

Лекція 14

Тема: Виготовлення евольвентних зубчастих коліс

Зміст:

1. Початкові контури евольвентного зачеплення.
2. Методи нарізування евольвентних коліс та їх призначення
3. Подріз евольвентних профілів.
4. Мінімальне число зубців евольвентного колеса.
5. Вибір профільного кута початкового контура.
6. Контрольні запитання.

1. Початкові контури евольвентного зачеплення

В якості початкового теоретичного контуру евольвентного зачеплення прийнятий сектор зубчастого колеса з $z \rightarrow \infty$, тобто зубчаста рейка.

Існує множина стандартизованих початкових контурів, які визначають ті або інші відмінності евольвентних профілів.

На рис. 4.9 показаний початковий контур евольвентного зачеплення, частіше усього використовуваний при проектуванні зубчастих коліс.

У показаного початкового контуру $h_a^* = 1,0$; $c^* = 0,25$; $\alpha = 20^\circ$; $R = 0,38m$.

Точками показані місця сполучення прямих ліній і дуг окружностей, обкреслених радіусом R .

Величина радіуса округлень ніжок зубців початкового контуру $R = 0,38m$, як це слідує з винесення I , визначається величиною c радіального зазору в зачепленні, рівного

$$c = c^* \cdot m = 0,25m.$$

На рис. 4.14 показаний початковий виробляючий контур евольвентного зачеплення, який відрізняється від просто початкового контуру, зображеного на рис. 4.13 тим, що має на голівках зубців додаткове подовження на величину $s = c^* m$.

Початковий виробляючий контур відноситься до зубонарізних інструментів.

Вершини зубців тут подовжені з тієї метою, щоб забезпечити нарізування додаткових заглиблень у западинах між зубцями заготовки, які забез-

печать радіальний зазор у зачепленні нарізаних робочих коліс, рівний по величині $c = c^* m$.

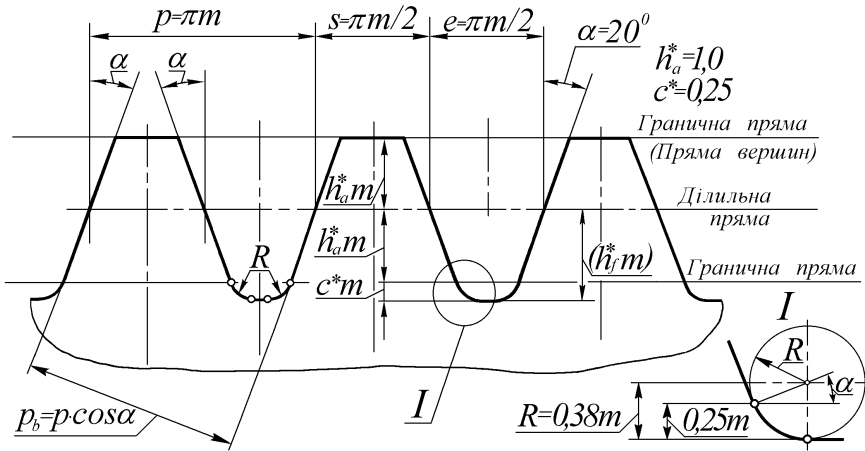


Рис. 4.13. Початковий контур евольвентного зачеплення

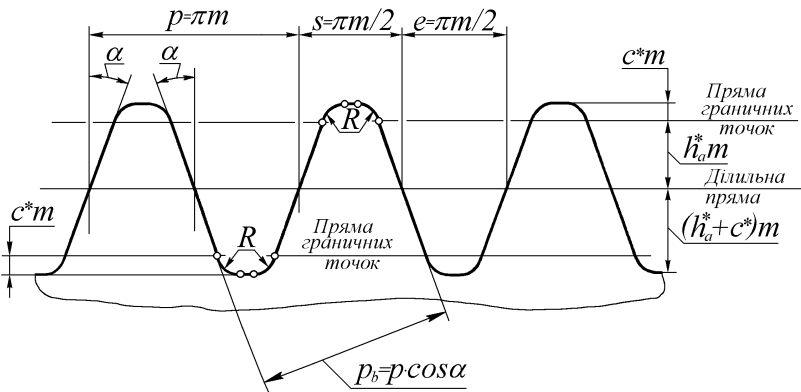


Рис. 4.14. Початковий виробляючий контур евольвентного зачеплення

Інші, застосовувані на практиці, початкові контури евольвентного зачеплення являються модифікаціями початкових контурів, показаних на рис. 4.9 і 4.10.

