Пилипенко О.І., Колесник Д.М., Березняк А.М., Холодний Р.В. Державний науково-дослідний інститут випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки

МОДИФІКАЦІЇ ЗУБЦІВ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС АВІАЦІЙНИХ РЕДУКТОРІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ

Представлені типи і способи модифікацій зубців і зубчастих коліс, які знайшли застосування у редукторах літаків та вертольотів. Розглянуті особливості геометрії, параметри різних типів початкових виробляючих контурів, їх модифікації, застосування і вплив різних факторів на підвищення експлуатаційних характеристик зубчастих передач редукторів авіаційного призначення.

Ключові слова: зубці зубчастих передач редукторів, їх модифікації, застосування, вплив різних факторів.

Постановка проблеми. Надійність і якість роботи авіаційних двигунів великою мірою залежать від роботи зубчастих передач. В газотурбінних двигунах зубчасті передачі застосовуються для відбору потужності у газової турбіни і розподілу енергії по місцях призначення для привода гвинтів, допоміжних агрегатів та пристроїв. Порушення роботи зубчастих передач може призвести як до відмови окремих агрегатів, так і до припинення роботи авіаційного двигуна.

Від правильності вибору параметрів зубчастих коліс передач і приводів залежати вирішальною мірою працездатність літаків, вертольотів та іншої авіаційної техніки. Безперервні потреби у збільшенні несучої здатності зубчастих передач зумовлюють шукати нові резерви у вигляді раніш незастосовуваних параметрів.

Удосконалення конструкцій зубців і зубчастих коліс авіаційних редукторів – підвищення несучої здатності, зниження маси і габаритних розмірів, збільшення термінів служби і коефіцієнту корисної дії – є завданнями у галузі авіаційного редукторобудування, що не втрачають своєї актуальності.

Аналіз досліджень і публікацій. У зубчастих коліс можна виділити елементи, які безпосередньо впливають на їх робочі функції: евольвентні поверхні від вершини до западини зубців, вершини і западини зубців, поверхневі шари, які приймають навантаження в зоні зачеплення. Погіршеності виготовлення, складання та деформації під навантаженням і температурні зміни розмірів у теоретично точного спряження зубців передачі з паралельними валами зубчастих коліс призводять до того, що боковий зазор стає менше допустимого, товщина шару мастила значно зменшується і відбувається інтерференція в точці входу в зачеплення. Крайка зуба входить у контакт зі спряженою поверхнею поза лінією зачеплення (не існує загальної нормалі до поверхонь), гостра крайка руйнує масляну плівку, а велика швидкість відносного переміщення крайки по поверхні спряженого зуба здирає масляну плівку на його ніжці.

Для підвищення плавності роботи зубчастих передач редукторів, яка впливає на точність позиціонування, зменшення припрацьовочного зношування, шуму, усунення передчасного заїдання і, в кінцевому рахунку, для підвищення ресурсу необхідно усунути крайкову взаємодію зубців. Ця вимога особливо важлива для швидкохідних високонавантажених і високоресурсних передач, що підтверджується експериментальними і промисловими результатами досліджень вітчизняних і зарубіжних авторів.

Авіаційні зубчасті колеса знаходяться в особливо важких умовах експлуатації, оскільки через них відбувається передача високих навантажень при їх малій масі. Сучасні зубчасті передачі розраховані на ресурс більше 20000 годин для транспортних (цивільних) двигунів і більше 2000 годин для двигунів військового призначення. Потужність, яка передається при цьому, становить більше 2000 кВт, частота обертання – більше 8000 хв⁻¹.

Роботи [1, 2] присвячені модифікації зубців косозубих циліндричних передач для зниження вібрацій з зубчастою частотою і модифікованій циліндричній евольвентній косозубій передачі зовнішнього зачеплення з підвищеними експлуатаційними властивостями. Основним способом зниження маси авіаційних зубчастих коліс є зменшення ширини зубчастого вінця – геометричного параметра, що безпосередньо впливає на величини контактних і згинальних напружень. Мала ширина вінців виключає раціональне застосування косозубого виду зачеплення, тому що переваги такого зачеплення реалізуються лише при достатньо великій ширині зубчастого вінця. Але головний недолік косозубого зачеплення – наявність осьових зусиль в зачепленні. Для їх сприйняття повинні застосовуватися більш потужні підшипникові вузли великих габаритів, ніж у прямозубому зачепленні. Це вимагає відповідно більш масивних корпусів передач, ободів і діафрагм зубчастих коліс. Тому, з усіх авіаційних циліндричних передач 97% є прямозубими.

