

ЦИКЛОИДИТЕ И ТЯХНОТО ПРИЛОЖЕНИЕ В ПЛАНЕТНИТЕ ПРЕДАВКИ

проф. д-р инж. Радостин Долчинков
Бургаски свободен университет

CYCLOID AND THEIR APPLICATION IN PLANETARY GEAR

Prof. Radostin Dolchinkov, PhD
Burgas Free University

Abstract: *This article provides an overview of planetary gears that are more widely used based on its many advantages, such as compactness, superimposing speed and torque opportunity to branch power, higher gear ratios of the same volume. Used as gears for gearboxes, motors and flywheels.*

Key words: *planetary gears, gearboxes, motors, flywheels*

Планетните предавки, намират все по-широко приложение въз основа на многото си предимства, като компактност, наслагване на обороти и въртящи моменти, възможност за разклоняване на мощността, по-високи предавателни числа на предавката при еднакъв обем. Използват се като предавки за редуктори, хидромотори и маховици. Позволяват да се осъществи сложно движение, което осигурява широкото им използване в металорежещите машини, в приборостроенето, в задвижванията с регулируема скорост. Те се произвеждат серийно и от части са стандартизирани. Не толкова познати са обаче многостранните приложения на принципа на планетните предавки с използване на циклоидите, при технологиите за обработка и преработка, планетно валцовани изделия, технология за заплитане на хлабави телени възжета, като бутална предавка, регулируема по време на движение, както и като част от транспортни устатановки за изделия при автоматични производствени линии.

Настоящият доклад прави преглед на това разнообразие въз основа на избрани примери от практиката.

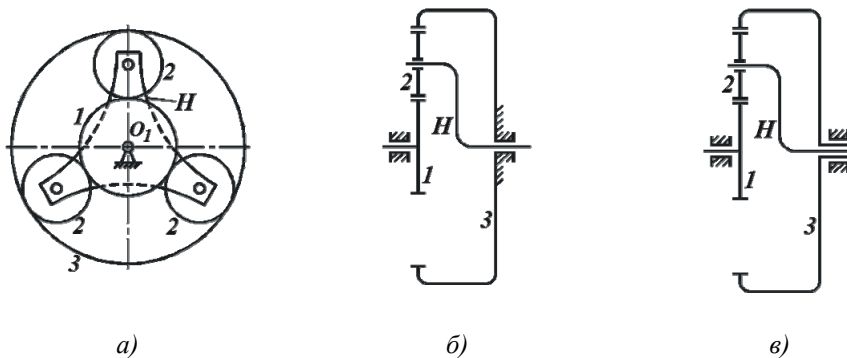
Механизми съставени от зъбни или фрикционни колела, в които геометричната ос на едно от колелата е подвижна, се наричат планетни механизми. Планетните механизми могат да имат една (фиг.1.б), две (фиг.1.в) или повече степени на свобода. Планетните механизми с две и повече степени на свобода се наричат още *диференциални*. Зацепването на зъбните колела е еволвентно.

Циклоидата предлага в сравнение с еволвентата едно особено широко поле от вариационни възможности. В цялото множество циклоидите не могат да поставят под въпрос мястото заемано от еволвентата, но са по-подходящи за решаването на определени задачи.

Известният съветски учен Ф.Л.Литвин в своя фундаменталния си труд казва, че причината за използването на циклоидното зацепване вместо еволвентното се крие в

специфичните условия на работа на зъбните механизми, при които циклоидните предавки имат следните предимства:

- по-добри условия за предаване на силите в ускорителните предавки;
- по-малко износване на циклоидните профили при недостатъчно смазване;
- по-голям коефициент на челно препокриване;
- възможност за използване на зъбни колела с малък брой зъби.



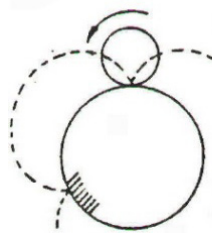
Фиг. 1. Планетни зъбни механизми с една (а,б) и с две степени на свобода - в

Зъбните форми на циклоидните зацепвания се образуват от циклични криви или техните еквидали.