У них можуть бути інші значення h_a^* , c^* , α , R , і навіть може бути передбачене різне значення кута α у нижній частині зубців і на їхніх верши-

нах (так зване фланкування зубців, виконуване з метою зниження динамічних навантажень при вході зубців передач у зачеплення).

2. Методи нарізування евольвентних профілів

Існує два методи нарізування евольвентних профілів: метод копіювання (ділення) і метод обкатки (огинання).

Метод копіювання полягає у фрезеруванні западини між зубцями фрезою, обрис якої відповідає необхідній формі западини (рис. 4.15).

Нарізування евольвентних зубців можна виконати на універсальному фрезерному верстаті, здійснивши z проходів фрези.

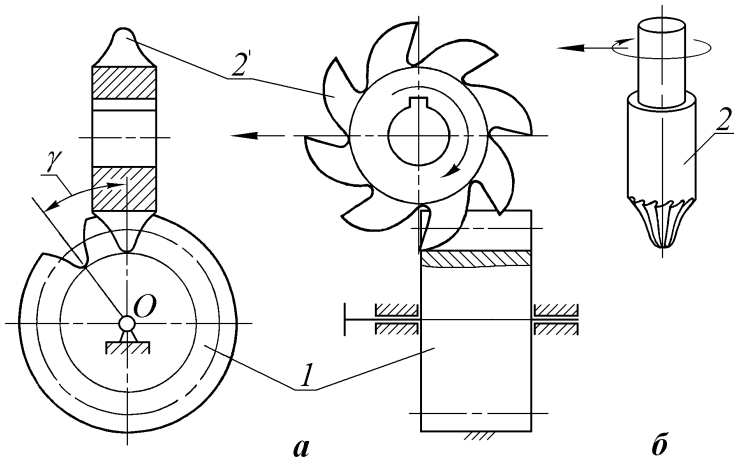


Рис. 4.15. Нарізування зубчастих коліс по методу копіювання

Поворот заготовки 1 для чергового проходу фрези здійснюється за допомогою ділильної голівки на кут $\gamma = 360^\circ / z$. Звідси і відбувається друга назва методу - "метод ділення".

При нарізуванні зубчастих коліс по методу копіювання можуть застосовуватися фрези двох видів: 2'-модульна дискова фреза (рис. 4.15а) ; 2"-модульна пальцева фреза (рис. 4.15б).

Модульна пальцева фреза має меншу стійкість (має менший ресурс) і тому, як правило, застосовується тільки при нарізуванні шевронних коліс, які інакше неможливо нарізати, або при нарізуванні коліс із врізними вінцями.

Шевронні колеса - дуже дорогі, відповідальні, високоточні колеса. Їх застосовують для передач великих потужностей при високих швидкостях обертання.

Звідси слідє висновок, що метод копіювання, хоч і не відрізняється високою продуктивністю, але може забезпечити принципово точне виготов-

лення відповідальних і навіть унікальних коліс (із багатометровими діаметрами, наприклад).

Проте, метод копіювання частіше використовується для попереднього чорнового нарізування зубчастих коліс при їхньому масовому виробництві або при одиничному нарізуванні тихохідних невідповідальних коліс в умовах невеличких майстерень, де не може бути спеціальних зубонарізних верстатів. Інструментальне господарство таких майстерень обмежене. Тому, для нарізування різних коліс певного модуля звичайно застосовують набори модульних дискових фрез, які складаються з декількох фрез, кожна з яких призначена для нарізування зубчастих коліс у деякому обмеженому діапазоні чисел зубців (наприклад, при $m < 8$ мм у наборі 8 фрез).

