

9.4 Формоутворення зубів відрізних пил з нерівномірним кроком дисковими обкатними фрезами

Теорія формоутворення поверхонь при механічній обробці була заснована член-кореспондентом НАН України, професором Родіним Петром Родіоновичем та розвинена його послідовниками, викладалась у багатьох підручних [531, 532, 533]. При обробці поверхні будь якої деталі інструмент, закріплений на верстаті рухається. Також в процесі обробки може рухатися і деталь. В результаті цих рухів відносно заготовки інструмент своїми робочими елементами дотикається до матеріалу деталі та утворює потрібну форму і розмір виробу. Тому форма обробленої поверхні визначатиметься формою та розмірами елементів інструмента та його рухами відносно заготовки [531, 533]. Але обробка заданої поверхні деталі не завжди можлива у точній відповідності до креслення. Будь який верстат має кінематичну схему, яка дозволяє рухатись інструменту і деталі в визначених напрямках. Тому мають місце випадки, коли неможливо взагалі обробити задану поверхню на вибраному обладнанні, тобто при вибраній кінематичній схемі обробки. В цих випадках при обробці заданої деталі відбувається зрізання частини матеріалу деталі, або навпаки, коли частина припуску залишається незрізаною [531, 533]. Саме завдяки теорії формоутворення деталей при механічній обробці можуть бути виявлені причини відхилень обробленої поверхні деталі від її заданих розмірів. Також ця теорія дозволяє з'ясувати, за яких значень відхилень немає або вони знаходяться у допустимих межах.

Щоб визначити можливість утворення поверхні деталі перш за все потрібно знати рухи, які здійснюються інструментом і заготовкою. Аналізуючи процес формоутворення поверхні деталі, необхідно розглянути рух поверхні деталі відносно інструменту при обробленні. Наступною задачею є визначення вихідної інструментальної поверхні, яка спряжена з поверхнею деталі при заданій кінематичній схемі обробки, тобто при певних рухах заготовки та інструменту. Обробка деталі відбувається різальними кромками інструменту. У

загальному випадку різальні кромки інструмента можуть мати профілюючі та непрофілюючі ділянки. Поверхню, на якій можуть розташовуватися профілюючі ділянки різальних кромок, називають вихідною інструментальною поверхнею [531, 533]. Щоб обробка деталі відбувалась вихідна інструментальна поверхня та поверхня заготовки мають торкатися одна одної. Способи утворення та визначення вихідної інструментальної поверхні розглянуто в підручниках по теорії формоутворення [531, 533]. Вважається також, що в процесі обробки повністю відтворюється вихідна інструментальна поверхня.

В теорії формоутворення відомі три умови, при яких задана поверхня буде оброблена відповідно до креслення.

Першою необхідною умовою утворення поверхні деталі є умова існування вихідної інструментальної поверхні. В процесі обробки поверхні деталі в кожній точці цієї поверхні повинно виконуватися рівняння контакту: $\vec{N} \cdot \vec{V} = 0$, де $\vec{N}$ - вектор нормалі до поверхні деталі, а $\vec{V}$ швидкість сумарного руху деталі відносно інструменту. Оскільки форма оброблюваної поверхні є відомою, тобто напрям вектору нормалі до цієї поверхні є також відомим, то з цього рівняння випливає, що тільки зміною напрямку сумарного вектору швидкості можна витримати першу умову формоутворення. Змінити напрям швидкості можна за рахунок встановлення положення деталі або за рахунок зміни характеру рухів, які здійснюються заготовкою та інструментом. Приклади утворення різних поверхонь при різних рухах інструменту і заготовки розглянути більш детально в літературі по формоутворенню [531, 532, 533].

Наступною, другою умовою формоутворення є умова контакту інструментальної поверхні з оброблюваною поверхнею без проникнення в тіло деталі [531, 533].

Вихідна інструментальна поверхня та поверхня деталі дотикаються одна одної вздовж лінії, яку називають характеристикою [531]. У деяких випадках при проектуванні інструментів немає необхідності у визначенні всієї вихідної інструментальної поверхні тоді для спрощення вирішення задач на практиці

характеристику приймають за різальну кромку або беруть для багатозубого інструменту сукупність характеристик, визначених у різні моменти часу [531].

Як що розглянути взаємне розташування поверхні, яка обмежує тіло деталі і поверхні, обмежуючої вихідне тіло інструмента, дотик цих двох поверхонь може бути внутрішнім та зовнішнім. Як що вихідна інструментальна поверхня, дотична до поверхні деталі, розташована поза тілом деталі то буде присутній зовнішній дотик і, в такому випадку проникнення вихідної інструментальної поверхні в тіло деталі не буде, тобто не буде зрізування частини матеріалу деталі. Поверхня деталі буде сформована відповідно до кресленика. Як що дотик вихідної інструментальної деталі та поверхні деталі буде внутрішнім, вихідна інструментальна поверхня буде проникати в тіло деталі і буде спостерігатися зрізування частини тіла оброблювальної деталі. В цьому випадку частини поверхні деталі в процесі її обробки будуть зрізані, та отримана деталь не буде відповідати кресленику. Таким чином при взаємному проникненні вихідної інструментальної поверхні та поверхні деталі оброблення заданої деталі відповідно до кресленика неможливе.

Згідно теорії формоутворення поверхонь, спряжені поверхні розглядаються в січних площинах де і спостерігається їх контакт[531, 533]. На схемах зображених на рисунку 1 наведені різноманітні види контакту профілів вихідної інструментальної поверхні та поверхні деталі.

Як що профіль вихідної інструментальної поверхні та поверхні деталі випуклі (рис. 1 а), взаємопроникнення спряжених профілів у зоні контакту не буде за будь-яких радіусів кривизни. Якщо випуклий профіль контактує з ввігнутих (рис. 1, б), проникнення спряжених профілів не буде тоді, коли радіус кривизни ввігнутого профілю буде більшим за радіус кривизни випуклого [533].

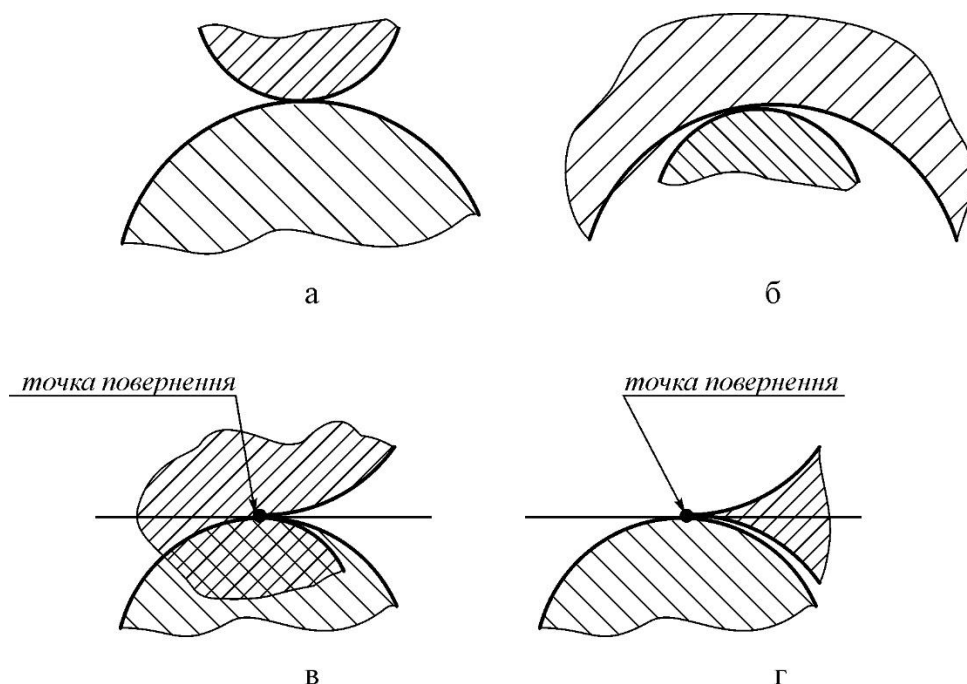


Рисунок 1. Види контакту вихідної інструментальної поверхні та поверхні деталі [533]

Спряжені профілі вихідної інструментальної поверхні та поверхні деталі можуть мати особливі точки — точки повернення, в яких змінюється сторона контакту спряжених профілів (рис. 1, в, г). У цьому випадку практично прийнятий профіль буде обмежений точкою повернення [533].

Також може спостерігатися випадок, коли можливе проникнення вихідної інструментальної поверхні в тіло оброблювальної деталі не в зоні контакту спряжених поверхонь, а на деякій відстані друг від друга, а також при зближенні вихідної інструментальної поверхні та поверхні деталі. Також слід враховувати те, що взаємне розташування вихідної інструментальної поверхні та поверхні деталі в процесі обробки може змінюватись.

Таким чином для того, щоб забезпечити обробку заданої деталі відповідно до кресленика потрібно виконання другої умови формоутворення.

Остання третя умова формоутворення це умова не перетину суміжних ділянок вихідних інструментальних поверхонь [533].

Оброблені поверхні деталі складаються з ряду суміжних ділянок. Наприклад, як що роздивитися відрізу пилу з дрібним зубом прямолінійного

профілю (рис. 2), то поверхня зуба складається з трьох ділянок – дві прямолінійні поверхні зуба (1, 2) та криволінійна поверхні стружкової канавки (3).

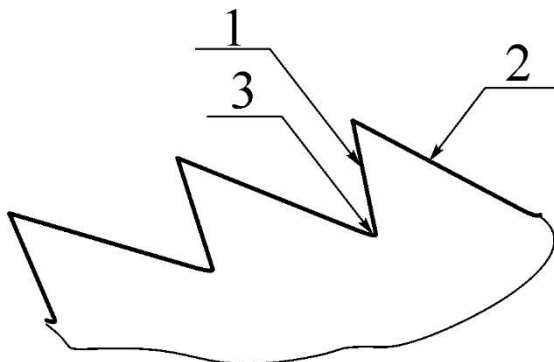


Рисунок 2. Профіль відрізної пили з дрібним зубом

Для того, щоб обробити цей профіль вихідна інструментальна поверхня повинна також складатися з ряду ділянок, спряжених з відповідними поверхнями деталі. Суміжні ділянки вихідної інструментальної поверхні можуть перетинати одна одну (рис. 3, а), торкатися одна одної (рис. 3, б) або знаходитися одна від одної на певній відстані (рис. 3, в) [533].

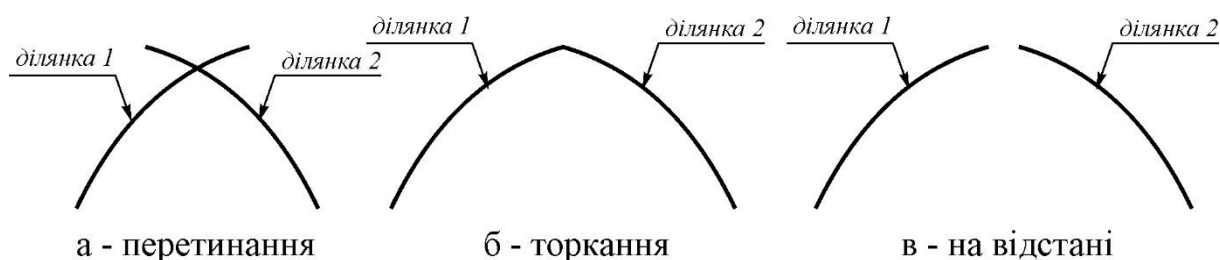


Рисунок 3 – Суміжні ділянки вихідної інструментальної поверхні

Відповідно до положень теорії формоутворення [531, 533], якщо суміжні ділянки вихідної інструментальної поверхні стикаються одна з одною або відстоять одна від одної на певній відстані то при проектуванні інструмента вони можуть бути повністю відтворені [533] та обробка заданої поверхні деталі можлива у відповідності до кресленника.

Коли суміжні ділянки початкової інструментальної поверхні перетинаються одна з одною на різальній частині інструмента практично не можливо повністю відтворити суміжні ділянки початкової інструментальної поверхні [533]. На межі суміжних ділянок деталі утворюватимуться так звані

перехідні поверхні, які створюються граничною лінією перетину суміжних ділянок початкової інструментальної поверхні при її русі щодо заготовки [531, 533]. На перехідних поверхнях спостерігається їх кромкове зіткнення з початковою інструментальною поверхнею.