Цикличните криви се образуват при отъркаването на един кръг (**въртящ се кръг**) по друг кръг (**основен кръг**), във един друг кръг или около друг кръг.

В резултат на тези движения се получават различни циклоиди:

Епициклоида – крива, описана от една точка на въртящ се кръг, отъркаваща външно един основен кръг (фиг.2.а).



а/ епициклоида



б/ хипоциклоида



в/ перициклоида

Фиг. 2.1. Видове циклоиди

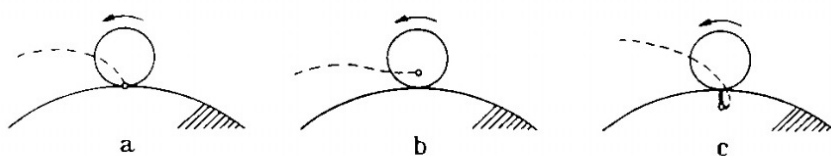
Хипоциклоида – крива, описана от една точка на въртящ се кръг, отъркаващ отвътре един неподвижен кръг (фиг. 2.б).

Перициклоида – крива, описана от една точка на въртящ се кръг, който външно отъркава един основен кръг, като при това основния кръг лежи отвътре на въртящия се кръг (фиг.2.в).

Когато радиусът на основния или въртящият кръг клони към безкрайност се получават специални случаи на профилните форми на епициклоидата.

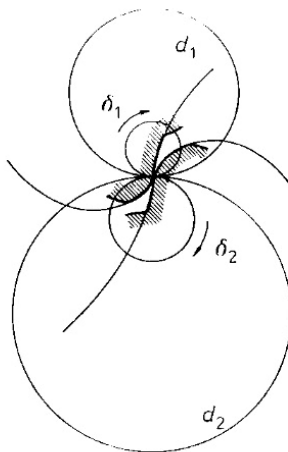
Ортоциклоида – крива, описана от една точка на въртящия кръг отъркалващ един основен кръг, при който радиусът му клони към (безкрайност) въртящия се кръг отъркалва една права.

Ако образуващата точка се намира върху обиколката на въртящия се кръг се получава **обикновена** или **нормална** циклоида. В литературата тази крива се среща с определенията: заострена, чиста или проста циклоида, фиг.2.а. Намиращата се вътре във въртящия се кръг образуващата точка образува **скъсена циклоида**, фиг.2.б. Ако образуващата точка се намира извън въртящия се кръг, се образува **удължена циклоида**, фиг.2.в.



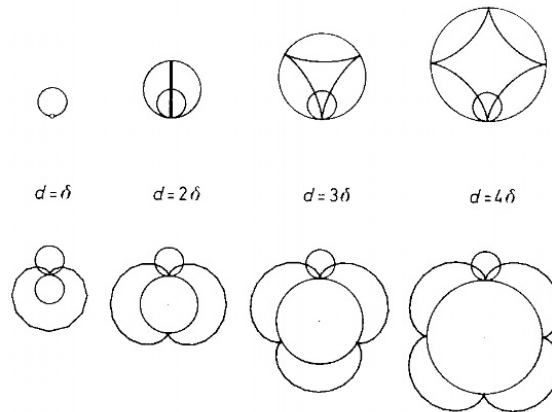
Фиг. 2. Циклоиди: а/ Обикновена б/ Скъсена в/ Удължена

За формиране на зъбни профили и реализиране на зацепване е необходимо да се отъркалват две свободно избираеми ролкови окръжности δ_1 и δ_2 върху основните окръжности d_1 или d_2 (фиг. 3). Лежащата вътре окръжност формира основата на зъба като част от хипоциклоида, а външната – главата като част от епициклоида. За предавката, двете основни окръжности са начални.