У цьому випадку зубчасті колеса нарізуються принципово неточно, адже при кожному числі зубців - свій профіль, а нарізується один і той самий профіль у коліс із різними числами зубців (наприклад, фреза №5 призначена для діапазону $z=26...29$, вона спрофільована конкретно лише для колеса з $z=26$).

Зубчасті колеса з $z=27$, $z=28$ і $z=29$, нарізані таким способом без наступної чистої обробки, можна застосовувати тільки в невідповідальних, нешвидкісних передачах, тому що вони мають низький ступінь точності.

Метод обкатки є принципово точним методом масового виготовлення зубчастих коліс, але він вимагає застосування спеціальних зубостругальних, зубодовбальних або зубофрезерувальних верстатів.

Останній тип верстатів має дуже високу продуктивність, тому його застосування усе більш розширюється.

Зубостругальні та зубодовбальні верстати мають меншу продуктивність, проте, також широко застосовуються в даний час.

На рис. 4.16 показана схема зубодовбання інструментальним зубчастим колесом, яке називається довбачем.

Інструменту - довбачу 1 і нарізуваному колесу 2 примусово повідомляються кутові швидкості ω_1 і ω_2 , які відповідають передаточному відношенню

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = -\frac{z_2}{z_1}.$$

Необхідні ω_1 і ω_2 задаються так званою гітарою верстата.

При цьому z_1 - число зубців довбача 1 відоме, а число зубців нарізуваного колеса розраховується через дільний діаметр заготовки d_2 і модуль зачеплення m по формулі

$$z_2 = d_2 / m.$$

Тим самим довбачем 1, як уже говорилося вище, можна нарізати зубці колеса 2 із будь-яким їх числом z_2 .

Обертання довбача 1 і колеса 2 із взаємозалежними кутовими швидкостями ω_1 і ω_2 є обкаточним рухом.

Для зрізання стружки довбачу повідомляється зворотно-поступальний осьовий рух. На рисунку цей рух показаний горизонтальними стрілками. Довбач відрізняється від звичайного зубчастого колеса тим, що має затилований зуб, який забезпечує наявність кута різання.

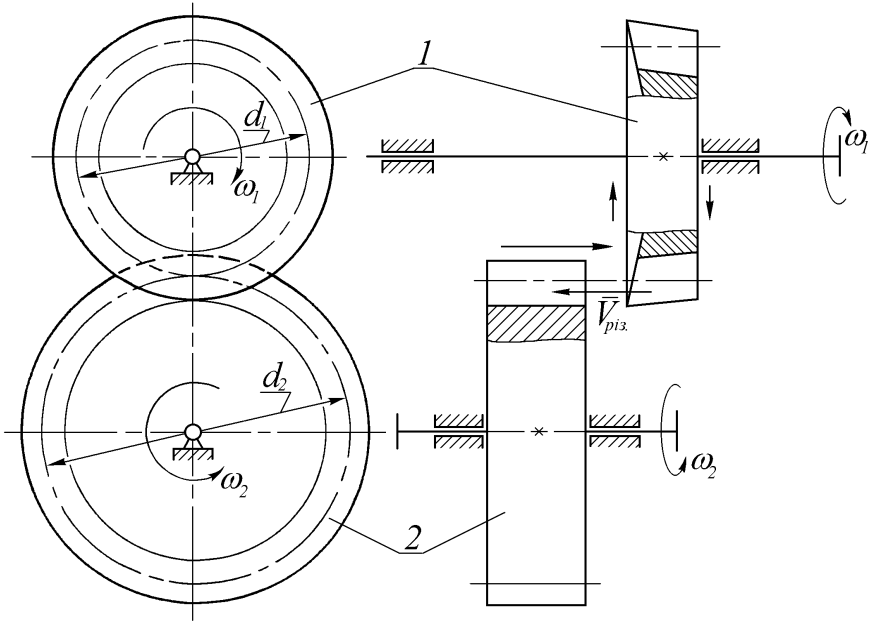


Рис. 4.16. Схема нарізування зубців довбачем на зубодовбальному верстаті

Передня сторона довбача періодично загострюється шліфувальним кругом з циліндричною або конічною формою. При цьому змінюється параметр χ_0 (так званий коефіцієнт зсуву довбача), який необхідно враховувати при виготовленні зубчастого колеса (від χ_0 залежать χ колеса та верстатна міжосьова відстань a_w).