Слід враховувати, що в деяких випадках фасонні поверхні деталей доцільно формувати граничною лінією перетину суміжних ділянок початкової інструментальної поверхні. Це іноді допомагає при відносно простій формі початкової інструментальної поверхні та граничної лінії перетину суміжних ділянок обробляти складні фасонні поверхні. Цей спосіб часто поєднується з утворенням поверхні деталі початковою інструментальною поверхнею при їх взаємному торканні [533]. Саме цей випадок буде розглянутий далі при розробці інструмента для обробки зубів відрізних пил з дрібним кроком прямолінійного профілю.

Аналіз показує, що задача визначення вихідних інструментальних поверхонь, спряжених з поверхнею деталі, з урахуванням умов формоутворення, має багато допустимих рішень.

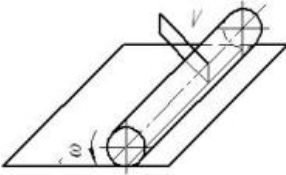
При проектуванні різального інструмента окрім визначення вихідної інструментальної поверхні та знайдення відповідних різальних інструментів, необхідно розглядати різні варіанти рухів поверхні деталі відносно інструменту. Сукупність рухів поверхні деталі відносно інструмента вважатимемо кінематичною схемою формоутворення [533]. Згідно теорії формоутворення немає різниці якими поєднаннями рухів заготовки та інструменту отримано на верстаті відносний рух [531, 533]. Обираючи різні рухи поверхні деталі відносно інструмента при визначенні вихідної поверхні, можна утворювати різні кінематичні схеми формоутворення.

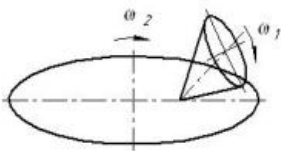
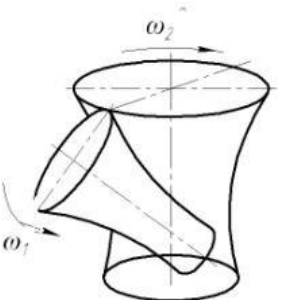
Класифікація принципів схем обробки була розроблена академіком, проф. Г. І. Грановським. Схеми оброблення він назвав кінематичними схемами різання [534]. Вони відображають абсолютні рухи, що надаються у процесі різання механізмом верстата інструменту та оброблюваній заготовці. Рух холостих циклів, під час яких інструмент та заготовка не стикаються один з

одною, принциповими кінематичними схемами різання не виражаються. Всі принципові кінематичні схеми різання, за якими здійснюється обробка різанням, засновані на поєднаннях прямолінійно-поступального та обертального рухів. Кількість рухів, що використовується в кінематичній схемі різання, різниться. Залежно від цього, кінематичні схеми різання класифікуються по групах. Класифікація всіх кінематичних схем різання наведена в [534].

При обробці відрізних пил з дрібним зубом прямолінійного профіля розглянута кінематична схема обробки на зубофрезерном верстаті методом обкатки, що відповідає третьому класу кінематичних схем формоутворення (табл. 1). Кінематичні схеми формоутворення третього класу характеризується тим, що відносний рух поверхні деталі відносно вихідної інструментальної поверхні є миттєвим гвинтовим рухом. До третього класу належать три типи кінематичних схем формоутворення, за яких аксоїди обкочуються один по одному із ковзанням [533, 534].

Таблиця 1. Схеми формоутворення поверхонь третього класу [533]

Клас схеми	Тип схеми	Складові рухи виробу та інструменту, що враховуються при профілюванні	Сумарний миттєвий рух	Представлення відносного руху за допомогою аксоїдів	Ескіз взаємного розташування аксоїдів	Аксоїди
						інструмент виробу
III	1	Обертальний та поступальний, швидкість якого направлена під кутом до осі обертання	Гвинтовий рух	Кочення із ковзанням циліндра по площині		Кільце інструменту Кільце виробу

III	2	Два обертання осей, що схрещуються (кут між однієї з осей обертання та віссю результуючої прямої гвинта. Вісь миттєвого гвинта та вісь обертання – прямі, що перетинаються)	Гвинтовий	Кочення із ковзанням конуса по площині		Конус	Площина
III	3	Два обертання навколо осей, що схрещуються	Гвинтовий	Кочення із ковзанням гіперboloїда по гіперboloїду		Гіперboloїд	Гіперboloїд

Аксоїдами можуть бути циліндр та площина, конус та площина, гіперboloїд та гіперboloїд. У схем третього класу відносний миттєвий гвинтовий рух поверхні деталі відносно вихідної інструментальної поверхні є результатом двох обертань навколо мимобіжних осей.

Згідно положень теорії формоутворення поверхонь обробка зубів пил обкатними фрезами, як вже зазначалося, відноситься до схеми третього класу, яка зводиться до кочення з ковзанням гіперboloїда по гіперboloїду.

Основні положення теорії формоутворення багатозубих виробів до яких відносяться і пили з рівномірним кроком, дисковими обкатними фрезами викладені в роботі [535] на прикладі формоутворення зубів храпових коліс з прямолінійним профілем зубів. В цьому випадку розглядаються неперервні рухи обертання фрези і виробу, кінематично пов'язані один з одним.

При обробці відрізних пил з числом зубів Z , обкатна фреза і заготовка обертаються навколо своїх осей (рис. 4). При повороті на один зуб фрези заготовка пили також повертається на один зуб [536, 537]. Для однозубої фрези одному її оберту відповідає поворот пили на $1/Z$ оберту. Для фрези, що має Z_0 зубів:

$$\frac{\omega}{\omega_{\phi}} = \frac{Z_0}{Z} = U \quad (1)$$

де ω — кутова швидкість обертання заготовки;

ω_{ϕ} — кутова швидкість обертання дискової обкатної фрези.

У відповідності з рівнянням (1), кути повороту обкатної фрези і заготовки пили пов'язані залежністю

$$\frac{\rho}{\rho_{\phi}} = \frac{Z_0}{Z} = U \quad (2)$$

де ρ - кут повороту виробу за певний проміжок часу;

ρ_{ϕ} - кут повороту дискової обкатної фрези, що відповідає повороту пили на кут ρ , за той же проміжок часу.

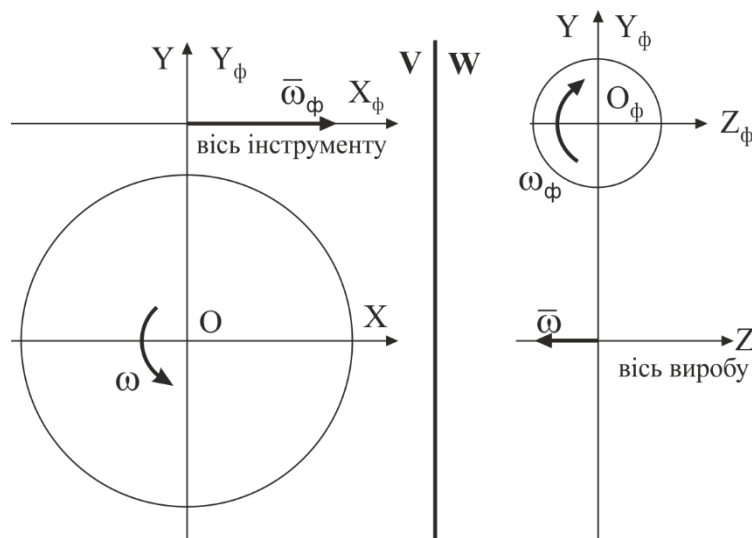


Рисунок 4. Схема обробки багатозубих виробів на зубофрезерному верстаті

Крім обертальних рухів при обробці здійснюється повільний рух подачі, який при обробці прямозубих пил буде прямолінійно-поступальним [536]. Рух подачі призводить до ковзання поверхні виробу "самої по собі" і не впливає на характер контактування вихідної інструментальної поверхні і поверхні виробу.

Проте, як показав аналіз, багатозубі вироби з рівномірним кроком, в тому числі і пили являють собою окремий випадок виробів з нерівномірним кроком.

В основу розробки дискових обкатних фрез покладена теорія формоутворення одного профілю, який в залежності від кількості зубів обкатної фрези рівномірно розташовують по колу.

Для того, щоб отримати нерівномірний крок зубів пили, дискова обкатна фреза проектується також з нерівномірним кроком зубів. Величина нерівномірності кутового кроку зубів дискової обкатної фрези залежить від необхідної нерівномірності кроку зубів виробу. Вважаємо, що пила має чотири зуба у групі, тоді кутові кроки зубів оброблюваного виробу будуть рівними ε_{11} ; ε_{12} ; ε_{13} ; ε_{14} . Відповідно кутові кроки дискової обкатної фрези розраховуються таким чином:

$$\varepsilon_{\phi 1} = \frac{\varepsilon_{11}}{U_{11}}, \varepsilon_{\phi 2} = \frac{\varepsilon_{12}}{U_{12}}, \varepsilon_{\phi 3} = \frac{\varepsilon_{13}}{U_{13}}, \varepsilon_{\phi 4} = \frac{\varepsilon_{14}}{U_{14}} \quad (3)$$

Саме визначення значень кутових кроків покладене в основу вихідних даних для формоутворення дискових обкатних фрез з нерівномірним кроком зубів. При формоутворенні дискових обкатних фрез з нерівномірним кроком розглядається установка осі дискової обкатної фрези нахилена що до осі пили, як загальний випадок обробки.

Дискові обкатні фрези проектуються на основі вихідної інструментальної поверхні з лінійним контактом з поверхнею виробу [531, 533].

При визначенні вихідної інструментальної поверхні розглядається рух відрізної пили відносно інструменту. Як вже згадувалось, два взаємопов'язаних обертання призводять до гвинтового руху [531, 533]. Оброблювальна поверхня пили з прямими зубами обмежується двома площинами, одна з яких є передньою площиною оброблюваного зуба пили, друга площина є потиличною. З точки зору подальшої роботи відрізної пили важливо забезпечити правильну обробку передньої площини і отримати необхідний передній кут γ зубів пили.

Точність обробки потиличної площини допускається менша. Тому при проектуванні дискових обкатних фрез можна наближено визначати профіль фрези, пов'язаний з обробкою потиличної площини. Передню ж площину необхідно сформувати точно. Як було сказано вище, в будь-який момент часу передня площина зуба пили щодо інструменту (дискової обкатної фрези) здійснює миттєвий гвинтовий рух.

Із теорії формоутворення відомо, що при гвинтовому русі площини характеристикою буде пряма лінія [531, 533]. Іншими словами, в будь-який момент часу інструментальна поверхня і передня площина оброблюваного зуба пили будуть дотикатися один до одного по прямій лінії (характеристиці), тобто лінії контакту поверхні деталі і вихідної інструментальної поверхні, знайденої в певний момент часу при певному взаємному розташуванні поверхні деталі і вихідної інструментальної поверхні. Проектуючи дискову обкатну фрезу як різальну кромку, що формує передню площину зуба оброблюваної пили, доцільно прийняти характеристику, яка спрощує профілювання такого інструменту [531, 533].

Те, що геометрично точна дискова обкатна фреза при обробці зубів пили прямолінійного профілю (рис. 2) має прямолінійну різальну кромку, спрощує технологію її виготовлення і переточки в процесі експлуатації.

Кожен зуб такої фрези буде профілюючим та матиме свої параметри.

Виходячи з теорії формоутворення визначаються координати точок різальних кромок дискової обкатної фрези при нахиленій установці осі інструменту відносно осі відрізної пили, як більш загальний випадок обробки на зубофрезерном верстаті.

В якості різальної кромки дискової обкатної фрези при нахиленій установці її осі до осі пили приймається характеристика, яку треба визначити в той момент часу, коли передня поверхня займає положення, відповідне вибраному значенню кута ψ . З оброблюваною пилою пов'язана систему координат XYZ (рис. 5). Вісь Z направлена вздовж осі пили, вісь Y - за лінією, що з'єднує два центра: пили та дискової обкатної фрези. Осі X і Y розташовуються в площині перпендикулярній осі пили.

