

УДК 621.9.02:621.9.14

Грицай І.Є., д.т.н.

Національний університет «Львівська політехніка»

ПІДВИЩЕННЯ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СИЛОВИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ МОДИФІКУВАННЯМ ПРОФІЛІВ ЗУБЦІВ НА ОСНОВІ РАДІАЛЬНО-КОЛОВОГО СПОСОБУ ЗУБОНАРИЗАННЯ

Актуальність проблеми. Зубчасті передачі сучасних машин працюють в умовах зростаючих навантажень і робочих швидкостей та зменшення енергетичних втрат. Ці вимоги актуальні для силових передач підйомно-транспортних машин, які використовуються в металургії, гірничо-видобувній галузі, в машинах для земляних, дорожніх і лісогосподарських робіт тощо. Особливістю передач таких машин і механізмів є робота на малих і середніх робочих швидкостях, можливість використання коліс 8-10 ступенів точності при підвищених вимогах до параметрів повноти контакту зубчастих поверхонь у спряженнях та забезпечення довговічності і безвідмовності за дії значних статичних і динамічних навантажень. У цьому зв'язку основним показником ефективності і якості силових зубчастих передач є навантажувальна здатність, яка найповніше характеризується згинною міцністю зубців. Важливим чинником також є опірність циклічній втомі, оскільки навіть в передачах, які працюють без реверсу на середніх швидкостях зубці піддаються періодичному впливу циклічного навантаженню та розвантаженню.

Успішні конструктивні та технологічні рішення, які б забезпечили ці вимоги, дали б змогу зменшити масогабаритні параметри передач і редукторів та скоротити витрати на їх виготовлення, тому проблема підвищення експлуатаційних характеристик силових зубчастих передач є актуальною у наш час.

Одним із ефективним засобів для досягнення поставленої мети може служити модифікація профілів зубців, яка полягає в утворенні асиметричних відносно площини їх симетрії профілів. Дослідження зубчастих коліс з асиметричним профілем зубців ведуться у США (А. Капелевич та Ю. Шехтман), в Росії (В.Л. Дорофєєв, В.Н., Кудрявцев, Ю.Н. Кірдяшев), в Болгарії (К.Б. Арнаудов). Відомі праці присвячені, в основному інженерним розрахункам, метрології, геометричним параметрам і зачепленню в таких передачах. Область використання коліс з несиметричними зубцями обмежується редукторами літальних апаратів, наприклад, редуктора авіаційного двигуна ТВ7-117 [].

На рис.1 наведено зубчасту пару коліс з асиметричними

профілями, а на рис.2 – блок-шестерню редуктора приводу хвостового гвинта гелікоптера з симетричними зубцями (а) та блок-шестерню, що має колесо з несиметричними зубцями після модернізації редуктора [2, 3].



Рис.1. Передача з несиметричними зубцями



а



б

Рис.2. Блок шестерні редуктора гелікоптера до модернізації (а) та після модернізації (б)

Схематичне зображення вказаних профілів, яке показує відмінності в зачепленні асиметричних зубців представлено на рис.3. [4].

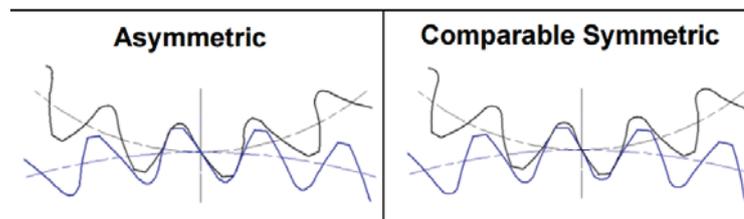


Рис.3. Схематичне зображення передач з асиметричними і симетричними зубцями

Модифікація зубців, описана вище, стосувалися евольвентних зубчастих передач, які на даний час вважаються найбільш універсальними та досконалими, та які отримали найширше розповсюдження у машинобудуванні. Разом з тим, на сьогодні відома передачі, які мають вищі, ніж евольвентні, експлуатаційні властивості – це синусоїдальні передачі. Теоретично обґрунтовано та перевірено експериментально, що зубчасті колеса з синусоїдальним профілем

мають значні переваги порівняно з евольвентними колесами: менший на 3,5-4 дБ (12-15%) рівень шуму в передачі; до 40% вища навантажувальна здатність, контактна і циклічна міцність; значно більший ресурс; можливість зменшити до 30% масогабаритні параметри редукторів і передач; відсутність подрізання навіть при кількості зубців, рівній 3. Важливо також, що ці передачі можуть бути як силовими, так і швидкісними, а також можуть поєднувати ці вимоги одночасно [5,6].