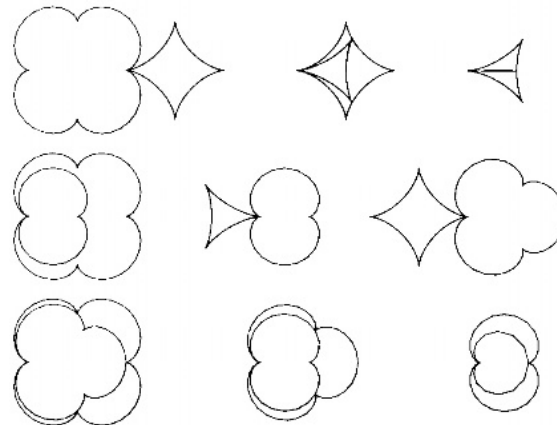
Фиг. 3. Формиране на циклоиден профил при циклоидно зацепване

Първото важно условие за да се осъществи зацепване е циклоидните криви да бъдат затворени, което се получава при положение, че отношението между диаметрите на основната и ролковата окръжност е цяло число (1, 2, 3, ...) – фиг. 4.



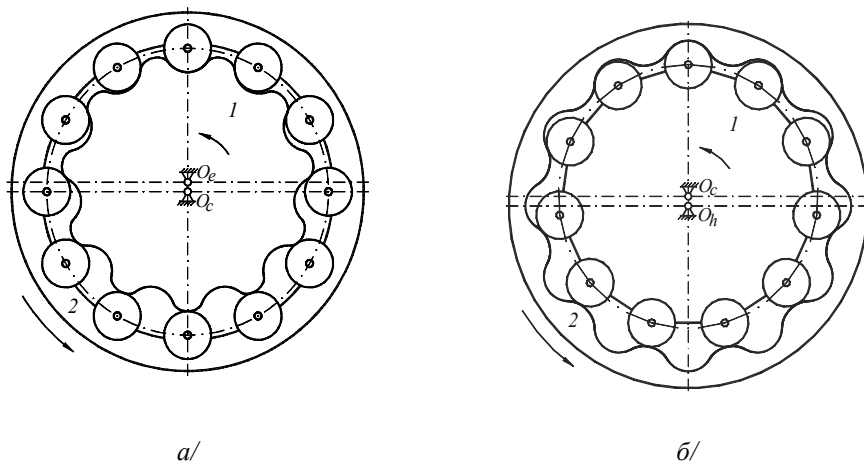
Фиг. 4. Зъбни форми получени от обикновени циклоиди

Затворените епи- или хипоциклоиди може да се използват за формиране на зъбни профили по цялата си дължина. Всяка циклоида може да се отъркалва (зацепва) в произволно съчетание (епи- с епи-, епи- с хипо-, хипо- с хипо-). Възможни са съчетания и на техните еквилистантни криви. Някои такива съчетания получени на основата на фиг. 4. са представени на фиг. 5.



Фиг. 5. Възможни съчетания при циклоидни двойки (зацепвания)

Цевно-еписиклоидната и цевно-хипоциклоидната зъбни предавки са добре познати. Първата се състои от еписиклоидно зъбно колело с външни зъби и цевно колело с вътрешни „зъби“, фиг.6.а. Втората се състои от хипоциклоидно зъбно колело с вътрешни зъби и цевно колело с външни „зъби“, фиг. 6.б. Цевните колела от тези зъбни предавки имат съставна конструкция.

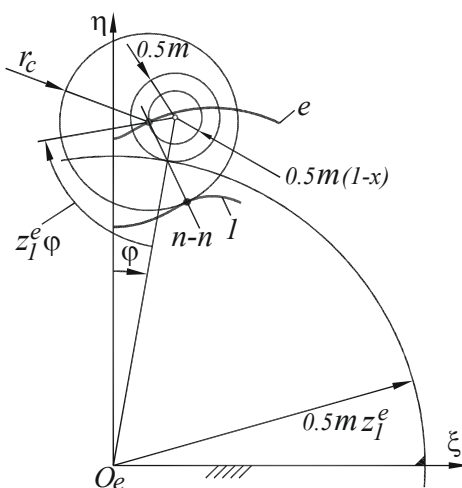


Фиг. 6. Цевно - епициклоидна и цевно - хипоциклоидна предавки

Центровата крива на цевките на цевното колело 2 в равнината на епициклоидното колело 1 от цевно-епициклоидната предавка представлява скъсена епициклоида (фиг. 7.) с параметрични уравнения:

$$(1) \quad \begin{aligned} \xi_{1c}^e(\varphi) &= \frac{m}{2} \left((z_1^e + 1) \sin \varphi - (1-x) \sin((z_1^e + 1)\varphi) \right), \\ \eta_{1c}^e(\varphi) &= \frac{m}{2} \left((z_1^e + 1) \cos \varphi - (1-x) \cos((z_1^e + 1)\varphi) \right), \end{aligned}$$

където m , z_1^e и x са съответно модул, брой на зъбите и коефициент на корекция на епициклоидното колело, а параметърът φ се изменя в интервала $[0, \pi/z_1^e]$.