У цих умовах виникає необхідність використання спеціальної геометрії та різних модифікацій зубців зубчастих коліс, які забезпечать відсутність крайкових ударів, невелику віброактивність і підвищену жорсткість зубців. Застосування модифікації (перехід від застосовуваних спряжених зачеплень до неспряжених) дає великий експлуатаційний і економічний ефект завдяки зменшенню габаритів і маси зубчастих коліс. Більше того неправильне визначення параметрів модифікації ще на стадії проєктування є найбільш частою причиною руйнування як зубчастих коліс так і двигуна. Найменша погрішність в оцінці величини модифікації призводить до концентрації контактних навантажень і напружень на крайках зубців, що може призводити до підвищення рівня вібрацій, заклинювання передачі і руйнування авіаційного двигуна.

Одним з можливих шляхів подолання нерівномірності розподілу навантаження між зубцями є застосування модифікованих зубчастих коліс.

Як зазначається в [3], більшість зубчастих коліс сучасних швидкісних передач виготовляються зі спеціальною модифікацією профілю зуба, а власне – з плавним відхиленням на голівці та ніжці зуба від теоретичної евольвенти головного профілю “в мінус”, що призводить до зниження рівня шуму і мінімізації роботи тертя та потужності зношування.

Зниження жорсткості зачеплення за рахунок модифікації коліс призводить до підвищення податливості зубців і покращення динамічних характеристик передачі, більш рівномірного розподілу на навантаження по контактних лініях. Незважаючи на те, що накопичений досить великий досвід різних модифікацій зубчастих коліс [4], дієвих рекомендацій щодо вибору їх оптимальних параметрів, що базуються на останніх досягненнях теорії пружності та широкому застосуванні можливостей ЕОМ з метою врахування реальної геометрії зуба, на даний момент немає.

Контактна і згинальна міцність зубчастих коліс підвищується при збільшенні кута початкового контуру. Проте, застосування кутів профілю більше 25° обмежується загостренням зубців. Застосування зубчастих коліс з кутом профілю 28° можливо тільки при коефіцієнті висоти голівки зубців $h_a^* = 0,9$, але такі колеса мають менший коефіцієнт перекриття, що погіршує динамічні характеристики передач. Не вирішує проблему також підвищення міцності шляхом застосування коригованих зубчастих коліс.

Мета статті. Відстежити способи модифікацій зубців зубчастих коліс авіаційних редукторів для підвищення їх експлуатаційної надійності та технологічності.

Виклад основного матеріалу. Правильний вибір параметрів зубців і зубчастих коліс авіаційних редукторів значною мірою забезпечує працездатність літаків, вертольотів та іншої авіаційної техніки. В [5] у стислій формі подано поділ авіаційних зубчастих передач на групи за призначенням та особливості геометрії авіаційних евольвентних циліндричних зубчастих передач, які відрізняють їх від зубчастих передач загальномашинобудівного застосування.

Отже, модифікація – це цілеспрямована заміна евольвентної кривої профілю зубчастого колеса такою кривою, яка дозволяє компенсувати деформації зубців під навантаженням [5]. Модифікація зубців може бути профільною, поздовжньою,

комбінованою по профілю і довжині [6] та топологічною. До профільних модифікацій відносяться: лінійні модифікації профілю голівки та ніжки зуба і дугоподібні модифікації профілю зуба.

При збереженні базової евольвентної форми зуба без модифікації забезпечується оптимальне зачеплення зубців при низьких навантаженнях і температурах. Форма інструменту, а також його рухи разом із заготовкою забезпечують евольвентний профіль зубців.

Модифікація по профілю здійснюється для забезпечення плавності входу зубців у зачеплення і виходу з нього, а також для обмеження по висоті несучої поверхні зубців. Виконується зрізанням голівок зубців шестерні і колеса або зрізанням голівки і ніжки зубців тільки у шестерні.

Модифікація по довжині здійснюється для обмеження несучої поверхні зубців по довжині і зміни положення цієї поверхні по довжині. Виконується у вигляді кола одного радіусу або комбінації з кіл двох радіусів і одної прямої. При цьому забезпечується симетричний і несиметричний нахили лівого і правого боків зуба.

Комбінована модифікація по профілю і довжині виконується для забезпечення плавності входу і виходу з зачеплення зубців, обмеження і зміни положення несучої поверхні зубців по висоті і довжині.

Топологічна модифікація здійснюється для забезпечення специфічних вимог до експлуатації ріжучих, деформуючих та правлячих зубчастих інструментів і спеціальних конструкцій зубчастих коліс. При цьому забезпечуються плавні зміни поверхні зуба по профілю і довжині зуба в будь-якій його точці (Рис.1).

Рис.1. Види модифікації зубців

Окрім зазначених застосувань, модифікацію виконують: для усунення підрізання зубців шестерні; для підвищення згинальної міцності зубців, що досягається збільшенням їх товщини; для підвищення контактної міцності, що досягається збільшенням радіусу кривини в полюсі зачеплення; для отримання заданої міжосьової відстані зубчастої передачі.