Відомі результати досліджень евольвентних асиметричних передач були скеровані лише на умови контакту і показали, що напруження у спряженні похилих асиметричних евольвентних профілів зменшуються на 6-9% [4], проте напруження в основі зубців не досліджувалися. Разом з тим, синусоїдальні зубці в основі ніжок мають іншу, ніж евольвентні, перехідну поверхню, яка істотно впливає на навантажувальну здатність передач, тому аналіз напружень на цих поверхнях має практичне значення для оцінки міцності зубців.

Мета статті: приймаючи до уваги переваги синусоїдального зачеплення, необхідно дослідити, як змінюється навантажувальна здатність синусоїдальних зубців з модифікованими асиметричними профілями порівняно з евольвентними зубцями, та можливість їх використання в приводах підйомно-транспортних машин.

Шляхи вирішення проблеми.

1. Дослідження передач на основі твердотілого моделювання. Для аналізу міцності і навантажувальної здатності передач в системі *Solid Works* змодельовано робочі поверхні евольвентних та несиметричних синусоїдальних зубців для коліс з однаковими параметрами (модуль 5 мм, кількість зубців 40; ширина вінця $B = 35$ мм, матеріал - сталь 40X: $\sigma_T = 210^8$ МПа; $\sigma_B = 620$ МПа; $\rho = 7700$ кг/м³). Тиск на діляльному діаметрі дорівнював 310 МПа, що відповідає крутному моменту на осі коліс 21,5 Нм. Зубчасті колеса, як об'єкти твердотілого моделювання бібули розбиті на тетраїдальні елементи (всього 74690) з параболічною апроксимацією граней і автоматичною зміною кроку сітки на фасках та округленнях. Границі розмірів елементів становлять 0,25 мм - 1 мм (рис.4).

На рис.5 наведені хромограми розподілення біля основи зубців напружень, які виникають в результаті прикладання вказаної статичної сили, що діє в передачі. Як видно, у зубців з евольвентним профілем виникають інтенсивні напруження згину, які концентруються біля ніжки зубця і розподілені у вигляді клина по нормалі до евольвентної поверхні. Висока концентрація напружень і клиноподібна дія сприяє швидшому виникненню мікротріщин у цій ділянці, яка в часі експлуатації переростає в макротріщину, що, в підсумку, призводить до ламання зубця. Щоб запобігти цьому, треба було б збільшити радіус

перехідної поверхні евольвентного зубця не менш, ніж у 3 рази, але стандарті черв'ячні фрези мають радіус при вершині зубця, який не перевищує 0,2 величини модуля.

В колеса з синусоїдальними асиметричними зубцями напруження біля основи ніжки зубців до 50% менші та розподілені за іншими закономірностями. Відсутній градієнт збільшення напружень в напрямку тіла зубця, а напруження рівномірно розподілені по дну впадини. За такого розподілу напружень в зубців з асиметричними синусоїдальними профілями колеса будуть мати значно вищу навантажувальну здатність і опір згинному моменту.

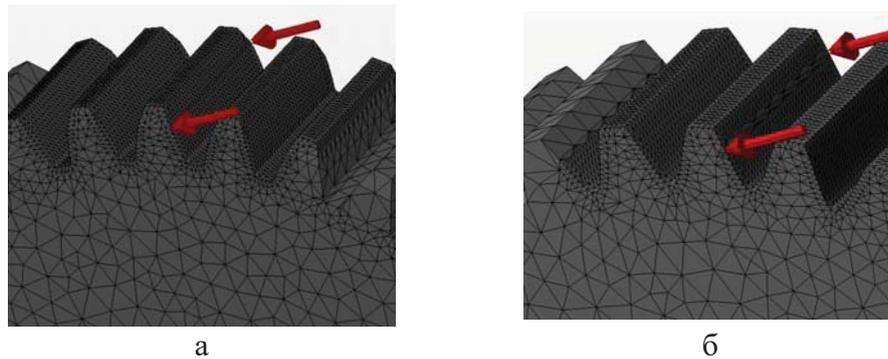


Рис.4. Евольвентне симетричне (а) та асиметричне синусоїдальне (б) зубчасті колеса з сіткою точок