З обкатною фрезою, пов'язана система координат $X_\phi Y_\phi Z_\phi$. Вісь Y_ϕ збігається з віссю Y , вісь X_ϕ співпадає з віссю інструмента, який обертається з кутовою швидкістю $-\bar{\omega}_\phi$. Формули перетворення координат у цьому випадку записуються таким чином:

$$X_{\phi} = X \cdot \cos \beta - Z \cdot \sin \beta, \quad (4)$$

$$Y_{\phi} = Y - a, \quad (5)$$

$$Z_{\phi} = Z \cdot \cos \beta + X \cdot \sin \beta. \quad (6)$$

де β - кут нахилу осі фрези.

Визначається характеристику на поверхні відрізної пили в той момент часу, коли її передня площина займає положення зображене на рисунку 5. Тоді рівняння передньої площини оброблюваної пили в системі XYZ буде:

$$Y = X \cdot \operatorname{ctg} \psi - \frac{0,5 \cdot D \cdot \sin \gamma}{\sin \psi} \quad (7)$$

На плоскій передній поверхні розглядається довільна точку $M(X,Y,Z)$. Швидкість точки M при обертанні навколо осі оброблюваної пили з кутовою швидкістю $\bar{\omega} = \bar{k} \cdot \omega$ буде:

$$\bar{V}_M = [\bar{\omega} \times \bar{r}_M]$$

$$\bar{V}_M = \bar{i} \cdot (-\omega \cdot Y) + \bar{j} \cdot \omega \cdot X$$

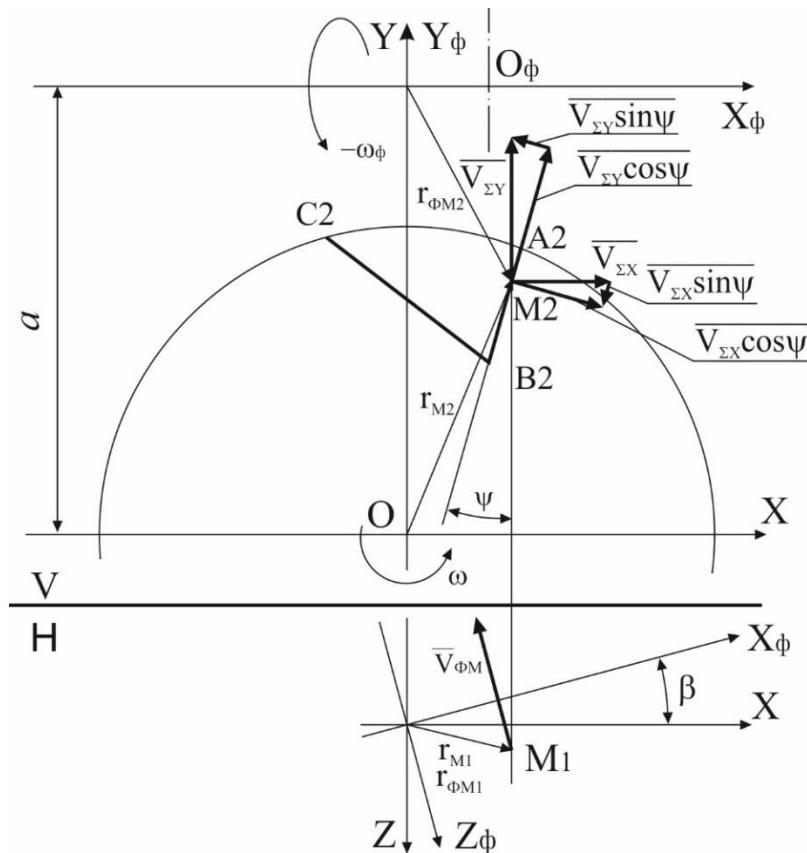


Рисунок 5. Схема для визначення координат точок різальних краєк дискової обкатної фрези при нахиленої осі інструменту відносно осі пили

Аналізуючи відносний рух інструменту і відрізної пили необхідно враховувати, що точка М бере участь також у русі обертання інструменту навколо його осі. В результаті обертання з кутовою швидкістю $\bar{\omega}_\phi$ навколо осі X_ϕ швидкість точки $M(X \cdot \cos \beta, Y - a, Z \cdot \sin \beta)$ в системі $X_\phi Y_\phi Z_\phi$ буде дорівнювати:

$$\bar{V}_{\phi M} = [\bar{\omega}_\phi \times \bar{r}_{\phi M}]$$

В системі XYZ маємо:

$$\bar{\omega}_\phi = \bar{i} \cdot \omega_\phi \cdot \cos \beta - \bar{k} \cdot \omega_\phi \cdot \sin \beta,$$

$$\bar{r}_{\phi M} = \bar{i} \cdot X + \bar{j} \cdot (Y - a) + \bar{k} \cdot Z.$$

Таким чином швидкість $\bar{V}_{\phi M}$ довільної точки М передньої площини зуба пили при обертанні навколо осі інструменту буде:

$$\bar{V}_{M1} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \omega_\phi \cdot \cos \beta & 0 & -\omega_\phi \cdot \sin \beta \\ X & Y - a & Z \end{vmatrix}$$

Розкриваючи визначник, отримаємо:

$$\bar{V}_{M1} = \bar{i} \cdot [\omega_\phi \cdot \sin \beta \cdot (Y - a)] - \bar{j} \cdot (Z \cdot \omega_\phi \cdot \cos \beta + X \cdot \omega_\phi \cdot \sin \beta) + \bar{k} \cdot [\omega_\phi \cdot \cos \beta \cdot (Y - a)]$$

Складова швидкості $\bar{k} \cdot [\omega_\phi \cdot \cos \beta \cdot (Y - a)]$ лежить у передній площині для будь-якої її точки. Тому при визначенні характеристики її можна не враховувати. Таким чином в точках характеристики необхідно, щоб наступний сумарний вектор $\bar{V}_\Sigma$ лежав у передній площині [531, 533].

$$\bar{V}_\Sigma = \bar{i} \cdot [\omega_\phi \cdot \sin \beta \cdot (Y - a) - \omega \cdot Y] + \bar{j} \cdot [\omega \cdot X - \omega_\phi \cdot Z \cdot \cos \beta - \omega_\phi \cdot X \cdot \sin \beta], \quad (8)$$

$$\bar{V}_\Sigma = \bar{i} \cdot V_{\Sigma X} + \bar{j} \cdot V_{\Sigma Y}.$$

Кожен з розглянутих проекцій векторів $\bar{V}_{\Sigma X}$ і $\bar{V}_{\Sigma Y}$ розкладемо на два напрямки - на нормаль до передньої поверхні і на прямок, що знаходиться в ній. Складові розглянутих векторів, що лежать в передній площині, можна при визначенні характеристики не враховувати. Сума складових векторів на нормаль до передньої поверхні в точках характеристики повинна дорівнювати нулю. У цьому випадку вектори швидкостей точок характеристики при їх відносному русі будуть лежати в передній площині.

Таким чином будемо мати:

$$V_{\Sigma X} \cdot \cos \psi = V_{\Sigma Y} \cdot \sin \psi$$

або

$$[\omega_{\phi} \cdot \sin \beta \cdot (Y - a) - \omega \cdot Y] \cdot \cos \psi = [\omega \cdot X - \omega_{\phi} \cdot Z \cdot \cos \beta - \omega_{\phi} \cdot X \cdot \sin \beta] \cdot \sin \psi$$

Визначаючи звідси координату Z , отримуємо:

$$Z = \frac{\omega}{\omega_{\phi}} \cdot \frac{(X + Y \cdot \operatorname{ctg} \psi)}{\cos \beta} - \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{ctg} \psi \cdot (Y - a) - X \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (9)$$

При $\beta=0$ отримуємо

$$Z = \frac{\omega}{\omega_{\phi}} \cdot (X + Y \cdot \operatorname{ctg} \psi)$$

Знаючи різальну кромку $A_i B_i$ створюємо на ній рекомендовані величини передніх кутів γ і таким чином визначаємо положення передньої поверхні. Так як при обробці потиличної плоскої поверхні вимоги високої точності відсутні, різальну кромку, яка обробляє потиличну площину, проводять через точку B_i і проекцію точки C_i на передню площину.

Поряд з визначенням форми різальних кромок для формоутворення зубів відрізних пил дискової обкатною фрезою, згідно теорії формоутворення, необхідно виконання другої умови формоутворення, а саме можливість обробки зубів без проникнення різальної кромки в тіло деталі. Для отримання прямолінійного профіля відрізної пили прямолінійними різальними кромками обкатної фрези необхідно визначити її мінімальний діаметр, при якому не буде проникнення різальних кромок в тіло заготовки в процесі обробки [531, 540].

Для спрощення, а також якщо врахувати той факт, що вісь дискової обкатної фрези нахилена до осі відрізної пили небезпека проникнення різальної кромки дискової обкатної фрези в тіло деталі зменшується, розглядаємо випадок коли вісь обкатної фрези встановлена перпендикулярно до осі пили [538].

Розглядаємо випадок, коли вершинна точка зуба обкатної фрези знаходиться в точці K западини профіля зуба пили. При цьому положення профілю відрізної пили характеризується кутом повороту $\psi + \gamma$, що забезпечує оброблення профілю в відповідності до креслення [531, 533].

Вважаємо, точка K різальної кромки дискової обкатної фрези розташовується в перерізі I - I (рис. 6), положення якого вибрано таким чином, щоб отримати певну величину кута ψ . В перерізі I - I при обертанні фрези навколо її осі буде переміщатися вершинна різальна кромка зуба, оскільки осі фрези і пили взаємо-перпендикулярні і при обробці дисковими обкатними фрезами спостерігається обертання фрези і відрізної пили навколо своїх осей [536].

За вихідний переріз пили приймаємо переріз перпендикулярний до її осі, в якому вершинна точка різальної кромки K обкатної фрези знаходиться в точці B западини профілю оброблюваної пили. Дотик різальної кромки зуба обкатної фрези, що обробляє передню поверхню пили, з її зовнішнім колом, позначимо точкою G , положення якої визначається кутами η_1 і η_2 .

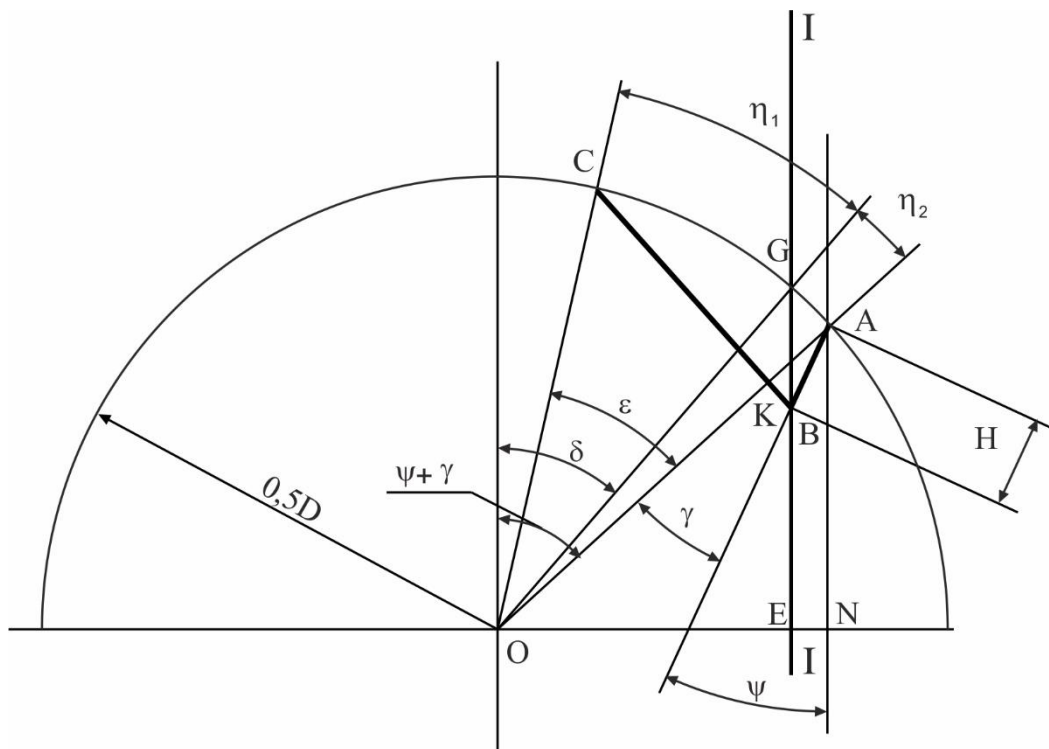


Рисунок 6. Схема визначення кутів η_1 і η_2 , коли вершинна точка зуба обкатної фрези K знаходиться в точці B западини профілю пили, та кути $\eta_1 \neq \eta_2$

Кут η_2 дорівнює:

$$\eta_2 = \psi + \gamma - \delta, \quad (10)$$

Визначимо кут δ (рис. 6). З побудови маємо:

$$ON = 0.5 \cdot D \cdot \sin(\psi + \gamma),$$

$$EN = H \cdot \sin \psi,$$

$$OE = ON - EN = 0.5 \cdot D \cdot \sin(\psi + \gamma) - H \cdot \sin \psi,$$

Тоді:

$$\sin \delta = \frac{OE}{0.5 \cdot D} = \sin(\psi + \gamma) - \frac{H}{0.5 \cdot D} \cdot \sin \psi \quad (11)$$

Кут η_2 дорівнює:

$$\eta_1 = \varepsilon - \eta_2.$$

З точки зору технології виготовлення, доцільно проектувати дискову обкатну фрезу з симетричним профілем. Тому практичний інтерес являє собою випадок, коли кути η_1 і η_2 дорівнюють один одному.

