

УДК 621.231.322.3

В.А.Шабайкович

Луцький національний технічний університет

ВИСОКОТОЧНІ ЗУБЧАСТІ КОЛЕСА

Розглянуті нові конструкції зубчастих коліс, в яких значно підвищені точнісні характеристики роботи. Запатентовані зубчасті колеса з використанням підшипників, як зубців, а також конструкція самоустановлювальних зубців. Їх ефективність полягає в значному підвищенні точності роботи і зменшенні проміжків між зубцями передачі.

Ключові слова: зубчатка, профіль, проміжок, точність, конструкція.

Вдосконалення зубчастих коліс передбачає підвищення їх навантажувальності, покращення експлуатаційних характеристик, розробку нових зубчастих передач з покращеними властивостями. При вдосконаленні циліндричних зубчастих передач перспективним напрямком є застосування високонавантажувальних аркових зубців, які мають підвищену плавність ходу, просту локалізацію контактну робочих поверхонь, відсутність осьових сил в зачепленні [1]. Синтез спряжених профілів зубців використовує метод рішення диференціальних рівнянь, що зв'язують їх параметри з заданими параметрами втомної міцності робочих поверхонь, контактними напруженнями, напруженнями згину. Було отримане позаполосне випукло-вігнуте зачеплення з навантажувальною здатністю вдвічі більше, ніж у евольвентного зачеплення. Оригінальні зубчасті передачі з замкнутими лініями контакту, в яких зубці вигнуті в повздовжньому напрямку, лінія зачеплення складається з двох виток кривої, що знаходиться в зоні зачеплення, а масло видавлюється з замкнутого контуру, створюючи найкращі умови для передачі навантаження та змащування. Такі зубчасті передачі мають в 1,1...30 разів більш високі критерії працездатності, в 1,2...1,4 рази меншу швидкість ковзання, в 1,35...2,7 рази більший показник контактної міцності, на 25% менший критерій зламної міцності, в 1,5...4,2 рази менший критерій заїдання у порівнянні з квазіевольвентною передачею з арковими зубцями.

Зубчасті передачі евольвентного профілю з арковими зубцями мають ряд переваг. Відоме синусоподібне зачеплення (рис. 1) появилось в 60^{-их} роках (патент США 3251236/Wildhaber E) і було досліджене Анікінім Ю.В. має рівняння лінії зачеплення

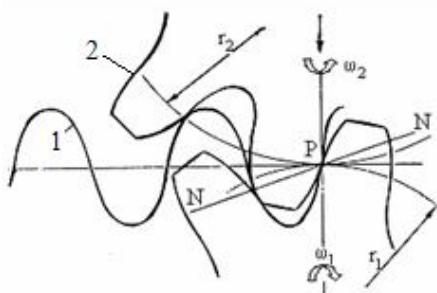


Рис. 1. Синусоподібне зачеплення:
1 – вихідний рейковий контур; 2 –
контур зубчатки

$$\left. \begin{aligned} x &= 0,25c^2 m \sin 4\pi k, \\ y &= 0,5cm \sin 2\pi k \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де m – модуль зачеплення; k – частка кроку πm ; c – коефіцієнт, $c = lx^{-1}$, l – довжина дуги радіуса a , що відповідає центральному куту $2\pi k$. Позитивні властивості та чинники, що суттєво впливають на підвищення якості таких передач, наступні:

- Ніжка синусоподібного зубця утворена нижніми половинками синусоїди, що відіграють роль галтелей і зменшують концентрацію напружень в основі зубця. Товщина зубців до діаметра западин збільшується, забезпечуючи їх вищу міцність, в результаті синусоподібна зубчаста передача в 1,5...2 рази має більшу вантажну здатність.
- По всій довжині лінії контакту в синусоподібній передачі випукла поверхня одного зубця взаємодіє з увігнутою поверхнею спряженого профілю, як у передачі Новікова М.Л. Менший основний крок забезпечує краще торцеве перекриття зубців, що в загальному зменшує ударні навантаження та шум при переключанні.
- Поверхневий контакт робочих поверхонь зубців значно зменшує проковзування зубців в зачепленні та зменшує втрати потужності внаслідок тертя, також приводить до зменшення контактних напружень і збільшення навантажувальної здатності передачі при меншому спрацьовуванні.