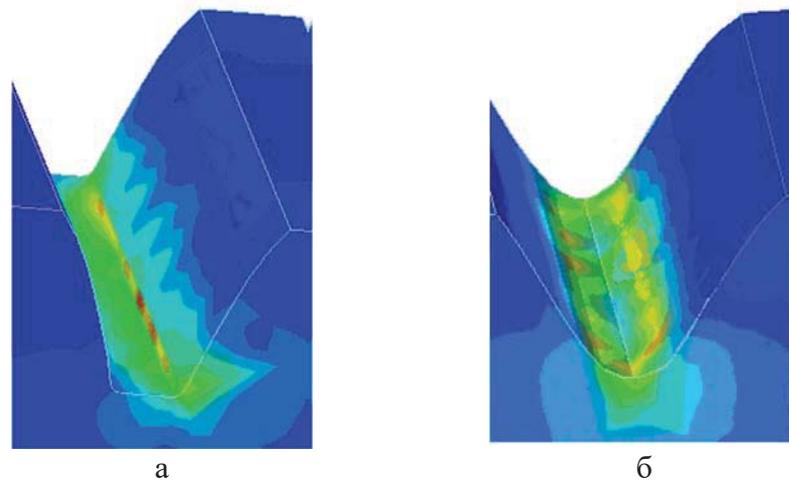


Рис.5. Напруження згину в ділянці основи ніжок евольвентного симетричного та синусоїдального асиметричного зубця під дією зовнішнього навантаження

На рис.6, а, б наведені графіки розподілення напружень в зубцях по висоті профілів при навантаженні нормальною силою, прикладеною до ділильного діаметра і пружні деформації зубців під

дією однакових сил. З результатів аналізу випливає, що в асиметричних синусоїдальних зубцях напруження на ділільному діаметрі на 16-18% менші, ніж в евольвентних, при цьому асиметричні зубці на діаметрі виступів деформуються на 23-28% менше, ніж синусоїдальні при тих же умовах.

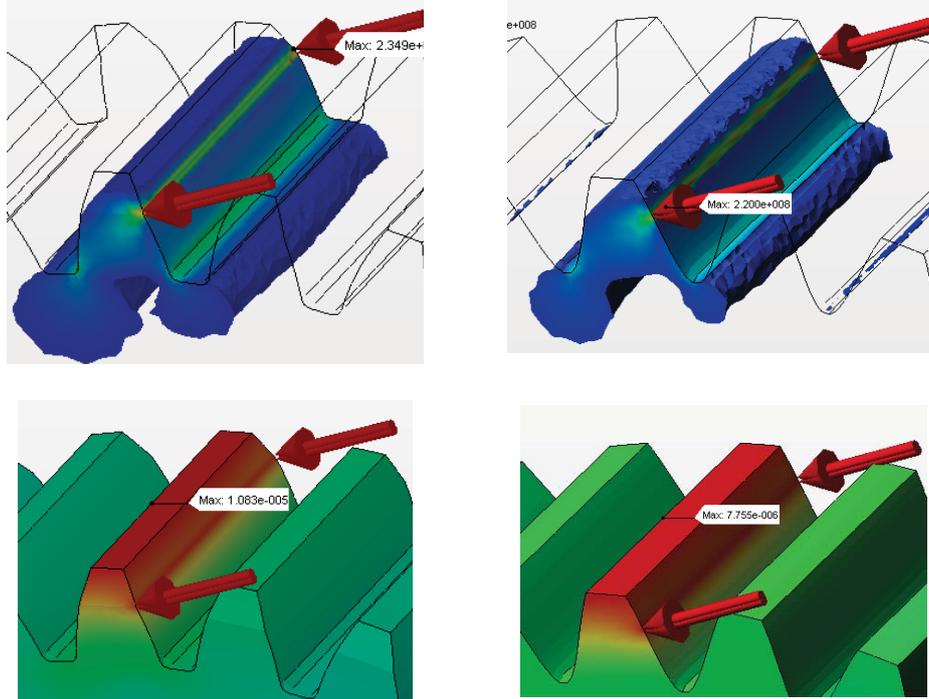


Рис.6. Розподілення напружень в зубцях по висоті профілів при навантаженні нормальною силою, прикладеною до ділільного діаметра (а, б) і пружні деформації зубців під дією однакових сил (в,г): а, в – симетричний евольвентний зубець; б, г - синусоїдального асиметричний зубець