Параметри профільної модифікації встановлюються конструктором у процесі доводки (доопрацювання) виробу і залежать від навантаженості, точності виготовлення конструкції колеса і вузла в цілому. Як правило, профільній модифікації підлягає голівка зуба колеса, причому в першому наближенні її глибина в міліметрах може бути прийнята рівною:

$$\Delta_a = \frac{1}{2} \frac{F}{b_w} \cdot 10^{-4},$$

де F – сила, що визначає міцність передачі, Н;

b_w – ширина зубчастого вінця, мм.

Глибина модифікації ніжки зуба складає приблизно $\Delta_f = 0,6 \cdot \Delta_a$. Товщина зубців на колі вершин $S_a \approx (0,3 \dots 0,4) \cdot m$ або, в залежності від глибини цементованого шару $\delta_{T.O} \approx (0,15 \dots 0,3) \cdot m$ складає $S_a \leq 2 \cdot \delta_{T.O} + (0,08 \dots 0,1) \cdot m$. Згідно AGMA 411.02 глибина цементованого шару в міліметрах при твердості HRC 50 може бути прийнята в залежності від модуля зачеплення m в межах:

$$1,2 \leq (m=8) \leq 1,8; \quad 1,0 \leq (m=6) \leq 1,5; \quad 0,85 \leq (m=5) \leq 1,4;$$

$$0,7 \leq (m=4) \leq 1,2; \quad 0,5 \leq (m=2,5) \leq 0,9.$$

При малих значеннях товщини зуба на колі вершин циліндричну поверхню заготовки перед цементациєю покривають міддю.

В авіаційних зубчастих колесах по грані, утворюваній перетином профільної поверхні зуба з циліндричною поверхнею вершин, робиться фаска або скруглення. Водночас видаляються заусениці, створюються найбільш сприятливі умови для формування масляного шару, пом'якшується крайковий контакт зубців. Фаски робляться також по контуру торцевої поверхні зубців, що дещо вирівнює розподіл навантаження у торцях. Іноді фаски на торці зуба мають різну величину – більшу на ніжці та профілі і меншу на голівці.

Для покращення працездатності важконавантажених і високошвидкісних циліндричних зубчастих передач зовнішнього зачеплення рекомендується застосовувати початковий контур з модифікацією профілю голівки зуба (ГОСТ 13755–81), при цьому лінія модифікації – пряма, коефіцієнт висоти модифікації h_g^* повинен бути не більше 0,45, а коефіцієнт глибини модифікації Δ^* – не більше 0,02. Параметри модифікації профілю голівки зуба початкового контуру і коефіцієнт глибини модифікації Δ^* в залежності від модуля і ступеня точності приведені в таблиці 1.

Рис.2. Профільна модифікація голівки зуба

Таблиця 1

Параметри модифікації профілю голівки зуба початкового контуру

Модуль m , мм	Ступінь точності за нормами плавності роботи за ГОСТ 1643–81		
	6	7	8
до 2	0,010	0,015	0,020
2...3,5	0,009	0,012	0,018
3,5...6,3	0,008	0,010	0,015
6,3...10	0,006	0,008	0,012
10...16	0,005	0,007	0,010
16...25	–	0,006	0,009
25...40	–	–	0,008

З метою послаблення або усунення торцевого крайкового контакту використовують поздовжню модифікацію робочих поверхонь зубців (звичайно одного з пари коліс), надаючи їм злегка бочкоподібну форму.

За наявності технологічних погрішностей і деформацій деталей відбувається перекочування поверхонь таких зубців у поздовжньому напрямку з переміщенням плями контакту в бік одного з торців зубчастого вінця.

Проведені дослідження [7] показали, що поздовжня модифікація зубців (бочкоподібність) дозволяє суттєво (в 1,2...1,3 рази) знизити згинальні напруження і підвищити навантажувальну здатність зубчастої передачі. На рис. 3 представлена картина контактної взаємодії зубців коліс у полюсній зоні [8].

Рис.3. Модель контактної взаємодії зубців 1 і 2 при відсутності (а) і наявності (б) перекосу [8]:

K – точка контакту зубців; b_w – довжина зуба; S – зміщення точки K від середини ;
 Δ – ступінь бочкоподібності зуба

Для підвищення плавності евольвентної зубчастої передачі необхідно знизити зношування активних поверхонь зубців і підвищити стійкість їх початкової геометрії. У зв'язку з цим пропонується [2, 8] дільниці профілів зубців у вершини і кореня, що працюють з максимальним ковзанням, замінити дільницями, що працюють з чистим коченням, доповнивши їх у голівки опуклими, а у ніжки увігнутими дуговими дільницями. В середині профілів зубців модифікованої передачі зберігають евольвентні дільниці, при цьому висоти голівки і ніжки зменшують у порівнянні зі стандартними при обов'язковому забезпеченні коефіцієнта торцевого перекриття евольвентних поверхонь зубців не менше 1,1.