- Кількість зубців у передачі може бути малою, наприклад $Z_{min} = 6$, а не $Z_{min}^* = 16$, як у евольвентній, що забезпечує набагато більше передавальне число при малих габаритах. При цьому зубці синусоподібної передачі не підрізаються і корегування профілю не потребують.
- При передаванні однакової потужності синусоподібні зубчаті колеса мають у 1,5 рази менший модуль у порівнянні з евольвентними. При цьому, при однакових з евольвентною передачею габаритах і модулем синусоподібна передача має більшу кількість зубців і вищий коефіцієнт перекриття, що дає підвищену здатність передавання потужності і як наслідок – зменшення габаритів конструкції редукторів, коробок передач, тощо.

Перший позитивний досвід використання синусоподібних передач був одержаний на Московському автозаводі ім. *Лихачова* ще в 70 роках, де передачі використовувались в коробках передач серійних автомобілів. Нарізання таких коліс проводилось черв'ячною фрезою, виготовленою на основі початкового рейкового контуру з синусоподібним профілем. Однак ця технологія виявилася неефективною внаслідок складності профілювання синусоподібних фрез, формування криволінійних різальних лез, додаткових заходів збереження геометричних параметрів криволінійних зубців при переточуванні та затилуванні. Недостатньою була і точність зубчастих коліс, що в кінцевому рахунку стримало їх широке впровадження у виробництві. Згодом з метою спрощення одержання таких зубчастих коліс була запропонована технологія нарізання та чистової обробки, яка базувалася на зубофрезеруванні при обточуванні та неповному діленні на стандартному технологічному обладнанні. Замість черв'ячної фрези різальним інструментом є стандартна дискова прорізна чи відрізна фреза, зубці якої переточені по бокових поверхнях та по вершині під кутом, який визначається кутом зачеплення передачі, еквівалентним модулю і кількості зубців [2].

Другим напрямком вдосконалення зубчастих коліс є збільшення їх точності. Відомі різні технічні рішення зубчастих передач, що мають прості та складні поверхні зачеплення. Загальновідомі циліндричні зубчасті передачі, котрі мають зубці та западини і поверхні їх зачеплення, що за формою профілю бувають різними. У місці контакту зубців, які знаходяться в зчепленні, по активному профілю проходить відносно перекошування та ковзання профілів зубців, що приводить до втрати енергії в зчепленні, зношуванні та заїданні. Для одержання точного евольвентного, чи іншого профілю вимагається висока точність зубообробки при використанні високоточних спеціальних верстатів і інструментів. Внаслідок взаємодії випуклих робочих поверхонь зубців площинка контакту має форму вузької полозки, що суттєво обмежує контактну міцність і концентрує навантаження по краю зубців. Тому до їх недоліків можна віднести малу поверхню контакту зубців при зчепленні в передачі і пов'язану з цим передачу малих крутячих моментів, складність одержання високої точності зубчастих коліс при їх виготовленні, порівняльно велике зношування та втомне викришування активних поверхонь зачеплення при експлуатації, заїдання та енергетичні втрати.

Одною з таких передач є зубчаста передача *Новикова* [3], в котрій зубці виконані з випуклим профілем на одному колесі та дзеркально увігнутим – на другому, з утворенням відповідного поля зачеплення. Під час зачеплення проходить перекошування двох зубців по їх довжині зі швидкістю набагато більшою, ніж окружна швидкість, що сприяє створенню більш кращого мастильного прошарку, котрий зменшує втрати на тертя та зношування. До їх недоліків можна віднести порівняльну складність одержання високої точності зубчастих коліс при їх виготовленні та по цій причині неможливість одержання початкових степенів точності (1–3), а на подальших степенях точності вимагається застосування високоточного обладнання та спеціального зуборізного інструменту, зношування та втомне викришування активних поверхонь зачеплення, втрати на тертя до 5 – 10%.

З метою усунення вказаних недоліків було спроектовано, досліджено та виготовлено ряд нових конструкцій зубчастих коліс. Загальний вигляд дослідного взірця зубчастої підшипникової передачі наведений на рис. 2. Зубчаста підшипникова передача [4] містить ведуче колесо **1**, ведене колесо **2**, одно з них замість зубців постачене стандартними підшипниками **3**, котрі закріплені на осях **4** з двосторонніми прокладками **5** у пазах **6** колеса. Вісі **4** зафіксовані пружинними кільцями **7**. Контактна западина **8** колеса виконана точно по зовнішній формі підшипника, а неконтактна западина **9** має дещо більший діаметр, що забезпечує мінімальний проміжок між виступами **10** одного колеса та неконтактними западинами **9** другого.