Отримані результати підтверджують, що синусоїдальні передачі з колесами з асиметричними профілями мають вищу навантажувальну здатність, ніж передачі на основі традиційного евольвентного зачеплення. Використання на практиці цієї переваги дає змогу зменшити масогабаритні параметри редукторів, наприклад, як показано на рис.7, а також та витрати на їх виготовлення.

2. Спосіб нарізання синусоїдальних асиметричних коліс. На даний час розроблено новий ефективний технологічний спосіб зубонарізання, який може бути використаний для виготовлення коліс з асиметричними профілями – це радіально-коловий спосіб. Технологія цього універсального способу дає змогу на одному зубофрезерному верстаті простим інструментом – дисковою фрезою нарізати колеса

різних видів: прямо- і косозубчасті, черв'ячні і глобоїдальні, з прямолінійними і гвинтовими зубцями. Крім того, один інструмент можна використовувати не лише для нарізання коліс з різною кількістю зубців, але й різних модулів шляхом зміни ексцентриситету без обмеження його величини, а процес різання здійснюється при неперервному обкочуванні, як при нарізанні коліс черв'ячною фрезою [7, 8].

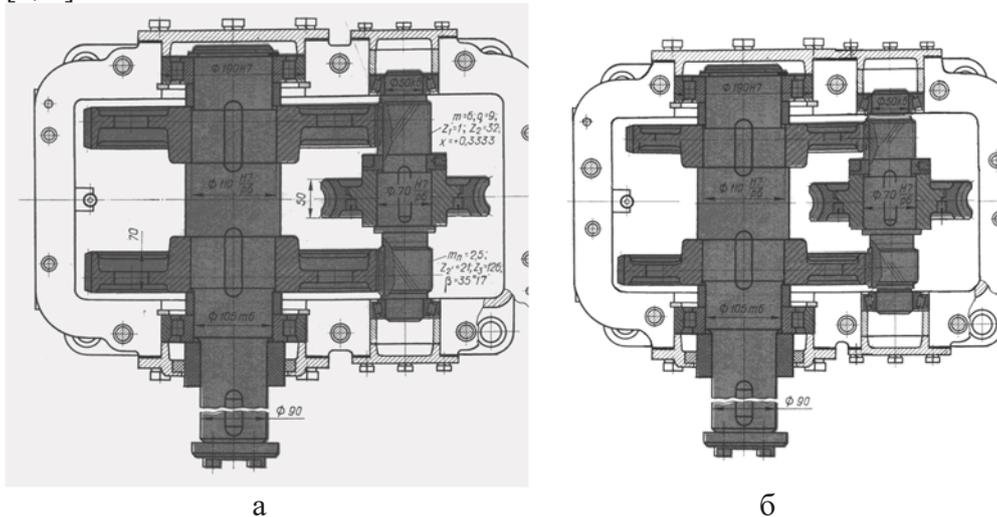


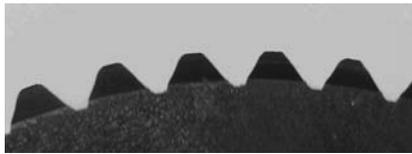
Рис. 7. Зменшення масогабаритних характеристик редукторів із синусоїдальними передачами: а – редуктор з евольвентними зубчастими колесами; б – синусоїдальний редуктор з колесами з асиметричними профілями

Періодичне, з постійною швидкістю, зворотно-поступальне переміщення дискової фрези, встановленої ексцентрично стосовно осі її обертання в РК-способі забезпечує утворення синусоїдальних профілів без будь-яких змін в законі руху фрези. Для нарізання зубців з асиметричними профілями у радіально-коловому способі нарізання достатньо тільки змістити дискову фрезу в осьовому напрямку на необхідну величину, яка відповідає заданому параметру асиметричності контура зубця (рис.8).