Проведені випробування зубчастої передачі [8], виготовленої згідно запропонованої схеми зачеплення, показали, що довговічність нової передачі у 2 рази вища довговічності звичайної евольвентної зубчастої передачі за той же період експлуатації.

Однією з причин зниження навантажувальної здатності зубчастих передач є виникнення вібрацій, збуджуваних змінною жорсткістю зачеплення і скачкоподібним навантаженням зубців. Ці фактори не визначаються тільки погрішностями і тому їх не можна усунути підвищенням точності виготовлення і монтажу (про це йшлося у наших попередніх роботах). Проте, їх можна усунути за допомогою профільної модифікації зубців під назвою фланкування.

В [9] представлений аналіз модифікованої зубчастої передачі сьомого ступеня точності по нормах плавності ГОСТ 1643–81 за допомогою програми "AEROFLANK". Фланкування зубчастих коліс є технологічною операцією під час їх виготовлення, яка полягає у видаленні частини профілю зуба для зменшення погрішностей у рівномірному розподілі зубців на колесі (похибок основного кроку). Такі похибки, якщо їх не усунути,

викликають додаткові динамічні навантаження, підвищують вібрації та шум зубчастих передач. Похибки виготовлення і деформації зубців ведуть до контакту зубців поза лінією зачеплення, що супроводжується ударами. З результатів порівняння немодифікованої зубчастої передачі і модифікованої видно, що контактні напруження зменшились у 2,4 рази, температура в зачепленні – у 1,4 рази, а вібрації – у 1,5 рази.

Як стверджується в [10,11], багатообіцяючий потенціал для зниження вібрацій і шуму зубчастих передач редукторів закладений у подвійній модифікації профілю зуба з високим передавальним відношенням і відповідній зубчастій передачі з так званим об'ємним обертанням. Проте, дослідження, результати яких приведені в зазначених роботах, показують, що такі передачі не забезпечують плавності кривих погрішності як при розрахункових, так і при невеликих навантаженнях. Крім того, контактні напруження в зубчастому зачепленні мають тенденцію суттєво коливатись на протязі циклу, що є критичним параметром у висококонтактній зубчастій передачі та має вирішальне значення для зношування, локальної корозії та експлуатаційної температури. Результати досліджень показують, що модифікація профілю зуба такого типу може забезпечити плавність похибки зубчастої передачі як при невеликих навантаженнях (крейсерський режим), так і при повному (рзрахунковому) навантаженні. Контактні напруження впродовж циклу дещо згладжуються.

Проте, головним недоліком, особливо для передач з великим передавальним відношенням, є збільшення, хоча і невелике, напруження у кореня зуба, коли вхідне навантаження нижче розрахункового, що може вплинути на втомну довговічність зубчастих коліс. Тому, поки що застосування подвійної модифікації профілю зуба вимагає більш ретельного дослідження з метою переконання в його ефективності та виробничих можливостях.

В [12]ведений аналіз ефектів від здійснення короткої та довгої лінійної, короткої та довгої дугоподібної та суцільної (топологічної) модифікацій зубців коліс при різних значеннях коефіцієнтів перекриття ε_α . Найбільш простий варіант корекції (не дуже вдала термінологія автора [12], тому що перегукується з коригуванням, (Рис.4)) профілю – це зрізання вершини зуба.

Зміщення зубців (модифікацію) застосовують для усунення підрізання при малих числах зубців, підвищення їх міцності за рахунок збільшення товщини і радіусів у точці дотику, отримання заданої міжосьової відстані.

Під час нарізання зубчастих коліс при додатньому зміщенні інструментальної рейки (від центра зубчастого колеса) збільшується товщина зуба у основі, що збільшує його міцність на згин (Рис.4). При тому діаметр вершин зубців зростає, а профіль зуба переходить на ділянку евольвенти, більш віддалену від основного кола, що призводить до збільшення радіусів кривини і, отже, до підвищення контактної міцності. Таке покращення профілю зуба називається коригуванням, яке досягається зміщенням інструментальної рейки. При додатковому зміщенні загострюється голівка зуба, що обмежує величину зміщення інструменту. При від'ємному зміщенні відбувається зворотнє явище.

Рис.4. Зміна форми зуба під час коригування

При заданому модулі зачеплення зміна числа зубців призводить до зміни форми зуба (Рис.4). Зі зменшенням числа зубців колеса товщина зуба в його основі зменшується і, при деякому мінімальному значенні ($13 < z_{min} < 17$ при $\alpha_w = 20^\circ$), з'являється підріз зуба ріжучою крайкою інструментальної рейки.