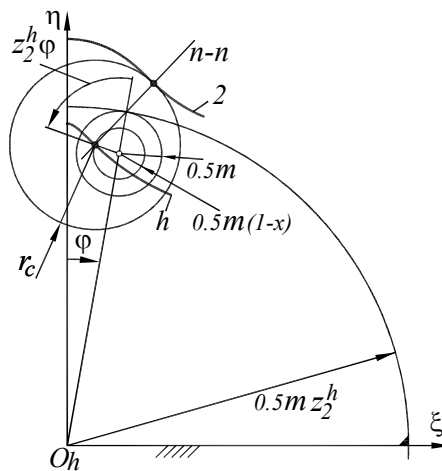


Фиг. 7. Получаване на профила на зъба на епициклоидното колело

Центровата крива на цевките на цевното колело 1 в равнината на хипоциклоидното колело 2 от цевно-хипоциклоидната предавка представлява скъсена хипоциклоида (фиг. 8.) с параметрични уравнения:

$$(2) \quad \begin{aligned} \xi_{2c}^h(\varphi) &= \frac{m}{2} \left((z_2^h - 1) \sin \varphi - (1-x) \sin((z_2^h - 1)\varphi) \right), \\ \eta_{2c}^h(\varphi) &= \frac{m}{2} \left((z_2^h - 1) \cos \varphi + (1-x) \cos((z_2^h - 1)\varphi) \right), \end{aligned}$$

където m , z_2^h и x са съответно модул, брой на зъбите и коефициент на корекция на хипоциклоидното колело, а параметърът φ се изменя в интервала $[0, \pi/z_2^h]$.



Фиг. 8. Получаване на профила на зъба на хипоциклоидното колело

Уравненията на профила на зъба на епициклоидното колело, явяващ се еквилидтантна крива на скъсената епициклоида (1), са:

$$(3) \quad \begin{aligned} \xi_1^e(\varphi) &= \xi_{1c}^e + r_c \frac{(1-x) \sin((z_1^e + 1)\varphi) - \sin \varphi}{\sqrt{1 - 2(1-x) \cos(z_1^e \varphi) + (1-x)^2}}, \\ \eta_1^e(\varphi) &= \eta_{1c}^e + r_c \frac{(1-x) \cos((z_1^e + 1)\varphi) - \cos \varphi}{\sqrt{1 - 2(1-x) \cos(z_1^e \varphi) + (1-x)^2}}, \end{aligned}$$

където $r_c = m r_c^*$ – радиус на формообразуващата окръжност (равен на радиуса на цевката);

r_c^* – коефициент на радиуса на формообразуващата окръжност.

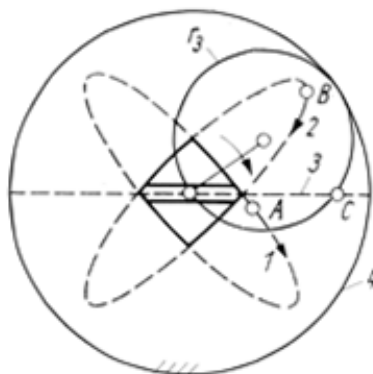
Уравненията на профила на зъба на хипоциклоидното колело, явяващ се еквилидтантна крива на скъсената хипоциклоида (2), са:

$$\xi_2^h(\varphi) = \xi_{2c}^h + r_c \frac{(1-x)\sin((z_2^h-1)\varphi) + \sin\varphi}{\sqrt{1-2(1-x)\cos(z_2^h\varphi) + (1-x)^2}},$$

$$(4) \quad \eta_2^h(\varphi) = \eta_{2c}^h + r_c \frac{-(1-x)\cos((z_2^h-1)\varphi) + \cos\varphi}{\sqrt{1-2(1-x)\cos(z_2^h\varphi) + (1-x)^2}}.$$

Приложение на циклоидите

Все повече се прилага многокантовото струговане като икономически изгоден работен метод. Колкото повече повърхности трябва да се обработват върху една заготовка, толкова по-ясни стават предимствата на многокантовите стругове. Така например могат да се извършват всички работни ходове непрекъснато при производството на прът с четири ръба и улей като например за водно кранче /на фиг. 9. – силно разтеглено изображение/.