В цьому випадку величина кута ψ приймає цілком певне значення. Визначення глибини h_1 , коли кут $\eta_1 = \eta_2 = \eta$ наведено на рис. 7

Зображений профіль АВС пили. Кут ε розділено на дві рівні частини, і таким чином визначено положення точки G на зовнішньому колі виробу. Проведена лінія GK, яка з одного боку обмежує кут ψ . Іншою стороною, що обмежує ψ кут буде пряма АВ. Профіль АВС повертається у вихідне положення на кут $(\psi + \gamma)$. Вихідне положення профілю зображено пунктиром.

З побудови маємо:

$$GF = 0.5 \cdot D \cdot \sin \eta,$$

$$MF = BL = H \cdot \sin \gamma,$$

$$GM = GF + MF = 0.5 \cdot D \cdot \sin \eta + H \cdot \sin \gamma,$$

$$OF = 0.5 \cdot D \cdot \cos \eta,$$

$$AF = 0.5 \cdot D - OF = 0.5 \cdot D \cdot (1 - \cos \eta),$$

$$AL = H \cdot \cos \gamma,$$

$$LF = AL - AF = H \cdot \cos \gamma - 0.5 \cdot D \cdot (1 - \cos \eta),$$

$$\angle GBM = \psi + \gamma,$$

$$\operatorname{tg}(\psi + \gamma) = \frac{GM}{MB},$$

$$tg(\psi + \gamma) = \frac{0.5 \cdot D \cdot \sin \eta + H \cdot \sin \gamma}{H \cdot \cos \gamma - 0.5 \cdot D \cdot (1 - \cos \eta)} \quad (12)$$

У цьому випадку розмір GB дорівнює:

$$GB = \frac{GM}{\sin(\psi + \gamma)}$$

або

$$h_1 = GB = \frac{0.5 \cdot D \cdot \sin \eta + H \cdot \sin \gamma}{\sin(\psi + \gamma)} \quad (13)$$

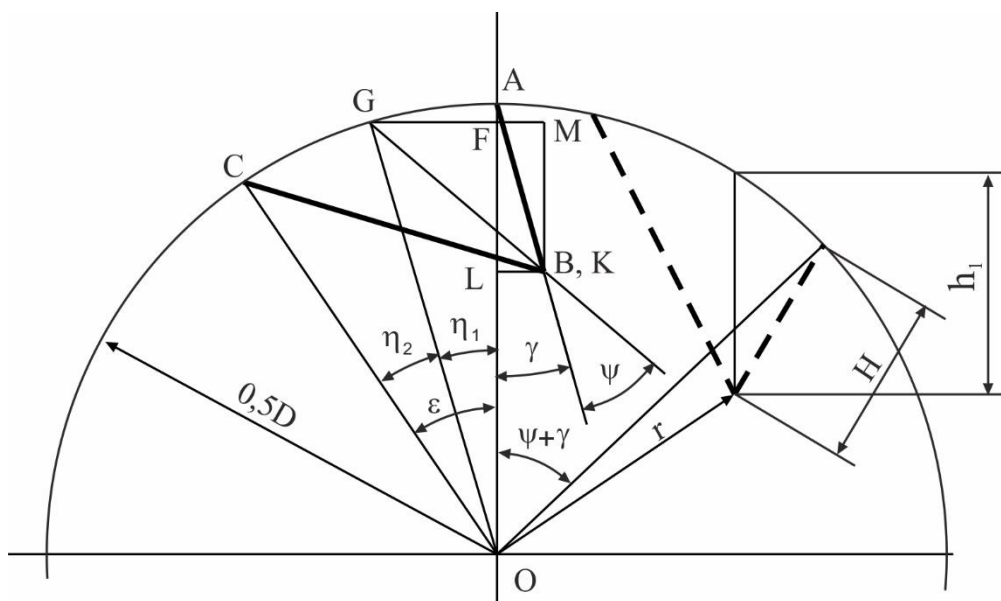


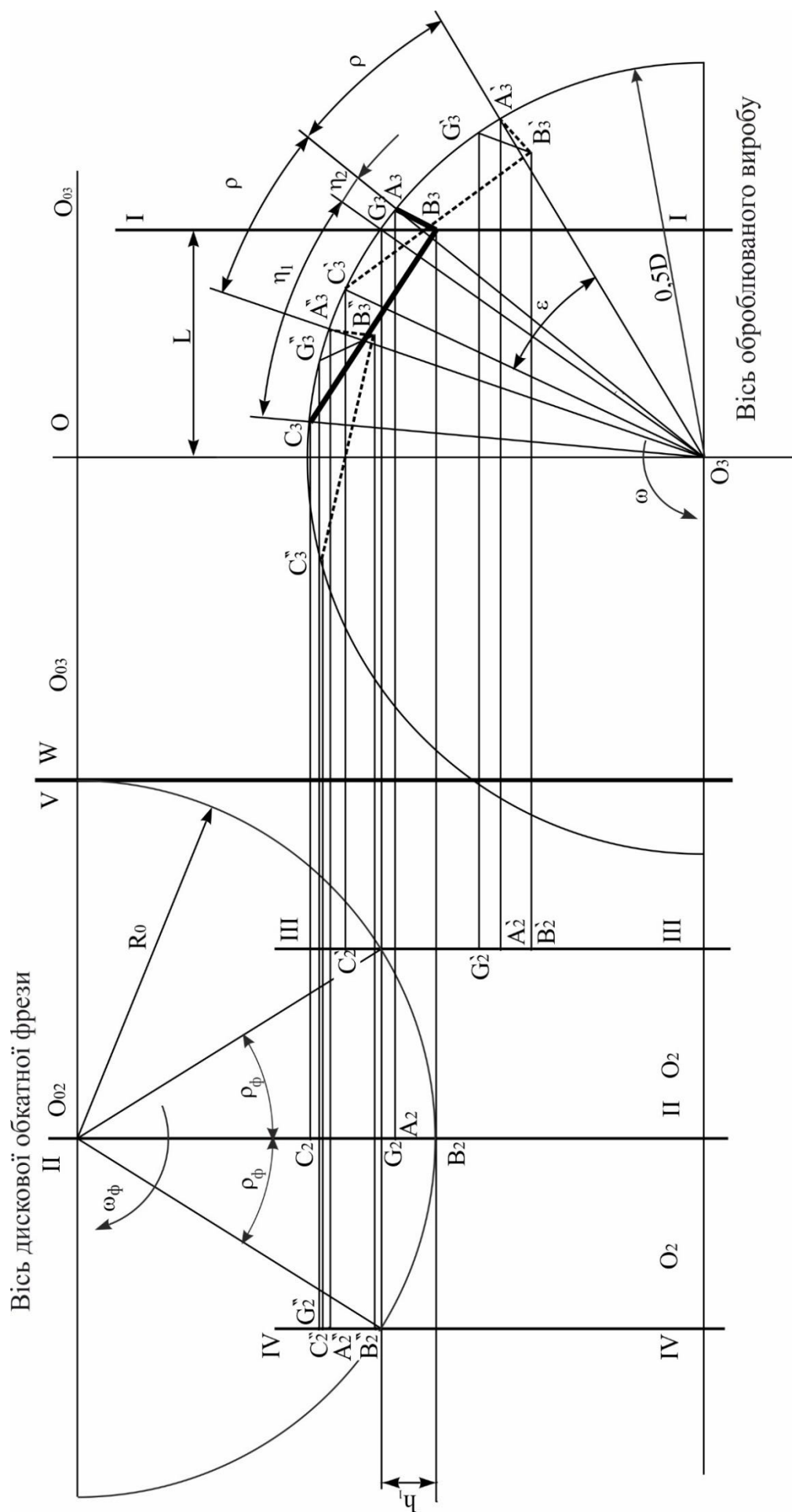
Рисунок 7. Схема визначення кутів η_1 і η_2 та глибини h_1 , коли вершинна точка зуба обкатної фрези К знаходиться в точці В западині профілю відрізної пили,

та кути $\eta_1 = \eta_2 = \eta$

При відомих величинах кутів η_1 і η_2 , визначення радіуса R_0 дискової обкатної фрези наведено на рис. 8 [540].

Площина проєкцій V обрана перпендикулярно осі фрези, а площину W - перпендикулярно осі пили.

У вихідному перерізі II - II зображений профіль пили ABC (його проекції позначені $A_3B_3C_3$ і $A_2B_2C_2$). В процесі обробки фреза обертається навколо своєї осі з кутовою швидкістю $\bar{\omega}_\phi$, а пила обертається навколо своєї осі з кутовою швидкістю $\bar{\omega}$. За час повороту дискової обкатної фрези на один зуб, пила також повертається на один зуб.

Рисунок 8. Визначення допустимого зовнішнього радіуса R_0 дискової обкатної фрези

Отже, можемо записати:

$$\frac{\rho_\phi}{\rho} = \frac{Z}{Z_0}$$

де ρ_ϕ - кут повороту фрези;

ρ - відповідний кут повороту оброблюваної пили.

Вершинна точка різальної кромки обкатної фрези, обертаючись навколо осі, описує в перерізі I - I коло радіуса R_0 , яка в справжню величину проектується на площину V. Цей профіль ABC повертаємо за годинниковою стрілкою на кут ρ навколо осі пили і отримуємо профіль її зуба $A^I B^I C^I$ (Його проекції позначені $A^I_3 B^I_3 C^I_3$ і $A^I_2 B^I_2 C^I_2$) в перерізі III - III. Точка G розташовується, як видно з креслення, всередині профілю $A^I B^I C^I$. Тому в момент врізування не буде проникнення розглянутої точки різальної кромки в тіло виробу і друга умова формоутворення буде дотримуватися.

Граничний випадок буде тоді, коли точка G_3 збігається з точкою C^I_3 . В цьому випадку кут ρ повороту зуба пили при переході від перерізу II - II до перерізу III - III буде дорівнює:

$$\rho = \eta_1$$

Тому, для того, щоб в цій зоні дотримувалася друга умова формоутворення, кут ρ повинен бути менше η_1 або дорівнює йому.

$$\eta_1 \geq \rho$$

Для того, щоб одержати профіль зуба у другому крайньому перерізі IV - IV повернемо профіль ABC проти годинникової стрілки на кут ρ . Профіль зуба пили в перерізі IV - IV буде $A^{II} B^{II} C^{II}$ (його проекції позначені $A^{II}_3 B^{II}_3 C^{II}_3$ і $A^{II}_2 B^{II}_2 C^{II}_2$). Як видно з креслення, у цьому випадку точка G лежить за межами профілю $A^{II} B^{II} C^{II}$. Тому, в момент виходу з процесу різання крайня вершинна точка різальної кромки дискової обкатної фрези буде проникати в тіло зуба пили і обробка заданого профілю у відповідності з кресленням виявляється неможливою. В цьому випадку не виконується друга умова формоутворення. Граничний випадок буде тоді, коли точка G буде збігатися з точкою A^{II} , тоді кут

повороту ρ профілю зуба пили при переході від перетину II - II до перетину IV - IV повинен бути:

$$\rho = \eta_2$$

Отже, для того, щоб у момент виходу з контакту з зубом пили дотримувалась друга умова формоутворення, необхідно, щоб кут ρ був менший або дорівнює η_2 .

$$\eta_2 \geq \rho$$

Таким чином маємо:

$$\eta_1 \geq \rho,$$

$$\eta_2 \geq \rho,$$

$$\varepsilon = \eta_1 + \eta_2.$$

Виходячи з цього доцільно приймати кут $\eta_1 = \eta_2$.