В залежності від комбінації зміщень під час нарізання зубців парних зубчастих коліс модифікація (коригування) може бути висотною або кутовою. Під час висотної модифікації шестерню і зубчасте колесо виготовляють з протилежним зміщенням: шестерню – з додатнім зміщенням, а колесо – з від'ємним. Міжосьова відстань і кут зачеплення при цьому не змінюються. Під час кутової модифікації сумарний коефіцієнт зміщення відрізняється від нуля, а міжосьова відстань і кут зачеплення змінюються.

У зубчастих коліс зі зміщенням товщина зуба і ширина западини по ділильному колу неоднакові, але в сумі залишаються рівними кроку зачеплення p .

При зрізанні вершини зуба важливі два основні параметри – розміри C_a і довжина L_{Ca} (Рис.5) [12]. Щодо останнього, то в різних літературних джерелах погляди на цей розмір дуже різняться: є два основні варіанти цієї довжини модифікації профілю зуба – так звані “короткі” і “довгі” (Рис.6) [12], але, стосовно оптимальної довжини, однозначної оцінки не існує. Причина в тому, що ефект модифікації залежить ще і від коефіцієнта торцевого перекриття.

Рис.5. Параметри лінійних профільної і поздовжньої модифікацій зуба у відповідності до ISO 21771: 2007 [12]: 1 – прогалина; 2 – зуб

Рисунок.6. “Короткий” і “довгий” варіанти модифікації профілю зуба [12]

На рисунку 7 [12] показані дугоподібні модифікації профілів зубців – топологічний (бочкоподібний) і параболічний згідно ISO 21771: 2007.

Рис.7. Бочкоподібна та дугоподібна (параболічна) профільні корекції у відповідності до ISO 21771: 2007 [12]

З приведених в [12] графіків видно, що у зубчастих пар без модифікації профілю зубців похибка передачі та згин зуба збільшуються пропорційно крутному моменту. Зменшення похибки відбувається зі збільшенням коефіцієнта торцевого перекриття, причому суттєве зниження (біля 50%) має місце при значенні $\varepsilon_\alpha = 1,8$ і вище. В таких передачах в контакт знаходяться 2–3 пари зубців, що забезпечує високу жорсткість і зниження похибки. Показано, наприклад, що похибка зубчастих коліс з високими зубцями ($\varepsilon_\alpha \geq 2,0$) менше половини похибок нормальних зубчастих коліс, причому це дійсно тільки для немодифікованих коліс.

У модифікованих коліс похибка зубчастої передачі не пропорційна крутному моменту, а похибка зубчастих коліс з високими зубцями знижується менше в порівнянні з нормальними колесами. Автором показано ситуацію, коли зубчасті колеса, піддані “короткому” варіанту модифікації, виявляються гірше, ніж зубчаста передача без модифікації. Зроблено висновок, що за виключенням зубчастих пар з дуже високим коефіцієнтом торцевого перекриття ($\varepsilon_\alpha = 2,4$), “короткий” варіант модифікації завжди гірший, ніж відсутність модифікації взагалі. Під час низьких навантажень (75% і нижче) приріст похибки може досягати 300% і більше.

Зовсім інша картина спостерігається при використанні “довгого” варіанту модифікації профілю зубців коліс. У більш ніж 80% значень номінального крутного моменту відбувається значне (30–70%) зменшення похибки, що підтримується рядом авторів [12]. Тільки для низьких навантажень (60% і нижче від номінального крутного моменту) можливе

збільшення похибки порівняно з передачею без модифікації. Але все ж таки це збільшення менше, ніж при “короткому” варіанті модифікації профілю зубців коліс.

Виявляється, що лінійна модифікація профілів зубців набагато краща, ніж дугоподібна, причому цей ефект залежить від крутного моменту: лінійна модифікація дуже ефективна для розрахункового крутного моменту, але гірша, ніж інші варіанти модифікації, для менших його значень.

У дослідженні була застосована погрішність кроку зачеплення в 3 мкм, тобто половина від максимально припустимої похибки для Q-6 (ISO 1328 або AGMA 2015) зубчастих коліс такого розміру. Під час виготовлення похибка збільшується, але середнє збільшення похибки зубчастої передачі набагато менше погрішності кроку зачеплення. Крок з похибкою у 3 мкм збільшує похибку передачі без модифікації профілів зубців всього на 1 мкм і навіть менше. Якщо ж здійснювати модифікацію профілю зубців, то краще всього для поглинання похибок підходить дугоподібний (короткий і довгий) і короткий лінійний варіанти модифікації зуба.