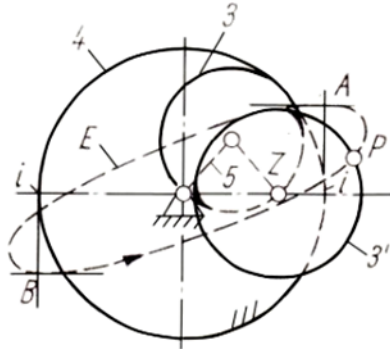


Фиг. 9. Принцип на струговане на многостени с помощта на двойка карданни кръгове

Тук принципът на планетната предавка намира приложение като двойка карданни кръгове ($r_3/r_4=1:2$). Към планетното колело r_3 са закрепени три стругарски ножа А, В и С, които едновременно описват три различни орбити: елипса 1 и 2 и права 3. Закръглеността на страничните повърхности на четиристена може да бъде така настроено, че то да е в рамките на допустимия толеранс на съответстващия ключ. Често подобно опростяване е предимство при употребата на многостени. Така например при болтове и гайки се увеличава контактната повърхност с ключа и по този начин се намалява рискът за смачкване на ръбовете. По подобен начин се обработват шестограми и коронни гайки с канали, едновременно със струговането.

Освен това тези машини служат за производство на четиристени върху дръжки на инструменти, при едновременна обработка на два тристена и др.

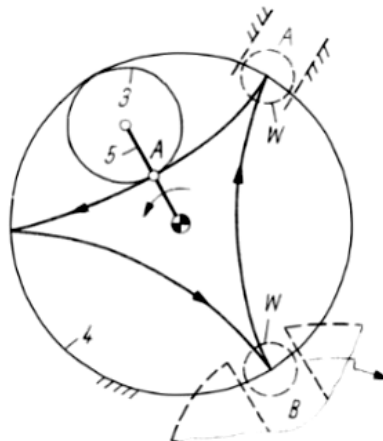
На принципа на двойката карданни кръгове се базира и механизмът на фиг. 10., който служи за свързването на двата края на ремък, лента или фолио с помощта на леплива лента.



Фиг. 10. Двойка карданни кръгове със специална елипса за устройство за лепене на ленти

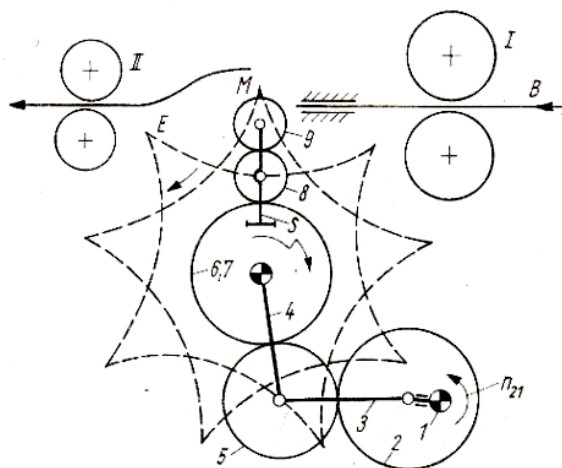
Към планетното колело 3 е свързан цилиндър (или шайба) 3' и то така, че центърът му z се движи по правата линия $i-i$, а точка P описва елипсата E . В отсечката A 3' поема единия край на лентата е лепливата лента, довежда ги до отсечка B и там ги залепва с другия край на лентата. Важно в случая е, срещулежащите точки на хоризонталното движение на шайбата 3' ($i-i$) /тангентите към орбитата на точка P /също да са хоризонтални (респективно успоредни към $i-i$) – точки A и B от елипсата.