Існують прямозубі і косозубі довбачі, які застосовуються для нарізування прямозубих і косозубих коліс. Косозубий довбач під час зубодовбання одержує ще і додатковий гвинтовий рух.

На рис. 4.17 показана схема зубостругання інструментальною прямозубою рейкою (гребінкою або планкою).

Процес зубостругання має багато подібного з процесом зубодовбання. Тільки тут замість обкаточного обертального руху інструментального

колеса здійснюється поступальний обкаточний рух інструментальної рейки. Через те, що довжина рейки обмежена, доводиться також додатково переставляти верстатне рейкове зачеплення в нове початкове положення. При великому числі зубців нарізованого колеса доводиться це робити по декілька разів.

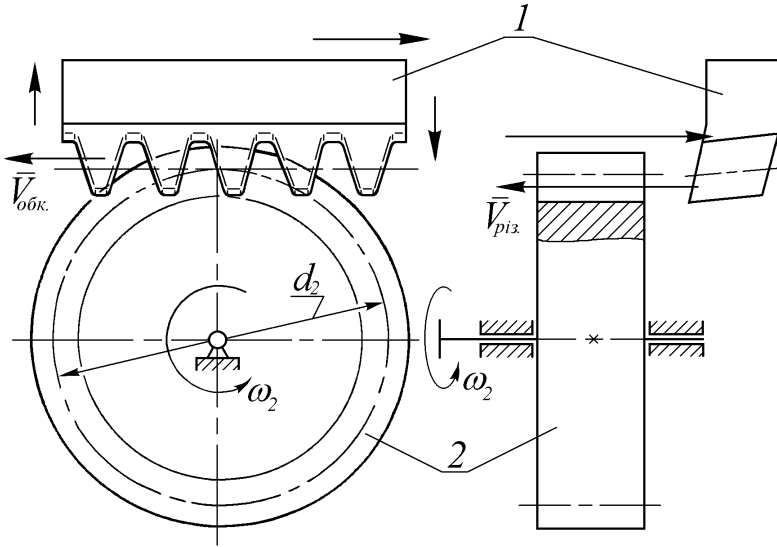


Рис. 4.17. Схема зубостругання прямозубою рейкою

З рисунка очевидно, що профіль рейки цілком відповідає початковому виробляючому контуру. При перезагостренні ріжучих країв рейки її контур не зазнає ніяких змін.

Варто підкреслити, що і при зубодовбанні і при зубоструганні в колеса, що виготовляється, нарізується той же самий евольвентний профіль. Відмінність зубчастих коліс, нарізаних названими способами, полягає в трьох різних формах неевольвентної частини западин між зубцями, яка практично не впливає на працездатність коліс.

Інструментальні рейки, як і довбачі, також можуть мати прямі або косі зубці. Причому прямозубою рейкою можна здійснювати нарізування як прямозубих, так і косозубих коліс.

На рис. 4.18 показана схема зубофрезерування евольвентних прямих зубців колеса 2 на зубофрезерному верстаті за допомогою черв'ячної фрези 1 (при $\lambda^* = \lambda$).

За рахунок зміни установочного кута λ можна нарізати зубчасте колесо з різними кутами нахилу зубців β .

Процес різання здійснюється безупинно без зворотних операцій, що забезпечує високу продуктивність верстата.

Черв'ячна фреза має число заходів z_1 , а нарізоване колесо повинно мати розрахункове число зубців z_2 .