З рисунку 8 [12] видно, що похибка передачі – Peak-To-Peak Transmission Error (PPTE) звичайно, дещо збільшується від нуля до короткої корекції профілю – Short Profile Correction (PC). При збільшенні довжини корекції похибка суттєво знижується і (швидше з лінійною корекцією – синього кольору, ніж з дуговою – червоного) досягає мінімуму біля корекції довгого профілю (Long Profile Correction). Результати дослідження чітко показали, що довга корекція знижує похибку передачі. Один зі згадуваних неодноразово в роботі авторів (Хаузер) рекомендує використовувати “середню” корекцію профілів зубців як кращий компроміс у залежності від діапазону експлуатаційних навантажень.

Рис.8. Похибка передачі при розрахунковому крутному моменті в залежності від довжини корекції профілю (для зубчастої передачі з $\varepsilon_{\alpha} = 1,6$) при використанні лінійної або дугоподібної корекції вершини [12]

Встановлено [12], що при застосуванні оптимальної корекції профілів зубців температура в зачепленні знижується з 120°C до 112°C, а різниця між локальною температурою під час контактування зубчастих коліс і температурою тіла колеса знижується з 43,6°C до 35,7°C.

Звичайно, локальна температура досягає своїх максимальних значень як на початку, так і в кінці контактування між двома зубчастими колесами. Зменшення товщини зубців корекцією профілів зменшує тиск (згідно формули Герца) в точках контакту, результатом зниження навантаження є те, що локальна температура на початку і в кінці контакту зменшується. Не виявлено суттєвої різниці у застосуванні короткої і довгої корекції для відносного зменшення температури, тому застосування будь-якої корекції профілю зубців, за деяким виключенням, буде корисним.

Що стосується коефіцієнта торцевого перекриття, то зниження температури спостерігається при мінімальному значенні $\varepsilon_\alpha = 1,4$ (порівняно з редуктором без корекції профілю зубців); потім температура значно знижується при більш високих значеннях цього коефіцієнту і досягає свого оптимального значення при $\varepsilon_\alpha = 2,0$, коли температура знижується на 60%, а далі, навіть при високих значеннях ε_α , спостерігається менш суттєве зменшення температури. Крім того не виявлено суттєвих впливів кривини корекції профілів зубців на температуру.

В результаті фланкування отримують теоретично правильний контакт зубців по лінії зачеплення. Замість терміну “фланкування зубчастих коліс” ГОСТ 13755 [13] рекомендує користуватися терміном “профільна модифікація у вершини зуба або у його основи”. Там же наведені рекомендації із застосування модифікації профілів зубців у параметрах початкового контуру і правила не тільки призначення, але і вимірювання параметрів модифікації (Рис. 9) [13].

а) пряма лінія модифікації

б) параболічна лінія модифікації

Δ_g, Δ_q – глибина модифікації голівки (ніжки) зуба – найбільша відстань від точки перетину головного профілю з лінією вершин до лінії модифікації голівки за напрямом лінії вершин;
 Δ_{ag}, Δ_{aq} – нормальна глибина модифікації голівки (ніжки) зуба – найменша відстань від головного профілю точки перетину лінії модифікації з лінією вершин (з лінією L, що проходить через граничні точки).

Нормальна глибина модифікації головного профілю початкового контуру визначається за формулою: $\Delta_a = \Delta \cos \alpha_p$.

Рис.9. Загальні схеми модифікації початкового контуру [13]

Зауважимо, що глибини модифікації та інші параметри профілю зуба, вказані на рисунку 9, встановлюються або експериментальним шляхом, або розрахунком у залежності від ступеня точності зубчастих коліс, статистичних характеристик типових геометричних та монтажних погрешностей, пружної податливості зубців, методу виробництва і даним стандартом не визначені.

В залежності від основних технологічних і конструктивних умов можуть застосовуватись різні набори параметрів модифікацій. На рисунку 10 [13] показані основні типи модифікацій профілів зубців, а в таблиці 2 [13] наведені рекомендації щодо їх застосування.

Рис.10. Діаграми різних типів модифікації профілів зубців [13]

Таблиця 2

Параметри модифікації профілю зубців для різних типів діаграм відхилень від евольвенти і рекомендації щодо їх застосування [13]

Тип діаграми профілю	Рекомендації щодо застосування модифікації профілю зубців
I	Виконується шляхом зміни основного кроку на одному з коліс так, щоб вхід зубців у зачеплення відбувався без крайкового удару
Г	Передачі, до яких висуваються підвищені вимоги за шумом і вібраціями під навантаженням. Виконується або на зубцях веденого колеса, або на двох колесах одночасно
L	Передачі, до яких висуваються підвищені вимоги за шумом і вібраціями під навантаженням. Виконується або на зубцях ведучого колеса, або на двох колесах одночасно
К	Багатопоточні передачі, до яких висуваються підвищені вимоги за шумом і вібраціями під навантаженням. Цей вид модифікації допускається застосовувати на зубцях тільки одного з коліс
С	Передачі, що працюють на змінних режимах навантаження, до яких висуваються підвищені вимоги за шумом і вібраціями
D	Передачі з зубчастими колесами, які мають коефіцієнт перекриття більше 1,7 і до яких висуваються високі вимоги за шумом і вібраціями