При автоматична подаваща система на някои от струговете съществува тривъхова хипоциклоидна крива ($r_3/r_4=1:3$), фиг. 11. По този начин при обработка на валобразни заготовки w същите винаги поемат в точка A , в точно дефинирано положение, транспортират се така и накрая се оставят в точка B .



Фиг. 11. ПП като установка за транспортиране на заготовки

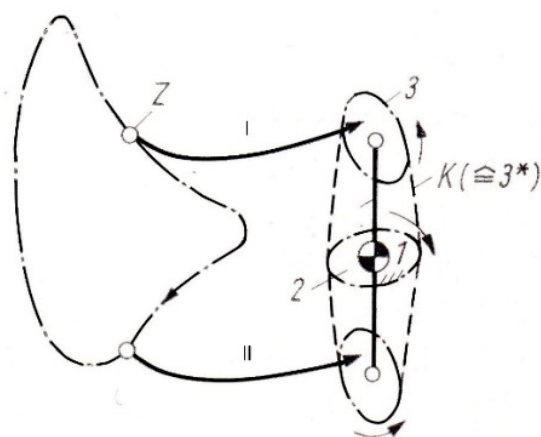
На фиг. 12. е представена комбинация между съединителна предавка с три колела 1, 2, 3, 4, 5 и 6 от една страна и планетна предавка (епициклоидна предавка) 6, 7, 8 и 9 от друга страна.



Фиг. 12. Схема на предавка на устройство за рязане на хартия /циклоидна орбита; наслагване на зъбно-съединителна предавка и планетна предавка/

Тази комбинация служи за разрязване на хартиени рола. Задвижването на съединителната предавка с три колела е равномерно въртене n_{21} , което води до неравномерното въртене на отвеждащото колело 6. Двете колела 8 и 9 са твърдо свързани с 6 чрез лоста S, при което 8 се търкаля по колело 7 ($r_6=r_7$), което има точно определено място. Към колело 9 е закрепен нож M, който описва циклоидна крива с 9 върха на всеки две обиколки на колело 6 (лост S). По този начин се извършва отрязването на непрекъснато подаваната лента B, а при следващата обиколка (циклоиден връх E) се подхваща новото начало на лентата за въвеждане във валовата двойка II.

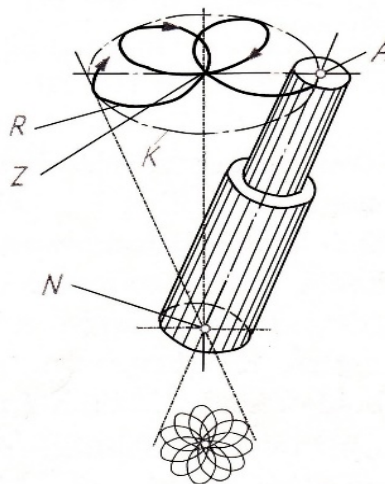
Принципът на планетната предавка намира приложение и с некръгли колела, което е показано на фиг. 13.



Фиг. 13. Планетна предавка с некръгли колела (селскостопанска техника)

Елиптичните колела 3, задвижвани от лост 5 с n_{21} са свързани чрез верига К с неподвижното елиптично колело 2. Върховете z на колелата 3 тук представляват транспортните зъбци на селскостопанска автоматично натоварваща машина. Те описват начертаната циклоидна крива. Формата на циклоидата е следствие на извикванията за възможно най-голям вертикален обхват и за избягване на взаимно повлияване на двете редици зъбци I и II.

На принципа на планетните предавки (фиг. 14.) се основава един нов метод за нитоване, наречен метод на радиалното нитоване.