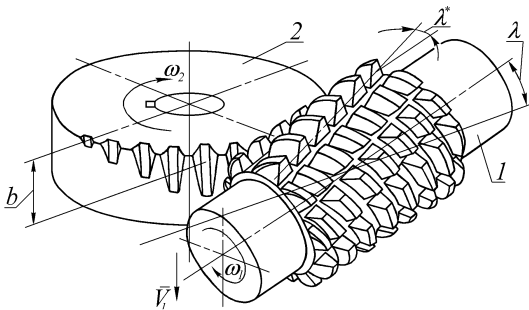


Рис. 4.18. Схема зубофрезерування

Звідси слідує співвідношення кутових швидкостей, які примусово повідомляються фрези 1 і заготовці 2,

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{z_2}{z_1}.$$

Черв'ячна фреза має нормальні до її витків пропили, за рахунок чого утворюються ріжучі крайки.

Обертання фрези забезпечує одночасно обкаточний рух (за рахунок осьового зсуву чергового ряду ріжучих крайків, що утворюють рейковий контур) і зрізання стружки.

Черв'ячній фрези (або ж заготовці) також повідомляється повільний рух з постійною швидкістю V_1 уздовж осі заготовки на відстань $L > b$, де b - ширина вінця, нарізованого колеса 2.

Перезагострювання фрези здійснюється плоскою стороною шліфувального круга шляхом розширення нормальних до витків фрези пропилів.

Якщо глянути на ріжучі крайки пропилу, то можна побачити загальний контур крайків, що практично збігається з початковим виробляючим контуром, показаним на рис. 4.14.

3. Підріз евольвентних профілів

Вище говорилося про інтерференцію евольвентних профілів зубців, що виникає у випадку, якщо робоча ділянка AB лінії зачеплення вийде за межі теоретичної ділянки N_1N_2 .

Якщо інтерференція евольвентних профілів виникне у верстатному зачепленні, тобто при нарізуванні зубчастого колеса, то, очевидно, що профіль зубців інструментального колеса (довбача, рейки або фрези) ніяк не постраждає, а профіль зуба заготовки в місцях інтерференції буде зрізаний. Евольвентний зуб нарізованого колеса при цьому буде, як прийнято говорити, підрізаний (рис. 4.19). У колеса з зовнішніми зубцями підрізом вважається не просто розширена форма западини між сусідніми зубцями, а саме видалена в зонах C і D частина евольвентного профілю на ділянці KM .

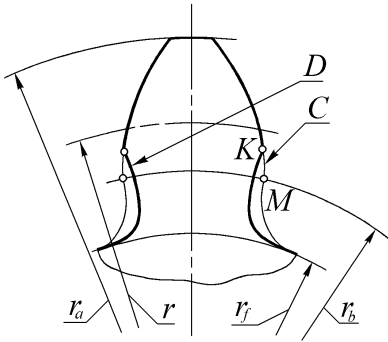


Рис. 4.19. Підрізаний евольвентний зуб

Підріз зубців небезпечний, тому що, по-перше, різко знижує згинну міцність зуба, а по-друге, може призвести до неприпустимого зменшення коефіцієнта перекриття ϵ .

У колеса з внутрішніми зубцями через інтерференцію евольвентних профілів інструментально-го колеса і заготовки будуть зрізатися зубці на їх вершинах.

Причому, навіть незначне зрізання вершин внутрішніх зубців може ушкодити евольвентний профіль на великій висоті, що призведе

до порушення спряженості профілів у робочому внутрішньому зачепленні.

4. Мінімальне число зубців z_{min}

Як уже говорилося вище, у зовнішньому зачепленні зі зниженням числа зубців малого колеса 1 точка N_1 початку теоретичної ділянки лінії зачеплення небезпечно наближається до точки A робочої ділянки AB лінії зачеплення.

При деякому мінімальному числі зубців z_{min} точка N_1 прийде в точку A .

Якщо і далі зменшувати z_1 малого колеса, тоді N_1 перейде за точку A усередину робочої ділянки лінії зачеплення. При цьому виникне інтерференція евольвентних профілів, а при нарізуванні такого колеса - підріз зубців.

Визначимо z_{min} при нарізуванні колеса зубостругальною рейкою (гребінкою), що має початковий виробляючий контур (рис. 4.14).

На рис. 4.20 показане верстатне зачеплення зубців рейки з зубцями коліс:

- 1) $z' > z_{min}$;
- 2) $z = z_{min}$;
- 3) $z'' < z_{min}$.