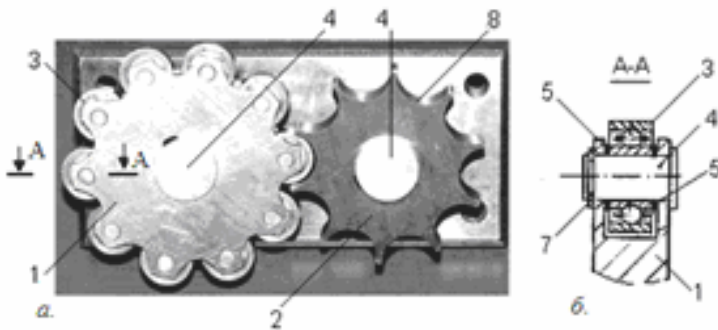


Рис. 2. Загальний вигляд дослідного взірця зубчастої підшипникової передачі

Зубчаста підшипникова передача працює наступним чином. При зчепленні двох коліс зубчастої передачі зубець одного колеса у формі підшипника 3 входить у контакт з западиною 8 другого колеса, де і проходить їх взаємне перекочування по зовнішній поверхні підшипника 3 та западині 8 без будь-якого ковзання та проміжків з мінімальними втратами енергії. Після виходу з западини одного підшипника у чергову западину

входить другий і т.д.

Таким чином зубчаста підшипникова передача, що складається з двох зубчастих коліс, *відмінна* від відомих тим, що одне колесо замість зубців постачене підшипниками з зовнішнім діаметром, рівним діаметру круглої контактної западини другого колеса, які вставлені у його пази за допомогою зафіксованих осей, при цьому, колесо має також круглі неконтактні западини, виконані з дещо більшим зовнішнім радіусом, ніж підшипники з забезпеченням мінімального проміжку з неконтактними виступами другого колеса при їх зчепленні.

Техніко-економічна ефективність застосування таких зубчастих коліс обґрунтована новою якістю, котра одержується з використання зубців з високоточною зовнішньою циліндричною формою підшипників. За рахунок того, що зачеплення проходить по зовнішній поверхні підшипника та западині зубчатки у місцях контакту ковзання та тертя практично відсутні взагалі, оскільки проходить лише обертання зовнішнього кільця підшипника і все тертя при перекочуванні зводиться до внутрішнього тертя у самих підшипниках. При цьому суттєво зменшується зношування зубчатки по контактним поверхням (практично відсутнє), котре також проходить лише всередині підшипників і чим досягається значне збільшення довговічності зубчастої підшипникової передачі.

Спрощення конструкції зубчастого колеса досягається заміною спеціально отриманого при виготовленні зубчаток криволінійного профілю зачеплення, котрий заміщається на циліндричний високоточний простий профіль підшипника на одному колесі та круглої западини - на другому. Це також пов'язано з точністю виготовлення зубчаток, оскільки одержання точно розташованих отворів під вісі кріплення підшипників значно простіше та дешевше, ніж точно розташований криволінійний (евольвентний) профіль зачеплення. При цьому відпадає необхідність в забезпеченні проміжку між головкою зубців підшипників та западиною коліс і тому фактично створена безпроміжкова зубчаста передача, в котрій збільшена площа контакту зубців і плавність роботи, а також має інші відомі таким передачам переваги. Це приводить до зниження технологічної собівартості виготовлення підшипникової передачі при забезпеченні більш простим способом значно вищої точності. Відкривається можливість одержання передач навіть 1 – 3 степені точності, а точніше, значне зменшення похибок, що відповідають точності підшипника та розточування отворів під їх вісі.

Пропоноване технічне рішення дозволяє одержати сучасну просту та надійну конструкцію зубчастої підшипникової передачі, з використання якої можна при вказаній технічній ефективності істотно спростити конструкцію за рахунок заміни криволінійного профілю зачеплення на більш простий круглий, суттєво зменшити втрати на тертя за рахунок переходу на кочення, збільшити точність шляхом використання високоточних підшипників, зменшити технологічну собівартість виготовлення. Це набирає особливого значення при величезному застосуванні зубчастих передач в різноманітних конструкціях, пов'язаних з передачею крутячого моменту, чи перетворення обертового руху в лінійний і навпаки при відсутності в передачах проміжків. Економічний ефект від впровадження такої конструкції зубчастої підшипникової передачі очевидний.