В залежності від основних експлуатаційних характеристик альтернативно стандартному початковому контуру зуба і початковим контурам з кутом головного профілю $\alpha_p = 20^\circ$ можуть бути використані інші типи модифікованих початкових контурів, основні

параметри яких приведені в [5] та [14]. Там же розглянуті переваги, які дає застосування збільшених профільних кутів у порівнянні зі стандартними, які застосовують у загальному машинобудуванні.

Розвиток конструкцій зубців і зубчастих коліс в авіаційних редукторах призвів до застосування зубчастих передач із зубцями несиметричного профілю, що можна розглядати як кардинальну модифікацію профілів зубців. Використання таких зубчастих передач підвищує міцність зубців за рахунок збільшення приведених радіусів кривини і збільшеній товщині зубців. Несиметричні зубці мають більшу товщину на вершині, що зменшує сколи зубців і завдяки їх більшій висоті досягається більша плавність зачеплення, зменшуються згинальні та контактні напруження.

Найявний досвід серійного виробництва і експлуатації авіаційних зубчастих коліс з несиметричними профілями зубців (у тому числі на літаку АН-70) свідчить про їх ефективність [14].

Висновки. Зубчасті передачі з високими зубцями (з коефіцієнтом торцевого перекриття $\varepsilon_\alpha \geq 2,0$) в більшості випадків мають тільки біля половини похибок у порівнянні зі звичайними зубчастими передачами без модифікації профілю зубців коліс. Застосування “довгої” модифікації дає зниження похибки на 30–70%, що підтверджується низкою робіт.

Для поглинання похибок прямозубих зубчастих передач краще всього підходить дугоподібний (короткий і довгий) і короткий лінійний варіанти модифікації профілів зубців авіаційних редукторів.

Не виявлено суттєвої різниці у застосуванні короткої і довгої корекції для відносного зменшення температури у зоні контакту зубців коліс, тому застосування будь-якої корекції профілю зубців, за деяким виключенням, буде корисним.

Найбільш кардинальним видом модифікації є застосування несиметричних профілів зубців коліс авіаційних редукторів.

Надійна і успішна робота редуктора забезпечується оптимальним розташуванням плями контакту під навантаженням шляхом моделювання з врахуванням процесу виготовлення зубчастих коліс зуборізним інструментом і відповідних модифікацій.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Косарев О.И. Модификация зубьев косозубых цилиндрических передач для снижения вибраций с зубчатой частотой // Вестник машиностроения. – Москва: ООО “Издательство машиностроение”, 2009. – Вып. №5. – С. 7–9.
2. Попов В.А. Модифицированная цилиндрическая эвольвентная косозубая передача внешнего зацепления с повышенными эксплуатационными свойствами // Вестник машиностроения. – Москва: ООО “Издательство машиностроение”, 2011. – Вып. №6. – С. 37–40.
3. Модификация зубчатых зацеплений как средство повышения показателей качества и нагрузочной способности зубчатых передач / В.Е. Антонюк, Б.С. Воронцов, В.Е. Старжинский, В.В. Супин. // Международный симпозиум “Теория и практика зубчатых передач”, 21-23 января 2014, Ижевск. – С. 285–300.
4. Сухоруков Ю.Н. Модификация эвольвентных цилиндрических зубчатых колёс. – Киев: Техніка, 1992. – 200 с.
5. Пилипенко О.І. Модифіковані конструкції зубців і зубчастих коліс авіаційних редукторів / О.І. Пилипенко, Д.М. Колесник, А.М. Березняк // Матеріали I Міжнародної

науково-практичної конференції “Авіація, промисловість, суспільство”. – Кременчук: КАК, 2020. – Ч.1. – С. 170–173.

6. Лагутин С.А. Сочетание продольной и профильной модификации зубьев в цилиндрических передачах // Конверсия в машиностроении. – 2001. – № 2. – С. 68–72.

7. Короткин В.И. Определение напряжений в основании прямых бочкообразных зубьев колес цилиндрических эвольвентных зубчатых передач // Вестник машиностроения. – М: ООО “Издательство машиностроение”, 2010. – Вып. № 10. – С. 3–11.

8. Короткин В.И. Эффективные контактные напряжения на поверхностях прямых бочкообразных зубьев эвольвентных зубчатых колес // Вестник машиностроения. – М: ООО “Издательство машиностроение”, 2011. – №8. – С. 3–8.