Розрахункове мінімальне значення зовнішнього радіуса $R_{0\min}$ фрези визначається за формулою:

$$\cos \rho_\phi = \frac{R_{0\min} - h_1}{R_{0\min}}$$

звідси

$$R_{0\min} = \frac{h_1}{1 - \cos \rho_\phi} \quad (14)$$

де

$$\rho_\phi = \rho \frac{Z}{Z_0} \quad (15)$$

Таким чином з точки зору другої умови формоутворення, найбільша небезпека проникнення різальної кромки дискової обкатної фрези в тіло зуба пили має місце в вершинній точці різальної кромки. Аналіз показує, що найбільш часто це положення дотримується. Якщо виникає необхідність у перевірці дотримання другої умови формоутворення для інших точок різальної кромки, то методика розв'язання цієї задачі може бути прийнята тією ж самою, що і для вершинної точки різальної кромки.

У загальному випадку вісь дискової обкатної фрези встановлюється нахилено відносно осі пили. Але і в цьому випадку можна скористатися розробленою методикою визначення радіуса $R_{0\min}$ дискової обкатної фрези. Це пояснюється тим, що при нахиленій установці обкатної фрези небезпека проникнення різальної кромки фрези в тіло зуба зменшується.

Третя умова формоутворення - це умова не перетинання суміжних ділянок вихідної інструментальної поверхні [531, 533].

Відомо, що перетин суміжних ділянок ВІП і утворення перехідних поверхонь спостерігається при обробці за способом обкочування западин на деталях.

При обробці обкатними фрезами зубів пили з прямолінійним профілем оброблюваних канавок при установці осі дискової обкатної фрези перпендикулярно до осі виробу не витримується третя умова формоутворення. Суміжні ділянки вихідної інструментальної поверхні, пов'язані із суміжними ділянками оброблюваної канавки, перетинають один одного, і в западині зуба створюються перехідні поверхні. Це пояснюється тим, що на межі суміжних ділянок поверхні зуба спостерігається розрив характеристик, так як на прямій перетину суміжних ділянок поверхні зуба немає точки, в якій швидкість відносного руху дотикалась би лінії перетину суміжних ділянок [531, 533].

Обробити суміжні плоскі ділянки поверхні канавок зуба пили без перехідних кривих в западині зуба можна, використовуючи нахилenu установку осі фрези по відношенню до осі оброблюваної канавки [541].

При цьому кут нахилу осі фрези повинен мати певну величину, яка залежить від розмірів оброблюваної канавки і кінематики процесу.

Для виконання третьої умови формоутворення необхідно забезпечити виготовлення стружкових канавок відрізної пили без перехідних кривих.

У загальному випадку при обробці зубів пил з прямолінійним профілем при установці осі дискової обкатної фрези перпендикулярно до осі пили, спостерігається у западині поява перехідних поверхонь [531, 533, 542]. Як відомо з теорії формоутворення, обробка без перехідних поверхонь у западині зубів пил

буде в тому випадку, якщо суміжні ділянки вихідної інструментальної поверхні не перетинають один одного і на межі ділянок, характеристики не мають розриву і стикаються одна з одною. Для цього необхідно, щоб в одній з точок на межі суміжних ділянок поверхні зуба швидкість руху $\bar{V}$ кожній точці його поверхні щодо інструменту торкалася лінії перетину суміжних ділянок поверхні зуба [543].

Межею ділянок при обробці зубів пил прямолінійного профілю буде твірна, якій належить точка B_i (рис. 5). Координати цієї точки будуть змінюватися для кожного профілю зуба у групі, та розраховуються за залежностями:

$$X_{Bi} = 0,5 \cdot D \cdot \sin(\psi + \gamma) - H_i \cdot \sin \psi, \quad (16)$$

$$Y_{Bi} = 0,5 \cdot D \cdot \cos(\psi + \gamma) - H_i \cdot \cos \psi. \quad (17)$$

Швидкість відносного руху довільної точки твірної, що проходить через точку В буде дорівнювати (рис. 5):

$$\begin{aligned} \bar{V} = & \bar{i} \cdot [\omega_\phi \cdot \sin \beta \cdot (Y_{Bi} - a) - \omega \cdot Y_{Bi}] - \bar{j} \cdot [\omega_\phi \cdot Z_{Bi} \cdot \cos \beta + \omega_\phi \cdot X_{Bi} \cdot \sin \beta - \omega \cdot X] + \\ & + \bar{k} \cdot [\omega_\phi \cdot \cos \beta \cdot (Y_{Bi} - a)] \end{aligned}$$

Для того щоб не було перехідної кривої в западині зуба швидкість $\bar{V}$ повинна йти вздовж твірної, що відповідає точці B_i , і бути паралельною осі Z. Проекція швидкості на осі X і Y повинна дорівнювати нулю. Отже:

$$\begin{cases} \omega_\phi \cdot \sin \beta \cdot (Y_{Bi} - a) - \omega \cdot Y_{Bi} = 0 \\ \omega_\phi \cdot Z_{Bi} \cdot \cos \beta + \omega_\phi \cdot X_{Bi} \cdot \sin \beta - \omega \cdot X_{Bi} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

З першого рівняння системи рівнянь (18) визначаємо кут нахилу осі обкатної фрези до осі виробу:

$$\sin \beta = \frac{\omega \cdot Y_{Bi}}{\omega_\phi \cdot (Y_{Bi} - a)} \quad (19)$$

З другого рівняння системи рівнянь (18) визначаємо координату Z точки В:

$$Z_{Bi} = \frac{\omega \cdot X_{Bi} - \omega_\phi \cdot X_{Bi} \cdot \sin \beta}{\omega_\phi \cdot \cos \beta}$$

або

$$Z_{Bi} = \frac{X_{Bi} - \frac{\omega_{\phi}}{\omega} \cdot X_{Bi} \cdot \sin \beta}{\frac{\omega_{\phi}}{\omega} \cdot \cos \beta} \quad (20)$$

Таким чином, визначаються координати першої точки характеристики для кожного зуба у групі, що відповідають точці B_i , розташованої на межі ділянок поверхні зуба.

Координати другої точки характеристики, розташованої на твірній відповідної точки A не змінюються для кожного профілю зуба у групі, та розраховуються за залежностями 16 і 17:

Координати Z точки A визначаються за рівнянням контакту при нахиленій осі інструменту (9).

Координати X , Y точки характеристики, розташованої на твірній, що відповідає точці C_i змінюються для кожного профілю зуба у групі та будуть розраховуватися за залежностями:

$$X_{Ci} = 0,5 \cdot D \cdot \sin(\psi + \gamma - \varepsilon_i), \quad (21)$$

$$Y_{Ci} = 0,5 \cdot D \cdot \cos(\psi + \gamma - \varepsilon_i). \quad (22)$$

Координата Z точки C_i характеристики на потиличної площини зуба визначається за рівнянням контакту:

$$Z_{Ci} = \frac{\omega}{\omega_{\phi}} \cdot \frac{(X_{Ci} + Y_{Ci} \cdot \operatorname{ctg}(\theta - \psi))}{\cos \beta} - \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{ctg}(\theta - \psi) \cdot (Y_{Ci} - a) - X_{Ci} \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (23)$$

Знаючи координати точок прямолінійних характеристик в системі XYZ за формулами перетворення координат (4 - 6) розраховуються координати точок характеристик в системі $X_{\phi}Y_{\phi}Z_{\phi}$.

Три точки $A(X_{\phi}Y_{\phi}Z_{\phi})$, $B_i(X_{\phi}Y_{\phi}Z_{\phi})$, $C_i(X_{\phi}Y_{\phi}Z_{\phi})$, належать прямолінійній характеристиці, та координати яких для кожного зуба мають своє значення, Вони визначають положення передньої площини проектованої дискової обкатної фрези в системі координат $X_{\phi}Y_{\phi}Z_{\phi}$.

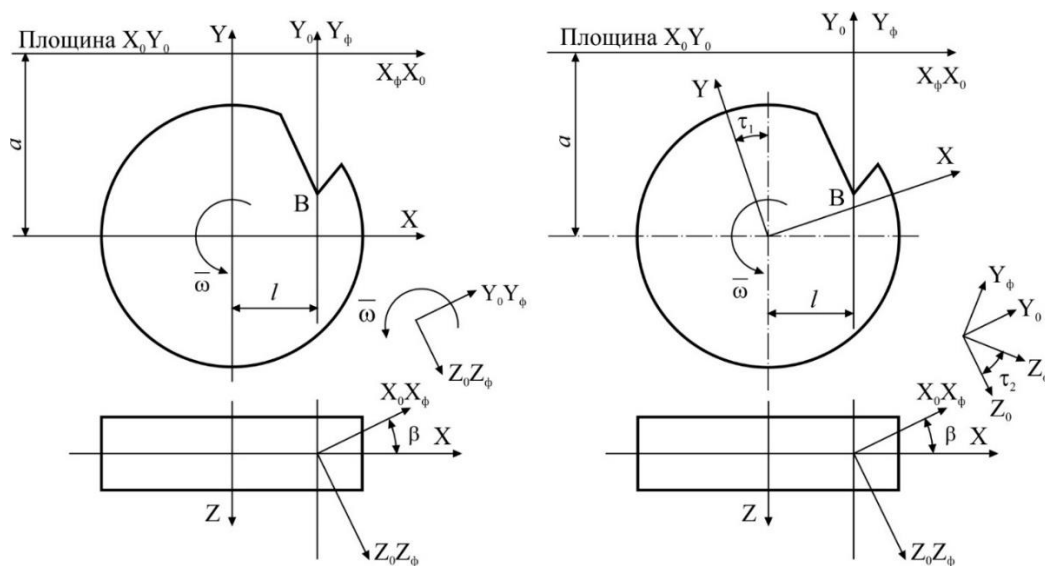
Для перевірки розрахункових формул при обробці прямозубих стружкових канавок без перехідних кривих при похилій установці осі дискової обкатної

фрези відносно осі пили [541, 544, 545], розглядається схема обробки заданою обкатною фрезою, при якій заготовка пили обертається навколо своєї осі з кутовою швидкістю $\bar{\omega}$, обкатна фреза обертається навколо своєї осі з кутовою швидкістю ω_f .

Осі інструменту і заготовки є мимобіжними прямими, вісь обкатної фрези встановлена нахилена до осі відрізної пили під кутом β . В процесі обробки здійснюється тільки радіальна подача, в результаті чого фреза заглиблюється в матеріал заготовки безпосередньо в процесі формування оброблюваної поверхні, коли фреза заглибилася на необхідну величину в заготовку, радіальна подача відключається. Формування оброблюваної поверхні відбувається таким чином при двох взаємопов'язаних обертаннях навколо осей пили та інструменту.

З пилою пов'язуємо систему координат XYZ , з дисковою обкатною фрезою - систему $X_f Y_f Z_f$. Вводимо також нерухому систему координат $X_0 Y_0 Z_0$. Взаємне розташування систем координат в початковий момент часу зображено на рис. 9 - а.

За вісь деталі прийнята вісь Z , за вісь інструменту прийнята вісь X_f . Положення осей XYZ щодо осей $X_f Y_f Z_f$ характеризується параметрами a і l і кутом β .



а

б

a – початковий момент часу; b – довільний момент часу

Рисунок 9. Схема взаємного розташування систем координат [541]

Вважаємо, що за довільний момент часу система XYZ повернулася на кут τ_1 , а система $X_\phi Y_\phi Z_\phi$ - на кут τ_2 . Кути τ_1 і τ_2 пов'язані співвідношенням:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{Z_0}{Z}$$

Положення систем координат в довільний момент часу зображено на рис.