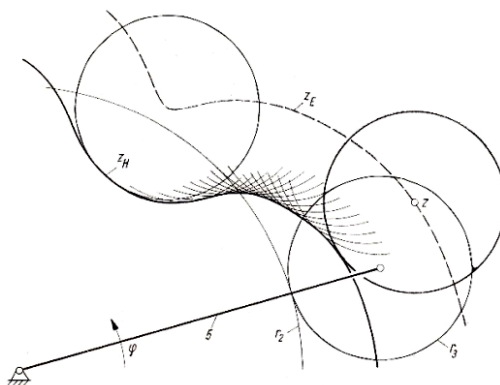


Фиг. 14. Принцип на въртеливото занитване

Той е предзначен за висококачествени свързвания. Оста AN на нитовата матрица описва циклоидно движение R във форма на розетка в рамките на окръжността K. Движението R преминава постоянно през центъра Z. Движението на матрицата по оста става пневматично или хидравлично. При този метод нитовете променят формата си в три посоки: радиално навън, радиално навътре и наслоени тангенциално, при което почти няма структурни промени. Една крачка напред по отношение на този метод, преди всичко заради обезшумяването, е така нареченото „безшумно нитоване“. При него главите на нитовете се получават не с удар, а с триене и натиск. Движението на патрона на нитачката както при радиалните нитове е във форма на розетка.

Върху същата форма на движение се базира и едно полско нововъведение за шампово коване с въртелива щампа. Фактът, че тук се деформира само част от повърхността на заготовката, допринася за по-добър външен вид, води до по-малки деформиращи усилия, както и до възможността за обработка на тънки части.

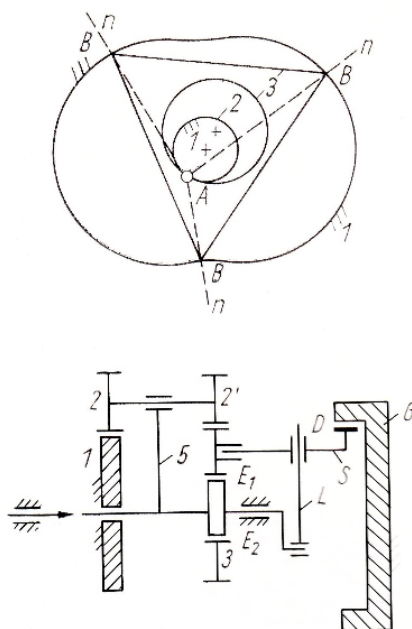
На фиг.15. точката z на планетно колело r_3 описва епициклоида z_E при търкалянето на неподвижния търкалящ кръг r_2 .



Фиг. 15. Принципът на ПП за фрезование на ексцентрикова шайба на сусло-предавка

Ако на планетното колело g_3 се закрепя фрезер (чийто център съвпада с z), тогава обработваната повърхност представлява обвивната крива z_H към циклоидата z_E . Тази обвивна крива z_H съответства на формата на ексцентричната шайба, а фрезата на диаметъра на външната ролка на Сусло-предавката на фиг. 3а. Принципът на ПП на фиг. 14. по тази причина се ползва при производството на ексцентрикови шайби за Сусло-предавки. По този начин епициклоидната предавка от фиг. 15. представлява кинематично обръщане на ползвания в сусло-предавките перициклоиден принцип.

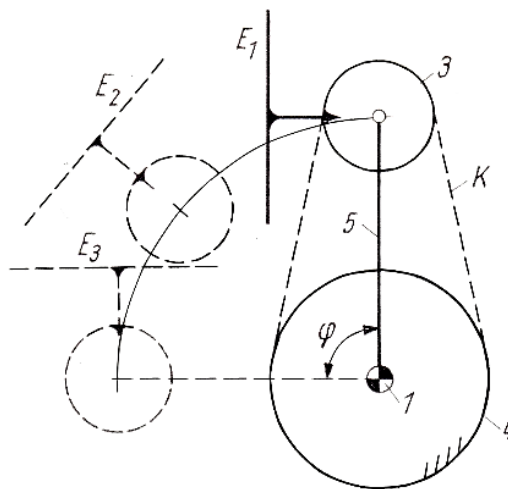
Известно е, че кожухът (горивната камера) на Ванкеловия двигател също представлява една перициклоида, виж фиг. 16.а.



Фиг. 16. Планетна предавка за фрезование на кожуси на ванкелови двигатели
а/ кинематичен принцип; б/ схема на предавката

Обработката на тези горивни камери изисква специални методи. В основата на принципа на трохоидната шлифовъчна машина на една американска фирма лежи практически обръщането на процеса в двигателя. Кожухът на двигателя 1, сравни с фиг. 16.а, се върти около стационарната шлифовъчна шайба (съответстваща на ротор 3), чиято вървна точка В описва трохоидната крива на горивната камера.