Колеса з числами зубців z' і z - не будуть мати підрізу зубців, а колесо з числом зубців z'' - буде мати підріз зубців, тому що в колеса з числом зубців $z'' < z_{min}$ початок теоретичної ділянки лінії зачеплення (точка N_1'') лежить вище точки A - початку робочої ділянки лінії зачеплення.

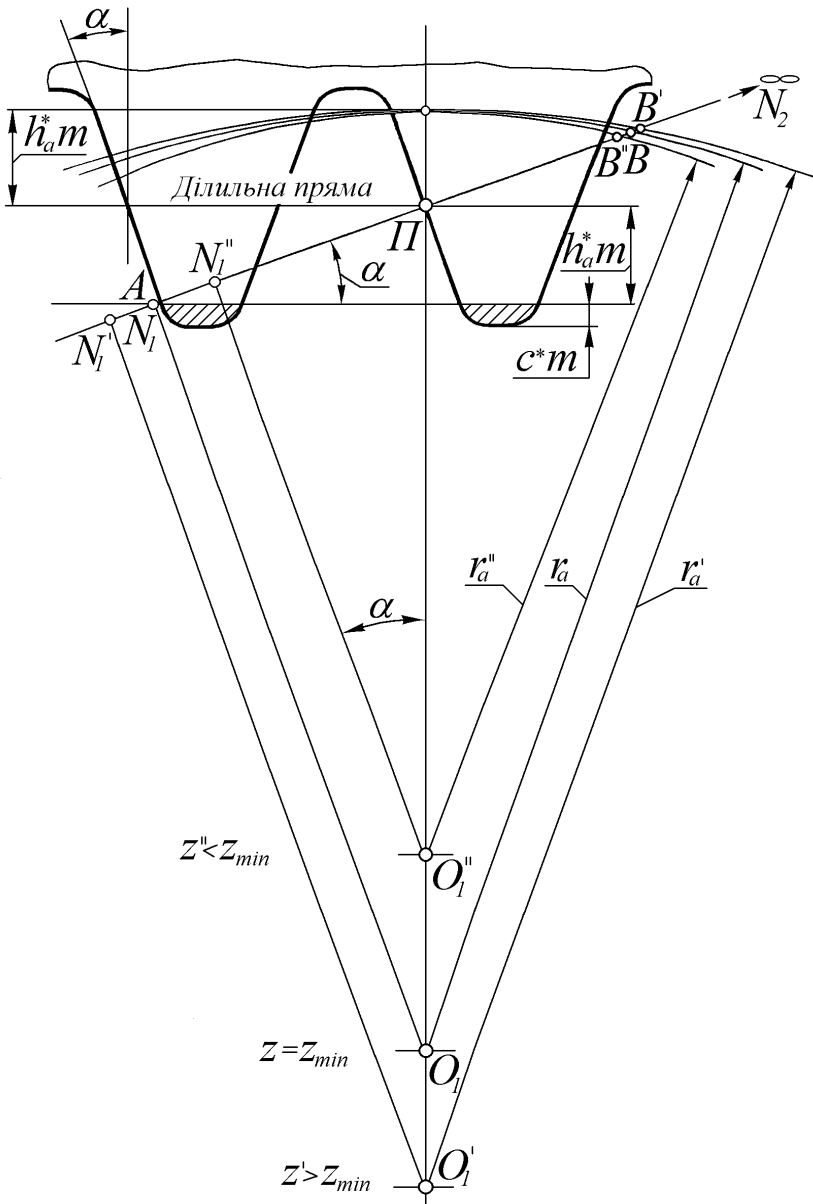


Рис. 4.20. До визначення мінімального числа евольвентних зубців z_{min}

Точка A утворюється пересіченням умовної граничної лінії вершин зубців рейки (без заштрихованих частин) із лінією зачеплення.

Заштриховані частини вершин зубців рейки не враховуються, тому що вони не беруть участь у нарізуванні евольвентних профілів нарізуваних коліс, а лише формують перехідну криву між евольвентами сусідніх зубців.