9 - б. У цьому випадку формули перетворення координат будуть:

$$X = \cos \tau_1 \cdot [l + X_\phi \cdot \cos \beta + (Z_\phi \cdot \cos \tau_2 - Y_\phi \cdot \sin \tau_2) \cdot \sin \beta] + [a + Y_\phi \cdot \cos \tau_2 + Z_\phi \cdot \sin \tau_2] \cdot \sin \tau_1 \quad (24)$$

$$Y = [a + Y_\phi \cdot \cos \tau_2 + Z_\phi \cdot \sin \tau_2] \cdot \sin \tau_1 - \sin \tau_1 \cdot [l + X_\phi \cdot \cos \beta + (Z_\phi \cdot \cos \tau_2 - Y_\phi \cdot \sin \tau_2) \cdot \sin \beta] \quad (25)$$

$$Z = \cos \beta \cdot [Z_\phi \cdot \cos \tau_2 - Y_\phi \cdot \sin \tau_2] - X_\phi \cdot \sin \beta \quad (26)$$

Поверхня западини зуба пили буде описуватися різальною кромкою зуба обкатної фрези при її русі відносно заготовки пили. Визначаємо профіль цієї поверхні в площині $Z=0$. Будемо вважати, що обробка ведеться фрезою з кутами $\gamma_i=0$ і $\lambda_i=0$, тобто передньою площиною фрези буде площина, яка проходить через її вісь. За цю площину приймаємо площину $Y_\phi=0$.

Профіль западини зуба пили визначаємо в площині $Z=0$. За формулами перетворення координат, при $Z=0$ и $Y_\phi=0$ маємо:

$$Z_\phi \cdot \cos \tau_2 = X_\phi \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (27)$$

$$X = \cos \tau_1 \cdot [l + X_\phi \cdot \cos \beta + Z_\phi \cdot \cos \tau_2 \cdot \sin \beta] + [a + Z_\phi \cdot \sin \tau_2] \cdot \sin \tau_1, \quad (28)$$

$$Y = [a + Z_\phi \cdot \sin \tau_2] \cdot \cos \tau_1 - \sin \tau_1 \cdot [l + X_\phi \cdot \cos \beta + Z_\phi \cdot \cos \tau_2 \cdot \sin \beta]. \quad (29)$$

Обробка відрізних пил з нерівномірним кроком обкатними фрезами можлива як при установці осі дискової обкатної фрези перпендикулярно до осі відрізної пили, так при нахиленій установці. Але, як показав аналіз умов формоутворення профілів відрізних пил, при установці осі обкатної фрези перпендикулярно в западини зуба відрізної пили виникають перехідні поверхні.

При обробці западини зуба відрізної пили при установці осі дискової обкатної фрези перпендикулярно до осі пили, радіуси кривизни виникаючих перехідних поверхонь можуть бути більші, ніж нормовані радіуси заокруглень

западини зубів відрізної пили, або лежати в межах їх допустимих значень. Для визначення можливості обробки западин зубів відрізних пил обкатними фрезами з допустимим значеннями радіусів заокруглення перехідних кривих, в цьому випадку, необхідно визначити їх розміри.

Аналітично визначаються залежності, які характеризують розміри перехідних кривих. При обробці відрізної пили кути повороту обкатної фрези та заготовки, як відомо, пов'язані залежністю:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{Z_0}{Z}$$

При відомому радіусі обкатної фрези кут повороту її зуба, при обробці канавки зуба відрізної пили, яка має ширину b (рис. 10), дорівнює:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\tau_2}{2}\right) = \frac{b}{2 \cdot R_{0\min}} \quad (30)$$

Величина h_n , яка буде характеризувати висоту перехідної кривої дорівнює

$$h_n = \operatorname{tg}\left(\frac{\tau_2}{2}\right) \cdot \frac{b}{2} \quad (31)$$

Профіль канавки зуба пили в вихідному перерізі позначено як ABC . Положення цього перерізу в системі координат XYZ , пов'язаною з відрізною пилою, характеризує параметри установки обкатної фрези відносно заготовки пили на верстаті. Положення цього перерізу відповідає положенню зуба обкатної фрези, коли його вершина знаходиться в осьовій площині. Таким чином, на початку обробки вершинна точка зуба обкатної фрези знаходиться в точці B' , а в кінці обробки – в точці k .

Визначаємо величину l_n , яка характеризує ширину перехідної кривої. В системі координат XYZ можна записати:

$$l_n = X_k - X_{B'} \quad (32)$$

Визначаємо координати точок $X_k Y_k$ та $X_{B'} Y_{B'}$. Як відомо, координати точки B при перпендикулярної установці осі обкатної фрези до осі заготовки пили дорівнюють (16, 17):

$$X_B = 0,5 \cdot D \cdot \sin(\psi + \gamma) - H \cdot \sin \psi$$

$$Y_B = 0,5 \cdot D \cdot \cos(\psi + \gamma) - H \cdot \cos \psi$$

Координати точки B' запишуємо, як:

$$X_{B'} = X_B - c$$

$$Y_{B'} = Y_B + h_n \quad (33)$$

де величина $c = \operatorname{tg} \psi \cdot h_n$

Координати точки k , визначаємо, як координати точки перетину прямої $Y_B = Y_{B'}$ та прямої $A_t B_t$.

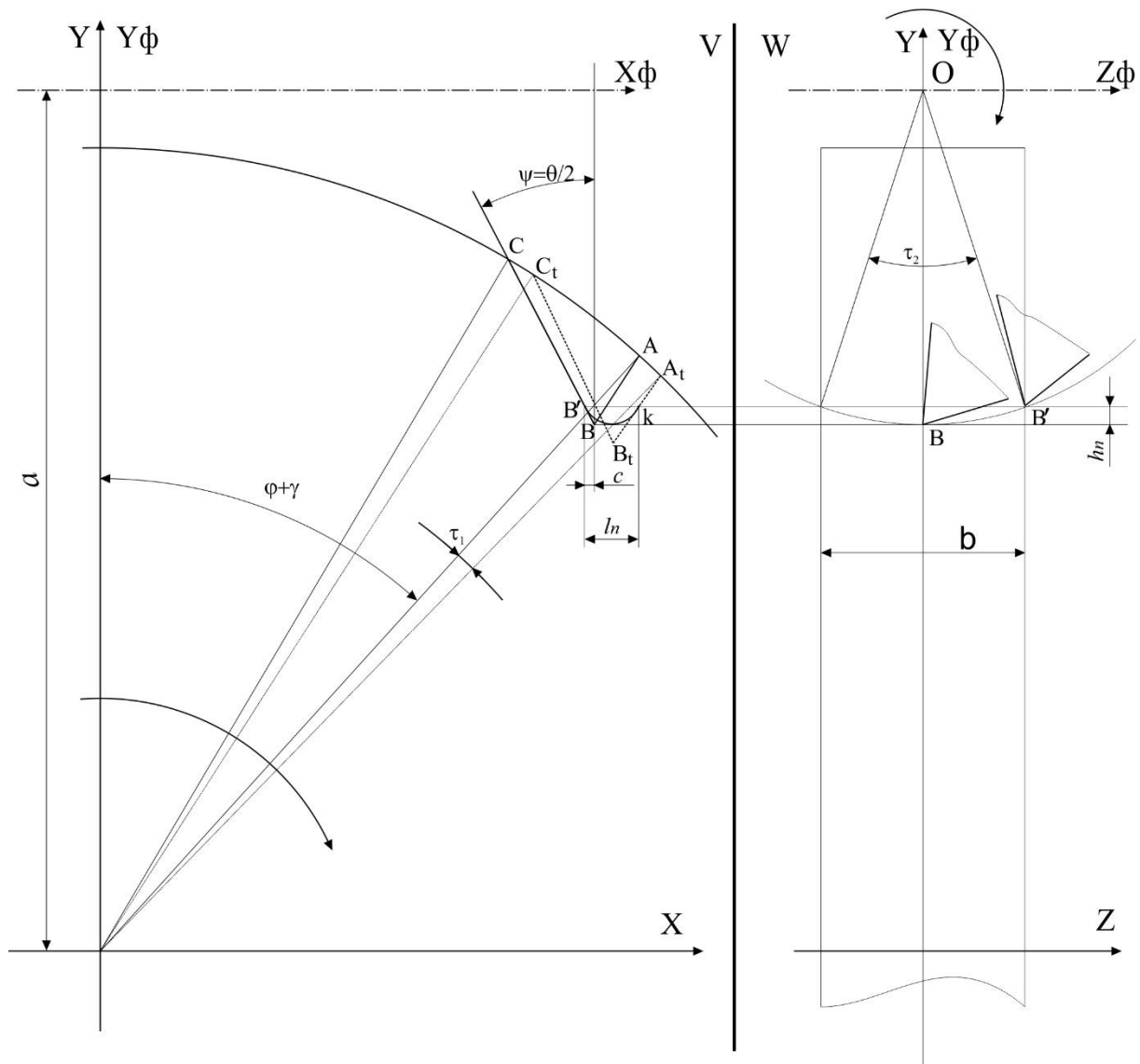


Рисунок 10. Схема визначення розмірів перехідних кривих при перпендикулярній установці осі обкатної фрези до осі заготовки пили

Координати точок A_t та B_t записуємо наступним чином:

$$X_{At} = 0,5 \cdot D \cdot \sin(\psi + \gamma + \tau_1)$$

$$Y_{At} = 0,5 \cdot D \cdot \cos(\psi + \gamma + \tau_1)$$

$$X_{Bt} = X_{At} - H \cdot \sin(\psi + \tau_1)$$

$$Y_{Bt} = Y_{At} - H \cdot \cos(\psi + \tau_1)$$

Для знаходження точки перетину двох прямих записуємо рівняння:

$$\frac{X_k - X_{At}}{X_{Bt} - X_{At}} = \frac{Y_k - Y_{At}}{Y_{Bt} - Y_{At}}$$

Вирішуючи рівняння відносно координати X_k , отримаємо:

$$X_k = \frac{X_{At} \cdot Y_{Bt} + Y_k \cdot (X_{Bt} - X_{At}) - Y_{At} \cdot X_{Bt}}{Y_{Bt} - Y_{At}} \quad (34)$$

За формулами (31) та (32) визначається висота та довжина сегмента дуги, яка описує вершина зуба обкатної фрези. Знаючи розміри сегмента дуги визначається радіус перехідної кривої за відомою залежністю:

$$r_n = \frac{h_n}{2} + \frac{l_n^2}{8 \cdot h_n} \quad (35)$$

Визначення розмірів перехідних поверхонь при установці осі обкатної фрези перпендикулярно до осі відрізної пили дає можливість з'ясувати за яких параметрах оброблюваної заготовки відрізної пили відхилення обробленої поверхні від її заданих (нормованих – радіус западини зуба пили) розмірів лежать в допустимих межах і обробка при такій установці можлива у відповідності з креслеником.

За розробленою теорією формоутворення проводиться проектування обкатної фрези з нерівномірним кроком.

Конструкція дискової обкатної фрези характеризується двома групами параметрів: які розраховуються за залежностями, визначеними на основі положень теорії формоутворення відрізних пил з нерівномірним кроком обкатними фрезами та параметрами, які рекомендуються нормативними документами та літературними джерелами [ГОСТ 10996-64, ГОСТ 28527-90 (ИСО 2587-72), ГОСТ 9472-90, ГОСТ 9324-2015 (ISO 2490:2007, ISO 4468:2009)].

До першої групи конструктивних параметрів відносяться:

- розрахунковий мінімальний діаметр та зовнішній діаметр обкатної фрези з врахуванням переточок;
- параметри нерівномірності кроків відрізних пил (кутовий крок зубів, кількість зубів в групі;
- координати граничних точок прямолінійних різальних кромки;
- радіус кожного зуба;
- зміщення вершин зубів відносно центру осьової площини.

До другої групи параметрів відносяться:

- діаметр отвору під оправку;
- ширина фрези;
- висота та довжина зуба;
- діаметр та ширина ступиці;
- висота та ширина шпонкового пазу.

При розробці конструкції дискової обкатної фрези першочерговою задачею є визначення її зовнішнього діаметра, який би в найбільшій мірі задовольняв вимогу, щодо експлуатації цього інструменту.

При визначенні розмірів зовнішнього діаметра необхідно враховувати, що зі збільшенням зовнішнього діаметра можна застосовувати оправки більшого діаметра. Це дозволяє працювати зі збільшеними навантаженнями, так як оправка буде більш жорсткою і міцною. Крім того, фрези більшого діаметру мають кращі умови для відводу тепла. При обробці такими фрезами зростає дуга контакту зубів з заготовкою. Все це сприяє підвищенню якості обробленої поверхні і стійкості інструменту. Проте зі збільшенням діаметра фрези підвищується витрата матеріалу та вартість інструменту.