За икономичното производство на горивни камери на големи серии в се прилага многоточков работен метод, при който заготовката е неподвижна, а инструментът (стругарски нож) извършва необходимото движение. Методът се основава на кинематичния факт, че съединителната линия между контактната точка А, фиг. 16.а, на вътрешно назъбеното роторно колело 3 с външноназъбеното и неподвижно в кожуха колело 1 и допирната точка В на ротора 3 и кожуха винаги представлява нормала към орбиталната тангента. Това се използва за направляването на три държача на инструменти D (на фиг. 16. б. е представен само един). Всяко изместване на резаца S в посока на орбиталната нормала така възпроизвежда математическо точно равноотстояние към трохоидата. Фиг. 16. б. показва принципа на предавката (за разлика от фиг. 16.а., тук изпълнението е с външноназъбени колела) за задвижване и направляване на стругарския нож D. Чрез задвижването на лост 5 колело 2 се търкаля по 1. Същевременно колело 2' е във връзка с колело 3, лагеровано върху ексцентрика E_1 и свободно се върти. Закрепеният в 3 стругарски нож D при това положение описва трохоидна крива (тук тя е епиклоида), като през цялото време той се поддържа от ексцентрика (коляно) E_2 и плъзгача L, винаги в посока на орбиталната нормала (AB на фиг. 16.а) на трохоидата.



Фиг. 17. Схема на предавка на чертожна машина (равнинно водене на чертожната дъска E)

Освен използването на отделни точки на планетното колело и техните циклоидни орбити, приложение намират и много точки на планетното колело (които представляват равнина) за определени движения на равнини.

При въртенето на лост 5 около ъгъл φ чертожната дъска заема положения E_1 , E_2 и E_3 . ШП 1, 3, 4, 5, K с $r_3/r_4=1:2$ и веригата K съответства кинематически на особено конструктивно изпълнение на двойката карданни окръжности. Всички точки на работната маса E описват елипси.

В сравнение с неподвижните предавки, планетните предавки притежават много кинематични свойства, които правят възможно прилагането им в различни клонове на индустрията.

Така например чрез специални конструктивни изпълнения се постигат много високи предавателни отношения, докато от друга страна ниските предавателни числа се отразяват благоприятно при употребата на хидравлични помпи. Някои преработвателни технологии са рентабилни само чрез ползването на принципа на ПП (ванкелови двигатели, струговане на многостени), други подобряват качеството (въртеливо занитване, преработка на пластмасови суровини).

Литература:

1. Kaufmann, E.: Hochübersetzende Getriebe. Antriebstechnik 12 (1973) 3, S. 81—84.
2. Neumann, R.: Das Harmonic-Drive-Getriebe und seine Anwendungen. KDT-Vortrag 1973 (unveröffentlicht).
3. Prospekte der Fa. CYCLO-Getriebebau, Lorenz Braren KG/BRD.
4. Duditz, Fl.; Miloiu Gh.: Transmisie mecanice moderne. Moderne mechanische Übersetzungen (rumänisch). Bukarest, Editura Technica 1971, S. 158-170.
5. Prospekt: Mehrkantdrehmaschine TORNOMAT 2 der Fa. Hahn & Kolb, Stuttgart (BRD).
6. Neumann, R.: Umlaufrädergetriebe in Textilmaschinen. Deutsche Textiltechnik 15 (1995)
7. Kurth, D., u.a.: Möglichkeiten zur Leistungssteigerung von Beschichtungsanlagen durch Planetenwalzen-Extruder. Kunststoffe 64 (1994) 11, S. 626.
8. Schumann, R.: Traction Fluids. Antriebstechnik 13 (1994) 11, g 629
9. Долчинков, Р., Практическо/техническо/ приложение на планетни предавки, Национална конференция по машиностроене и машинознание, МДУ „Ф.Ж.Кюри“, Варна, 8-9 септември 2015.
10. Долчинков, Р., Анализ на зъбни механизми с подвижни оси, Международна научна конференция “70 години МТФ, Созопол, 2015.