Знайдемо величину z_{min} .

З рисунка слідує, що:

$$O_1P = r_1 = \frac{1}{2} m z_{min};$$

$$O_1P \cdot \sin \alpha = AP;$$

$$AP \cdot \sin \alpha = h_a^* \cdot m.$$

Звідси знайдемо

$$z_{min} = \frac{2h_a^*}{\sin^2 \alpha}. \quad (4.30)$$

З формули (4.30) слідує, що z_{min} залежить від вибору величин h_a^* і α .

5. Вибір профільного кута початкового контура

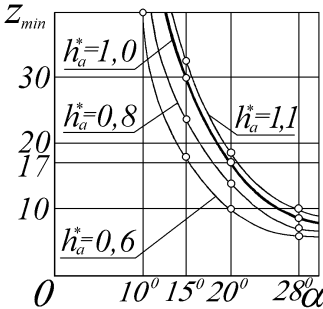


Рис. 4.21. Залежність z_{min} від α при різних h_a^*

При стандартних значеннях

$$h_a^* = 1,0 \text{ і } \alpha = 20^\circ \text{ отримаємо}$$

$$z_{min} = 17,1 \approx 17.$$

На рис. 4.21 показані графіки залежностей z_{min} від профільного кута α при фіксованих значеннях $h_a^* = 1,1; 1,0; 0,8; 0,6$.

Л. Ейлер, який розробив евольвентне зачеплення в 18-му сторіччі, запропонував до використання значення $\alpha = 15^\circ$.

При $h_a^* = 1,0$ і $\alpha = 15^\circ$ вишло $z_{min} = 30$.

Біля 200 років із цим мирилися, тому що питання зменшення габаритів передач не виникало через відсутність масового виробництва машин.

При переході до масового виробництва машин, виявилося, що $z_{min} = 30$ стало надмірною платою за шанування наукового авторитету Л. Ейлера.

Адже розмір зубця залежить від переданого навантаження, а число зубців мінімального колеса визначає габаритні розміри і, у кінцевому рахунку, масу передачі.

Зменшення числа z_{min} стало насущною задачею.

До виробництва було прийняте зачеплення з профільним кутом $\alpha = 28^0$.

Це знизило z_{min} до 9 зубців (при $h_a^* = 1,0$) і забезпечило більш ніж триразове зменшення габаритів передач.

Проте, при цьому появилися і шкідливі наслідки.

Зубці при $\alpha = 28^0$ мали більш загострені вершини, що у випадку об'ємного загартування призводило до крихкого сколювання вершин зубців, особливо при ударному характері входу в зачеплення.

Застосування ж у цьому випадку укорочених зубців із збільшеною товщиною зуба на вершині могло дати неприпустиме зниження коефіцієнта преркриття зачеплення.

Крім того, різко зросли розпірні сили в зачепленні, що буде показано нижче.

У кінцевому рахунку пошук найбільш вигідного з усіх точок зору профільного кута α завершився в даний час вибором стандартної величини $\alpha = 20^0$.

Нагадаємо, що при цьому $z_{min} = 17$.

При необхідності зменшити z_{min} у даний час застосовують або укорочені зубці ($h_a^* = 0,8$ або $h_a^* = 0,6$ і ін.), або нарізування коліс із $z < 17$ зі зсувом стандартного ріжучого інструмента.

Останнє означає, що процес нарізування колеса зупиняють заздалегідь, не доводячи справу до підрізу евольвентного профілю.

6. Контрольні запитання

1. Зобразіть відомий Вам початковий контур евольвентного зачеплення.
2. Зобразіть відомий Вам початковий виробляючий контур евольвентного зачеплення.
3. Охарактеризуйте існуючі методи нарізування евольвентних зубчастих коліс.
4. Які зубонарізні інструменти Ви знаєте?
5. Що таке підріз евольвентних профілів?
6. Що таке мінімальне число евольвентних зубців? Як його визначити?
7. Чому профільний кут сучасного евольвентного зачеплення дорівнює 20^0 ? Які значення цього кута застосовувалися раніше? Чому від них відмовилися?