Зовнішній діаметр обкатної фрези з врахуванням переточувань залежить від її мінімального розрахункового діаметра – D_{0min} . З точки зору виконання другої умови формоутворення стружкових канавок відрізних пил D_{0min} визначаються параметрами нерівномірності зубів пили в групі, до яких належать кількість зубів в групі та їх кутові кроки.

Параметри нерівномірності відрізних пил залежать від загальної кількості зубів пили та від значення їх окружного кроку. Кількість зубів пили повинна бути кратна кількості груп. Крок зуба відрізної пили впливає на здатність видаляти стружку із зони розпилу. Так, згідно загальним рекомендаціям: чим більший перетин матеріалу, тим більшою повинна бути відстань між зубцями і навпаки [538, 546, 547, 548, 549].

Розміри стружкової канавки у зубів прямолінійного профілю обумовлюються висотою зуба. Замала кількість зубів у зоні різання може призвести до незбалансованого навантаження на різальну кромку та руйнування зубів. При великій кількості зубів зменшуються розміри западини зуба, що призводить до погіршення відводу стружки та нагріву зубів.

Як правило, користуються наступним правилом вибору кроку зубів відрізної пили: для суцільних матеріалів - в зоні різання повинно бути не менше трьох зубів одночасно, для профільних матеріалів - товщина стінки повинна бути не меншою за відстань між двома сусідніми зубами.

Форму зубів прямолінійного профіля, формоутворення якої досліджується в роботі, згідно рекомендаціям, використовують при відрізці тонкостінних труб та профілів, та використовують при цьому відрізні пили великих діаметрів $D \geq 200 \text{ мм}$ з кроком зубів $T = 0,8 \div 3 \text{ мм}$ [538, 547, 548, 550].

Багаторічний виробничий досвід дозволяє вважати, що максимальне рекомендоване значення кількості зубів при обраному діаметрі відрізної пили для певних умов відрізки визначає мінімальне значення окружного кроку при яких забезпечується робота пили без поломки зубів.

Це положення вважатимемо обмеженням при виборі кількості зубів в групі з нерівномірним кроком і допустимого значення мінімального кроку в групі.

Кількість нерівномірних зубів у групі та закону їх розподілення слід вибирати з позицій оцінки мінімального значення критерію динамічного стану різних конструкцій пил C_{rmax} [550].

Взагалі, нерівномірність кроку у групі задається за законом трикутника, або розподіленням їх по відношенню до номінального кроку [550, 551]. За

законом трикутника величина Δ нерівномірності кроку зубів приймається у відсотках від номінального кроку.

Так, за рекомендаціями [550, 551], при відрізці труб пилами з $Z_{gr}=6$ слід приймати нерівномірність кроку при розбивці нерівномірності кроків по закону трикутника $\Delta=(15 \dots 20)\%$, а також розподілення їх по відношенню до номінального кроку – $K=0,7-0,9-1,3-1,1-0,8-1,2$, з $Z_{gr}=8$ – по закону трикутника $\Delta=10\%$. Менші значення нерівномірності, особливо при великій кількості зубів відрізної пили наближують кутові кроки у групі до рівномірних значень. З ростом кількості зубів в групі з нерівномірним кроком і значення нерівномірності кроків в групі Δ з розбивкою по трикутнику збільшується ймовірність поломки одного з зубів в групі через зменшення окружного кроку, а отже, і розмірів канавки [550].

Враховуючи прийняте нами обмеження по допустимому мінімального кроку аналізуючи дані табл. 2, наприклад, при обраному за рекомендаціями потрібному мінімальному кутовому кроку $T=3 \text{ мм}$, обирати відрізну пилу з нерівномірним кроком $\varnothing 315 \text{ мм}$ с $Z_{gr}=4$ та $Z=204$, у якої мінімальний крок $T_{min}=3,40 \text{ мм}$ з $\Delta = 30\%$, або обрати пилу цього ж діаметру с $Z_{gr}=6$ та $\Delta = 20\%$. Також можливо обрати пилу з $\varnothing 200 \text{ мм}$ с $Z_{gr}=4$, $Z=132$ та $\Delta = 30\%$, у якої мінімальний крок $T_{min}=3,33 \text{ мм}$, з умови допуску на крок $T \pm 0,3 \text{ мм}$.

Таблиця 2. Значення мінімальних окружних кроків $T_{min} \pm 0,3 \text{ мм}$ [538]

Діа-метр	Число зубів у групі	Не-рівність	Загальна кількість зубів відрізної пили, Z													
			48	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168	180	192	204
200 мм	4	0%	13,08	10,47	8,72	7,48	6,54	5,82	5,24	4,76	4,36	4,03	3,74	3,49	3,27	3,08
		10%	11,77	9,42	7,85	6,73	5,89	5,24	4,71	4,28	3,93	3,63	3,37	3,14	2,95	2,77
		20%	10,47	8,38	6,98	5,98	5,24	4,65	4,19	3,81	3,49	3,22	2,99	2,79	2,62	2,46
		30%	9,16	7,33	6,11	5,24	4,58	4,07	3,67	3,33	3,05	2,82	2,62	2,44	2,29	2,16
	6	0%	13,08	10,47	8,72	7,48	6,54	5,82	5,24	4,76	4,36	4,03	3,74	3,49	3,27	3,08
		10%	11,12	8,90	7,42	6,36	5,56	4,95	4,45	4,05	3,71	3,42	3,18	2,97	2,78	2,62
		20%	9,16	7,33	6,11	5,24	4,58	4,07	3,67	3,33	3,05	2,82	2,62	2,44	2,29	2,16
		30%	7,20	5,76	4,80	4,11	3,60	3,20	2,88	2,62	2,40	2,22	2,06	1,92	1,80	1,69
250 мм	4	0%	16,35	13,08	10,91	9,35	8,18	7,27	6,54	5,95	5,45	5,03	4,68	4,36	4,09	3,85
		10%	14,72	11,78	9,82	8,41	7,36	6,54	5,89	5,36	4,91	4,53	4,21	3,93	3,68	3,47
		20%	13,08	10,47	8,73	7,48	6,54	5,82	5,24	4,76	4,36	4,03	3,74	3,49	3,27	3,08

Діа-метр	Число зубів у групі	Не-рівність	Загальна кількість зубів відрізної пили, Z													
D	Z_{gr}	Δ	48	60	72	84	96	108	120	132	144	156	168	180	192	204
	6	30%	11,45	9,16	7,64	6,54	5,73	5,09	4,58	4,17	3,82	3,52	3,27	3,05	2,86	2,70
		0%	16,35	13,08	10,91	9,35	8,18	7,27	6,54	5,95	5,45	5,03	4,68	4,36	4,09	3,85
		10%	13,90	11,12	9,27	7,95	6,95	6,18	5,56	5,06	4,64	4,28	3,97	3,71	3,48	3,27
		20%	11,45	9,16	7,64	6,54	5,73	5,09	4,58	4,17	3,82	3,52	3,27	3,05	2,86	2,70
		30%	9,00	7,20	6,00	5,14	4,50	4,00	3,60	3,27	3,00	2,77	2,57	2,40	2,25	2,12
315 мм	4	0%	20,60	16,49	13,74	11,78	10,31	9,16	8,25	7,50	6,87	6,34	5,89	5,50	5,15	4,85
		10%	18,54	14,84	12,37	10,60	9,28	8,25	7,42	6,75	6,19	5,71	5,30	4,95	4,64	4,37
		20%	16,49	13,19	10,99	9,42	8,25	7,33	6,60	6,00	5,50	5,08	4,71	4,40	4,12	3,88
		30%	14,43	11,54	9,62	8,25	7,22	6,41	5,77	5,25	4,81	4,44	4,12	3,85	3,61	3,40
	6	0%	20,60	16,49	13,74	11,78	10,31	9,16	8,25	7,50	6,87	6,34	5,89	5,50	5,15	4,85
		10%	17,52	14,02	11,68	10,01	8,76	7,79	7,01	6,37	5,84	5,39	5,01	4,67	4,38	4,12
		20%	14,43	11,54	9,62	8,25	7,22	6,41	5,77	5,25	4,81	4,44	4,12	3,85	3,61	3,40
		30%	11,34	9,07	7,56	6,48	5,67	5,04	4,54	4,12	3,78	3,49	3,24	3,02	2,84	2,67

Щоб забезпечити максимально допустиму кількість переточувань без поломки зубів слід обирати більші значення діаметрів відрізних пил або зменшувати загальну кількість зубів при фіксованому значенні інших параметрів.

Таким чином, згідно табл. 2, визначаємо по рекомендованому мінімально допустимому кроку потрібні параметри нерівномірності Δ та кількість зубів у групі Z_{gr} , а також діаметр D , і загальну кількість зубів Z відрізної пили.

На рис. 11 показано сегмент відрізної пили с групою зубів $Z_{gr}=4$, та параметри, які характеризують нерівномірність зубів.

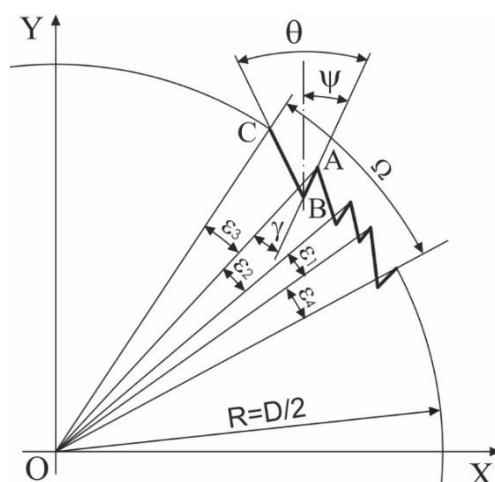


Рисунок 11. Параметри нерівномірності профілів зубів відрізної пили с $Z_{gr}=4$, що характеризують нерівномірність профіля зуба обкатної фрези

Найбільша западина в групі ABC , кутовий крок якої ε_3 , розміщена в вихідному положенні.

Число груп зубів (n) та нормальний кутовий крок пили (ε_z) визначаються як:

$$n = \frac{Z}{Z_{gr}}; \quad \varepsilon_z = \frac{360}{Z} \quad (36)$$

Нерівномірність сусідніх зубів у групі відрізних пил (ε_{gr}), та кут, що охоплюється однією групою (Ω) визначаються за залежностями:

$$\varepsilon_{gr} = \frac{\Delta \cdot \varepsilon_z}{100}, \quad \Omega = \frac{2 \cdot \pi}{n} \quad (37)$$

Значення мінімального кроку зубів в групі буде:

$$\varepsilon_0 = \frac{\Omega - n \cdot \varepsilon_{gr}}{Z_{gr}} \quad (38)$$

Визначення кроку зубів ε_i з різною кількістю їх в групі ($Z_{gr}=2,4,6,8$) наведені в таблиці 3 [550, 555].

Таблиця 3. Кутові кроки зубів в групі

Число зубів в групі	ε_1	ε_2	ε_3	ε_4	ε_5	ε_6	ε_7	ε_8	$\Sigma \varepsilon_{gr}$
$Z_{gr}=2$	ε_0	$\varepsilon_0 + \varepsilon_{gr}$	-	-	-	-	-	-	ε_{gr}
$Z_{gr}=4$	ε_0	$\varepsilon_0 + \varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 2\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + \varepsilon_{gr}$	-	-	-	-	$4\varepsilon_{gr}$
$Z_{gr}=6$	ε_0	$\varepsilon_0 + \varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 2\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 3\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 2\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + \varepsilon_{gr}$	-	-	$9\varepsilon_{gr}$
$Z_{gr}=8$	ε_0	$\varepsilon_0 + \varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 2\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 3\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 4\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 3\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + 2\varepsilon_{gr}$	$\varepsilon_0 + \varepsilon_{gr}$	$16\varepsilon_{gr}$

Вихідні параметри, за якими проводиться розрахунок зовнішнього діаметра дискової обкатної фрези та її проектування наведені в табл. 4.

