз операцій типових технологічних процесів виготовлення зубчастих коліс силових передач та експлуатаційних пошкоджень їх зубів дає підставу для наступних висновків:

1. За грамотного підбору матеріалів та методик розрахунків передачі при дотриманні обумовлених умов експлуатації надійність та довговічність зубчастої передачі регламентується технологією виготовлення зубчастих коліс.

2. Використовувані у технологічних процесах виготовлення зубчастих коліс силових передач оздоблювально-викінчувальні операції в основному зорієнтовані на підвищення точності і малоефективні у забезпеченні належних фізико-механічних властивостей матеріалу поверхонь зубів.

3. Наявні в сучасному арсеналі зміцнювальні технології поверхневим пластичним деформуванням, що покликані покращити якість поверхневих шарів матеріалу, переважно через недостатню енергію деформування або, як карбування, незначну продуктивність - недосконалі.

Це дозволяє окреслити основні напрямки вдосконалення технологічних процесів виготовлення зубчастих коліс силових передач з метою підвищення їх експлуатаційної надійності та довговічності. А саме:

1. Розширення технологічних можливостей методів холодного і гарячого деформівного прокатування в напрямку забезпечення якісного формоутворення зубів зубчастих коліс середнього і крупного модулів.

2. Підвищення якості зубофрезерувальних та зубошліфувальних операцій для забезпечення належної геометричної точності поверхонь зубів в поєднанні із застосуванням зміцнювальної операції, покликаної надати поверхневим шарам матеріалу необхідних фізико-механічних властивостей.

Перший напрямок, окрім ґрунтовних фундаментальних досліджень, потребує для втілення вартісного енергомісткого устаткування і перспектива його широкого промислового запровадження - справа майбутнього.

Складності у промисловому застосуванні другого напрямку вдосконалення технології виготовлення зубчастих коліс обумовлені, в першу чергу, відсутністю на сьогоднішній день високопродуктивних і ефективних зміцнювальних технологічних операцій.

Вказаних недоліків не має вібраційно-відцентрове зміцнення зубчастих коліс.

Метод належить до групи динамічних методів поверхневого пластичного деформування, однак відрізняється від їх різновидів вищою енергією деформування матеріалу в поєднанні із значною продуктивністю.

Список використаних джерел.

1. Афтаназів І.С., Гавриш А.П., Киричок П.О., Мельничук П.П., Попов Є.С., Третько В.В. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 516 с.

2. Афтаназів І.С., Клименко О.Д. Підвищення надійності зубчастих коліс вібраційно-відцентровим зміцнювальним оброблюванням //Вісник НТУУ “Київський політехнічний інститут”, Машиностроение, 2002, №43. – с. 74-77.