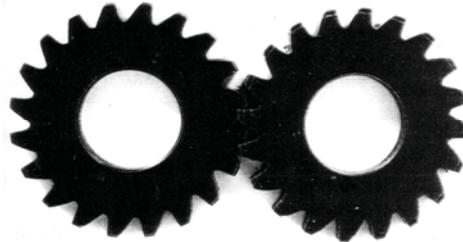
На рис.9 наведено асиметричні зубці синусоїдального колеса і два спряжені колеса з асиметричними синусоїдальними зубцями, нарізані даним способом.



Рис.8. Дискосва фреза, встановлена зі зміщенням в радіальному напрямку для нарізання коліс за радіально-коловим способом



а



б

Рис.9. Асиметричні синусоїдальні зубці циліндричного колеса (а) та спряження двох коліс з асиметричними зубцями, нарізаними дисковою фрезою радіально-коловим способом (б)

Висновки .

1. Дослідження, результати яких наведені у цій статті показали, що напруження, які виникають в основі ніжок асиметричних зубців синусоїдальних коліс порівняно з евольвентними зменшуються до 30% за величиною та змінюються за картиною розподілу в тілі колеса. Ці зміни виключають умови виникнення мікротріщин в ділянці ніжок зубців під навантаженням, підвищують опірність зубців згинним деформаціям та збільшують навантажувальну здатність передач, побудованих на основі синусоїдальних асиметричних зачеплень.

2. Впровадження зубчастих передач з синусоїдальними асиметричними зубцями, які мають вищу, ніж традиційні навантажувальну здатність дає змогу зменшити масогабаритні параметри редукторів підйомно-транспортних машин і механізмів та зменшити витрати на їх виготовлення при однаковій вхідній і вихідній потужності редукторів.

3. Технологія виготовлення синусоїдальних зубчастих коліс з асиметричними профілями зубців базується на радіально-коловому способі зубонарізання дисковою фрезою при неперервному обкочуванні та не потребує складного і дорогого спеціального обладнання та оснащення.

4. Використання радіально-колового способу зубонарізання є ефективним як при серійному випуску редукторів, так і умовах

ремонтного виробництва внаслідок простоти та універсальності. Заміна під час ремонту пари спряжених коліс колесами з синусоїдальними асиметричними профілями підвищить експлуатаційні характеристики редукторів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Novikov A.S., Paikin A.P., Dorofeyev V.L., Ananiev V.M., Kapelevich A.L. Application of Gears With Asymmetric Teeth in 60 Turboprop Engine Gearbox // Gear Technology, January/February 2008, s.60-65.

2. Kapelevich, A.L. "Geometry and Design of Involute Spur Gears with Asymmetric Teeth," Mechanism and Machine Theory, 35 (2000), 117–130.

3. Kapelevich A.L. Direct Gear Design [Text] / A. L. Kapelevich. - CRC Press, 2013. - 324 p.

4. Rating of Asymmetric Tooth Gears / A.L. Kapelevich, Y.V. Shekhtman, AKGears, LLC: American Gear Manufacturers Association. Virginia- 2015. 15 p.

5. Грицай И.Е., Благут Е.Н. Зубчатые передачи и технологии их изготовления: новое в традиционном. - Оборудование и инструмент: Международный информационно-технический журнал. - №2 (61) 2004. – С.36-40.

6. Грицай І.Є., Литвиняк Я.М. Синусоїдальні зубчасті передачі як альтернатива традиційним передачам та новий метод їх виготовлення. Зб.: Вісник Національного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Проблеми механічного приводу». Харків: НТУ «ХПІ». – 2009, №19. – 168 с. – с. 43 – 53.

7.Грицай І.Є., Громнюк С.І. Підвищення ефективності процесу нарізання зубчастих коліс на основі радіально-обертового методу в умовах обкочування. – Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць Донбаської державної машинобудівної академії. -Вип. 32-2013. Краматорськ, 2013. - С.226-229.

8. С.І.Громнюк, І.Є.Грицай. Концепція зубофрезерного верстату на основі радіально-колового способу зубонарізання [Текст] // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – С.142-152.