Наступна запроєкована конструкція вирішує завдання максимального підвищення точності безпряміжкової зубчастої передачі за рахунок самоустановлення кожного зубця зубчастого колеса по відношенню до западин парного колеса з відсутністю будь-якого проміжку між ними, зменшення вимог щодо точності зубчастої пари коліс з точки зору її виготовлення, збільшення точності зубчастої передачі при експлуатації, зменшення технологічної собівартості виготовлення. Безпряміжкова зубчаста передача (рис. 3) містить ведуче зубчасте колесо 1, ведене колесо 2, одне

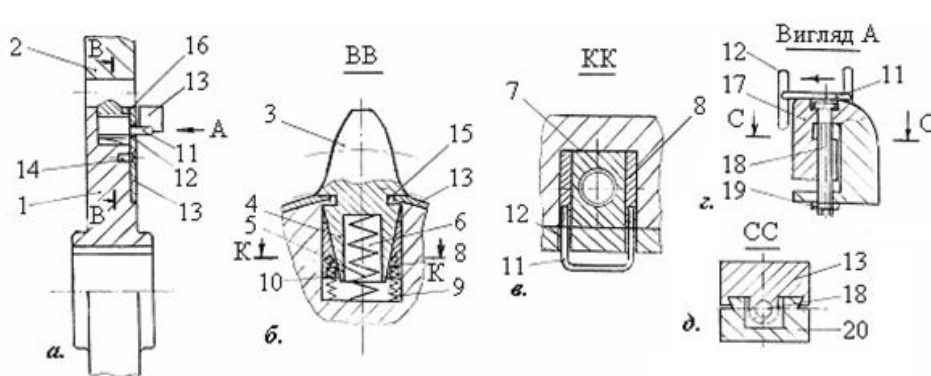


Рис. 3. Схема зачеплення двох коліс безпряміжкової зубчастої передачі (а), перетин ВВ вставного самоустановлювального зубця (б), поперечний перетин КК вставного хвостовика самоустановлювального зубця (в), схема нерухомого кулачка та скобки (г), розріз СС регульованого кулачка (д).

радіально в зубчастому колесі 1. З обох сторін вставних самоустановлювальних зубців 3 в напрямку зубчастого вінця розміщені по два клини 8, підпружинені пружинами 9, вставленими в глухі отвори 10 клинів 8, які постачені з'єднувальною скобкою 11, котрі проходять через пази 12 обіймиці 13, гвинтами 14 прикріпленої до зубчастого колеса 1. По діаметру западин вставних самоустановлювальних зубців 3 виконані два пази 15, в котрі входять лапи 16 обіймиці 13, запобігаючи випаданню вставних самоустановлювальних зубців 3 з можливим їх переміщенням в радіальному та круговому напрямкам. З'єднувальні скобки 11 самоустановлюваних зубців 3 при обертанні коліс 1 і 2 послідовно наїжджають на кулачок 17, встановлений нерухомо з можливістю регулювання його положення за допомогою гвинта 18 і фіксації контргайкою 19. Кулачок 17, що підводиться для самоустановлення зубців, встановлений на нерухомій основі 20, що кріпиться до нерухомих елементів, наприклад корпусу.

Безпряміжкова зубчаста передача працює наступним чином. Перед початком роботи зубчатих коліс кулачок 17 підводиться до зубчатки з самоустановлюваними зубцями 3. При зчепленні двох коліс 1 і 2 безпряміжкової зубчастої передачі зубці одного колеса 1 входять в контакт з западинами другого колеса 2. Перед входженням самоустановлювального зубця 3 в западину з'єднувальна скобка 11 наїжджає на кулачок 17, що приводить до опускання клинів 8 і самовстановлення вставного зубця 3 по відношенню до западини. Після зайняття відповідного положення вставного зубця 3 при дальшому провороті зубчастого колеса 1 з'єднувальна скобка 11 зіскакує з кулачка 17 і клини 8 під дією пружин 9 піднімаються вверх, надійно фіксуючи займане положення вставного зубця 3 в западині. Таким чином, при кожному зачепленні виконується корегування дійсного положення вставних зубців 3.

Таким чином безпряміжкова зубчаста передача, що складається з двох зубчастих коліс, від відомих відрізняється тим, що в одному з зубчастих коліс зубці виконані вставними самоустановлювальними і підпружиненими з клиноподібним кінцевиком, між котрим з обох боків по напрямку зубцевого вінця в прямокутних гніздах зубчастого колеса розташовані підпружинені клини, а вставні зубці своїми пазами вставлені в обіймицю, закріплену по діаметру западин зубчастого колеса з забезпеченням можливості переміщення зубців в радіальному та коловому напрямках.

Техніко-економічна ефективність застосування безпряміжкової зубчастої передачі обґрунтована новою якістю, котра одержується з використання вставних самоустановлювальних зубців, які з високою точністю займають просторове положення в западинах парного колеса за рахунок використання ефекту самозаклинювання вставних зубців. При цьому, автоматично

з яких постачене вставними самоустановлювальними зубцями 3 з клиновими хвостовиками 4, підпружиненими пружинами 5, вставленими в глухі отвори 6 їх хвостовиків 4. Самоустановлювальні зубці 3 вставлені в прямокутні гнізда 7, розташовані

ними. Номінальне просторове положення змінних зубчатих притирів 12 забезпечується штифтами 24, розташованими між ними і корпусом 1.