9. Дорофеев В.Л. Система моделирования “AEROFLANK” & прямой синтез износостойких и малошумящих зубчатых передач / В.Л. Дорофеев, В.В. Голованов, Д.В. Дорофеев // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: Вісник НТУ “ХПІ”, 2013. – Вып. № 40(1013). – С. 39–48.

10. Wang, J. and I. Howard. “Comprehensive Analysis of Spur Gears in Mesh with Various Type Profile Modifications,” 2006, Proceedings International Conference on Mechanical Transmissions, Chongqing, P.R. China, pgs. 42–47.

11. Wang J., Howard I. A Further Study on High-Contact-Ratio Spur Gears in Mech with Double-Scope Tooth Profile Modification // Geartechnology, 2008. November / December, P. 64–70.

12. Kissling U. Effects of Profile Corrections on Peak-to-Peak Transmission Error // Geartechnology, 2010. July. P. 52–61.

13. Конкурсная работа по теме Применение достижений авиационной техники для развития промышленности России, на примере разработанного в ЦИАМ межгосударственного стандарта ГОСТ 13755–2015 // В.Л. Дорофеев, В.В. Голованов, С.Г. Гукасян, Д.В. Дорофеев в номинации: За вклад в разработку нормативной базы в авиации и авиастроении. – Рег. № 016–813 от 15.06.2016.

14. Пилипенко О.І. Розвиток конструкцій зубців і зубчастих коліс авіаційних редукторів / О.І. Пилипенко, Д.М. Колесник, А.М. Березняк // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки. – Чернігів: Брагинець О.В., 2020. – Вип. №4(6). – С. 70–80. – DOI: 10.37701/dndivsovt.6.2020.08

Пилипенко Олег Іванович

доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна

<http://orcid.org/0000-0003-0590-0107>

E-mail: opilip@ukr.net

Колесник Денис Миколайович

начальник науково-дослідної лабораторії Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки, Чернігів, Україна

<http://orcid.org/0000-0001-8833-570X>

E-mail: denis1971@ukr.net

Oleg Pilipenko

Doctor of Technical Sciences, Professor, Lead Researcher of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine.

<http://orcid.org/0000-0003-0590-0107>

E-mail: opilip@ukr.net

Denis Kolesnyk

Chief of Laboratory of State Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine

<http://orcid.org/0000-0001-8833-570X>

E-mail: denis1971@ukr.net

Березняк Анатолій Миколайович

начальник науково-дослідного відділу
Державного науково-дослідного інституту
випробувань і сертифікації озброєння та
військової техніки, Чернігів, Україна
<http://orcid.org/0000-0003-4081-9152>

E-mail: berezniak80@ukr.net

Холодний Руслан Віталійович

науковий співробітник Державного науково-
дослідного інституту випробувань і
сертифікації озброєння та військової техніки,
Чернігів, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-1168-5215>

+38093-583-49-80

Anatoli Berezniak

Chief of Section of State Scientific Research
Institute of Armament and Military Equipment
Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine

<http://orcid.org/0000-0003-4081-9152>

E-mail: berezniak80@ukr.net

Ruslan Kholodnyi

Researcher of State Scientific Research
Institute of Armament and Military Equipment
Testing and Certification, Chernihiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-1168-5215>

+38093-583-49-80

**MODIFICATIONS OF GEAR WHEEL TEETH OF AVIATION GEARBOXES TO INCREASE THEIR
OPERATIONAL RELIABILITY AND TECHNOLOGY**

O Pilipenko, D Kolesnik A Berezniak and R Kholodnyi

The types and methods of modifications of teeth and gear wheels, which have found application in gearboxes of aircraft and helicopters, are presented. Features of geometry, parameters of different types of initial produced contours, their modifications, application and influence of various factors on improving the operational characteristics of gear drives of aviation gearboxes are considered.

Arcuate (short and long) and short linear options for modifying the tooth profiles of aircraft gearboxes are best suited to absorb the errors of spur gears.

There was no significant difference in the use of short and long correction for a relative decrease in temperature in the contact zone of the wheel teeth, therefore, the use of any correction of the tooth profile, with rare exceptions, turns out to be useful.

The advantages of using increased profile angles in comparison with the standard ones used in general mechanical engineering are considered.

Development of designs of teeth and gear wheels in aircraft gearboxes, the use of gears with teeth of an asymmetric profile, which can be considered as a cardinal modification of the tooth profiles. The use of such gears increases the strength of the teeth due to the increase in the thickness of the teeth. Unsymmetrical teeth have a large thickness at the tip, which reduces teeth chipping and due to their greater height, greater smoothness of engagement is achieved, bending and contact stresses are reduced.

The most radical type of modification is the use of asymmetric profiles of the teeth of the wheels of aircraft gearboxes.

Keywords: gear teeth of gearboxes, their modifications, application, influence of various factors.