Переналагоджуваний зубчастий притир працює наступним чином. Попередньо на вимірювальній позиції парна деталь після фінішної обробки базується по осі, потім похибки просторового положення зубців і відхилення їх форми переносяться копіюванням на еталонний зубчастий пристрій (наприклад, зубчастий отвір). Копіювання полягає в притисканні зубців еталонного зубчастого пристрою до впадин зубців виготовленої деталі. Можливе і зворотнє копіювання похибок зубчастого отвору на зубчатку. Такий еталонний зубчастий пристрій представляє собою змінні самоустановлювані зубці та механізм їх фіксації, конструктивно подібний переналагоджуваному зубчастому притиру. Після отримання такої фіксованої копії похибок деталей зубчастого з'єднання з еталоном переналагоджуваний зубчастий притир вводиться шліцьовою частиною і через штуцер 6 в пневмогідроциліндр 2 подається стиснуте повітря, що приводить до переміщення поршня 3 та штоку 7 та стисненню гідропласту 9. Переміщення змінних зубчастих притирів 12 вгору-вниз забезпечується поршнями 19, нахили - сферичними п'ятами 18, поперечний і повздовжний лінійний зсув - плоскими поверхнями 22, а фіксація займаного положення - кільцями 20, 21. За рахунок тиску, створеного гідропластом, поршні 19 силою P штовхають підстави 17, які в свою чергу піднімають самоустановлювані зубчасті притири 12. Шляхом самоустановлення зубчасті притири щільно прилягають до зубчастих западин еталонного зубчастого пристрою, займаючи потрібне положення, що відповідає положенню шліців заздалегідь обробленої парної деталі (копіювання похибок). Одержане положення зубців, наприклад, шліців, в обоймі 11 фіксується розтискними кільцями 20 силою F , які притискаються до циліндрової поверхні радіальних отворів, виконаних в корпусі 1. Потрібний притиск P^* змінних зубчастих притирів 12 до оброблюваних поверхонь парної деталі здійснюється за допомогою пружин 13 і регулювальних гвинтів 14. На робочі поверхні зубчатих притирів 12 наноситься відповідна паста чи абразив. Притиральна обробка деталей проводиться переналагоджуваним зубчастим притиром на притиральному верстаті до отримання потрібних точносних параметрів деталей зубчастого з'єднання. При необхідності досягнення ще вищої точності, за рахунок повторення процесу притирання можна порівняно просто без використання складних технологічних систем одержувати практично мікронні просторові відхилення розташування зубців і їх форми у високоточному зубчастому з'єднанні деталей, що неможливо досягти відомими притирами.

В результаті виникнення при фінішній обробці постійних і випадкових похибок після чистових технологічних операцій зубці з'єднань одержують різні відхилення робочої форми і їх просторового положення. Притирання відомими притирами зменшує такі похибки, але лише до певних меж, створюючи проблему отримання високоточного зубчастого з'єднання.

Висновок. Розроблено ряд принципово нових конструкцій зубчастих коліс, які за технічними параметрами вигідно відрізняються від відомих. Перша зубчатка за рахунок використання в якості зубців стандартних підшипників відрізняється високою точністю роботи, малим проміжком між зубцями і мінімальним тертям, а також низькою технологічною собівартістю виготовлення. Друга зубчатка постачена самоустановлювальними зубцями, що також значно підвищує точність роботи. Третє рішення - це самоустановлювальний притир для виготовлення високоточних зубчастих коліс. Зубчасті колеса можуть бути рекомендованими для виробничого впровадження у відповідних областях їх застосування. Для виробничого впровадження пошуковуються зацікавлені корпорації, фірми, організації.

1. Шишов В.П., Носко П.Л., Ревякіна О.О. Передачі з арковими зубцями. Монографія. – Луганськ: вид-во СНУ ім. В.Даля, 2004. - 336 с.
2. Патент України №73550: МПК 7В23Р15/14: Благут Е.М. Спосіб нарізки зубчастих коліс синусоїдальної передачі Благута. Бюл. № 8, 2005 р.
3. А.В. Павленко и др. Зубчатые передачи с зацеплением Новикова. – Київ, Техніка, 1978. – 235с.
4. Патент України № 81289. МКИ F16Н1/04. Зубчаста кульковальничева передача / Шабайкович В.А та інші. Заявл. 12.08.2005; Опубл. 25.12.2007, Бюл. № 21.