В основі визначення зовнішнього діаметра дискових обкатних фрез для обробки відрізних пил з нерівномірним кроком лежить її розрахунковий діаметр, тобто радіус. Цей радіус розраховується за формулою (14), яка в розгорнутому виді запишеться:

$$R_{0\min} = \frac{0.5 \cdot D \cdot \sin\left(\frac{\varepsilon_{\max}}{2}\right) + H_{\max} \cdot \sin \gamma}{\sin(\psi + \gamma) \cdot \left[1 - \cos\left(\frac{\varepsilon_{\max} \cdot Z}{2 \cdot Z_{gr}}\right)\right]} \quad (39)$$

Таблиця 4 – Вихідні параметри за якими проектується дискові обкатні фрези

Назва параметру	Позначення
Параметри заготовки відрізної пили, що задаються	
Діаметр	D
Число зубів	Z
Число зубів у групі	Z_{gr}
Товщина	B
Нерівномірність зубів у групі	Δ
Кут профілю канавки зуба (рис. 11)	θ
Передній кут	γ
Параметри заготовки відрізної пили, що розраховуються	
Передаточне відношення та число груп зубів (36)	$U = n = \frac{Z}{Z_{gr}}$
Нерівномірність сусідніх зубів у групі (37)	ε_{gr}
Мінімальний кутовий крок зубів у групі (38)	ε_0
Кутовий крок сусідніх зубів у групі (табл.3)	ε_i
Висота зуба по передній поверхні	$H_{\max} = \frac{\frac{D}{2} - Y_G}{\sin \gamma [ctg \gamma - ctg(\psi + \gamma)]}$ $H_i = H_{\max} - \frac{R \cdot \cos(\gamma - \varepsilon_{\max}) \cdot (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_i)}{\sin \theta}$
Установча відстань між осями відрізної фрези і дискової обкатної фрези	$a = 0.5 \cdot D \cdot \sin(90^\circ - (\psi + \gamma) + 0.5 \cdot \varepsilon_{\max}) - h_{\max} + R_\phi$
Зміщення осі обкатної фрези відносно осі заготовки відрізної пили	$l = 0.5 \cdot D \cdot \sin(\psi + \gamma) - H_{\max} \cdot \sin \psi$
Кут, який характеризує положення передньої площини профілю виробу після повороту	$\psi = 0,5 \theta$
Кут нахилу осі дискової обкатної фрези що до осі відрізної пили	$\sin \beta = \frac{\omega \cdot Y_{Bi}}{\omega_\phi \cdot (Y_{Bi} - a)}$

В загальному випадку розрахунковий допустимий радіус залежить від діаметра пили (D), максимальної глибини стружкової канавки, виміряної по передній поверхні ($H_{\max}$), яка визначається максимальним кутовим кроком ($\varepsilon_{\max}$),

передавальним відношенням Z/Z_0 , та кутом ψ , який приймається рівним половині кута профіля (θ) відрізної пили.

При розробці теоретичних положень проектування дискових обкатних фрез для обробки зубів пил з нерівномірним кроком та доцільності їх використання розглянуто вплив конструктивних параметрів пили на розрахунковий мінімальний діаметр обкатних фрез.

Дослідження впливу конструктивних параметрів пили (діаметр – D , загальна кількість зубів пили – Z , кількість зубів у групі – Z_{gr} , передній кут – γ) на мінімальний розрахунковий діаметр обкатної фрези здійснювалось за залежністю (39).

Аналіз характеру зміни допустимого розрахункового мінімального діаметра обкатної фрези при $Z_{gr}=4$ і $Z_{gr}=6$ показує, що зі збільшенням діаметра відрізної пили та збільшенням кількості зубів з нерівномірним кроком в групі мінімальний діаметр обкатної фрези збільшується, а зі збільшенням загальної кількості зубів пили – зменшується (рис. 12).

Так, для оброблюваної відрізної пили $\varnothing 200$ мм, з $Z=72$ та кількістю зубів з нерівномірним кроком в групі $Z_{gr}=4$ розрахунковий мінімальний діаметр обкатної фрези змінюється від 60 мм до 70 мм в залежності від значення переднього кута пили γ , для пили $\varnothing 315$ мм – 92÷110 мм.

При тих же значеннях конструктивних параметрів оброблюваної пили з нерівномірним кроком в групі $Z_{gr}=6$, мінімальний діаметр фрези для пил $\varnothing 200$ мм лежить в межах 170÷195 мм в залежності від значення переднього кута, відповідно для пил $\varnothing 315$ мм – 270÷300 мм.

Слід відзначити, що менші діаметри фрез відповідають переднім кутам $\gamma=10^\circ$, більші – $\gamma=5^\circ$.

Проведені дослідження показують, що вплив переднього кута пили зменшується зі збільшенням кількості зубів відрізної пили.

Наведений аналіз та аналіз графічних залежностей показує, що утворення зубів пил обкатними фрезами в порівнянні з іншими способами найбільш

доцільне при великій кількості зубів пили. Крім того, з точки зору економії швидкорізальної сталі цільних обкатних фрез, слід рекомендувати обробляти такими фрезами відрізні пили з кількістю нерівномірних зубів в групі $Z_{gr}=4$.

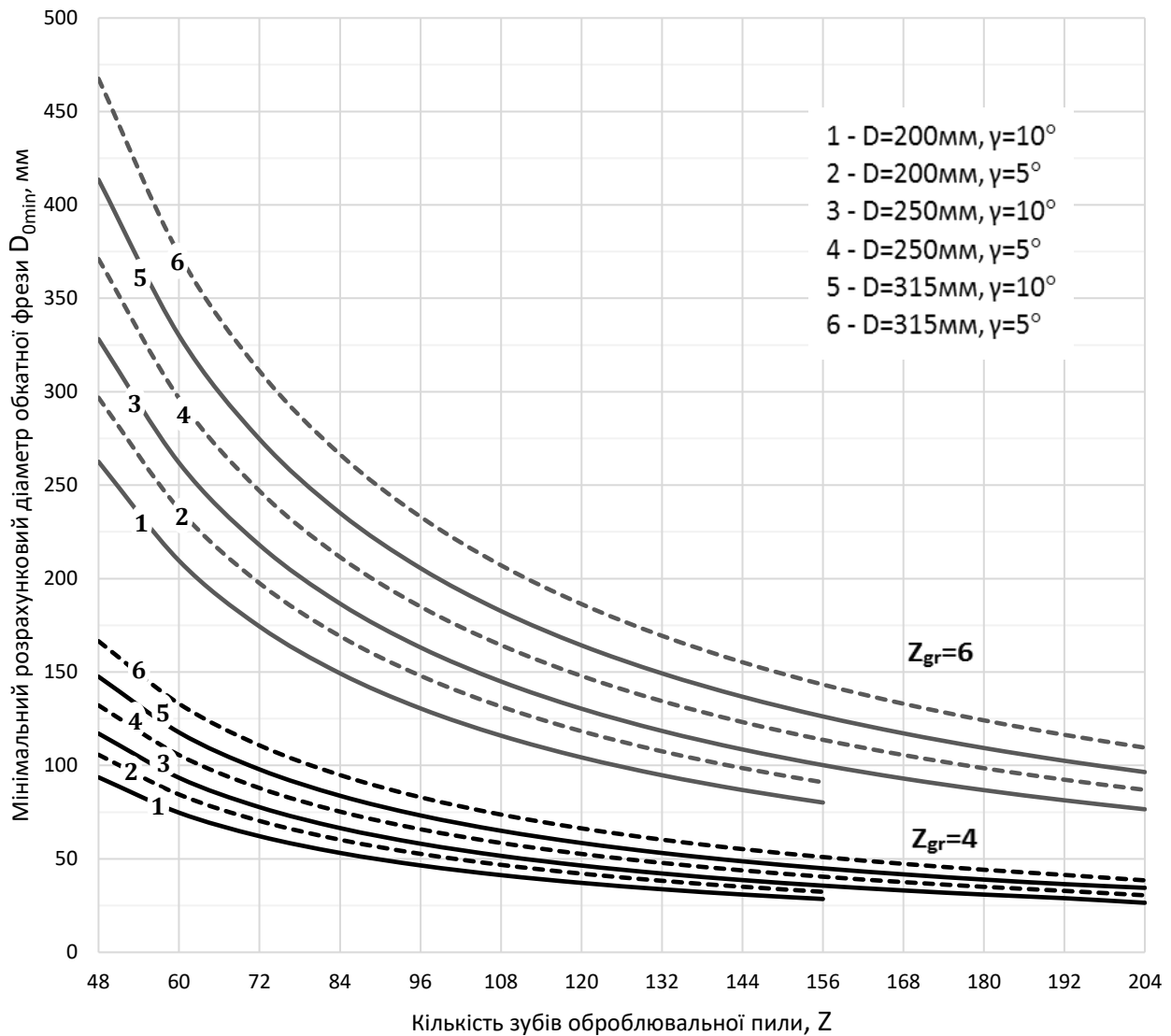


Рисунок 12. Характер зміни розрахункового мінімального діаметра обкатної фрези

Визначивши залежність розрахункових мінімальних діаметрів обкатних фрез від параметрів оброблюваних ними пил при проектуванні фрез необхідно збільшувати їх розрахункові діаметри враховуючи можливість переточок.

Заточування гострозаточених фрез з прямолінійними різальними кромками, що розглядаються, здійснюється по задніх поверхнях [552], по яких, головним чином, відбувається їх знос (рис. 13).

Гострозаточені фрези мають підвищену стійкість і продуктивність та забезпечують зменшення параметрів шорсткості оброблюваної поверхні в порівнянні з затилованими [532, 534].

Форма зубів фрез повинна бути такою, щоб забезпечувалась необхідна міцність зуба, допускалося якомога більша кількість переточувань та об'єм канавок між зубами повинен бути достатнім для розміщення стружки.

Згідно [553] отримана розрахункова формула сточування за одну переточку:

$$h_{cm} = \frac{f_z \cdot \sin \alpha_\epsilon + k}{\cos(\alpha_\epsilon + \gamma_\epsilon)} \cdot \cos \gamma_\epsilon \quad (40)$$

де f_z - фаска зносу по задній поверхні;

k - додатковий припуск на заточку.

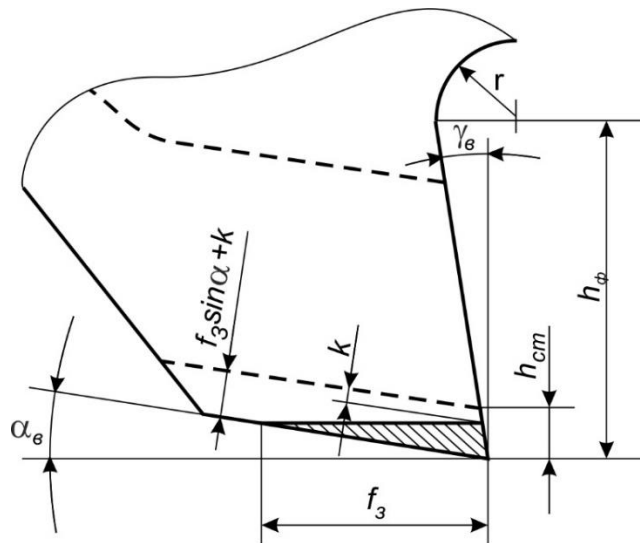


Рисунок 13. Схема зносу гострозаточених фрез

Щоб визначити кількість допустимих переточувань, необхідно знати висоту зуба таких фрез.

Для дискових обкатних фрез з великим зубом висота зуба визначається залежністю:

$$h_{\phi} = (0.3 \dots 0.45) \cdot \frac{\pi \cdot D_{\phi}}{Z_0} \quad (41)$$

де D_{ϕ} - зовнішній діаметр дискової обкатної фрези;

Z_0 – кількість зубів дискової обкатної фрези.

Радіус заокруглення западини канавки зуба [553]

$$r_{\phi} = (0.4 \dots 0.75) \cdot h_{\phi} \quad (42)$$

За рекомендаціями [553] з умови розміщення стружки зуб фрези сточують по висоті на величину не більш ніж $0.75h_{\phi}$. Тобто зуб обкатної фрези можна сточувати до мінімальної висоти $h_{\phi min}$:

$$h_{\phi min} = 0.75 \cdot h_{\phi} \quad (43)$$

За одне переточування, згідно рекомендацій [553] для фрез з швидкорізальних сталей знімається $h_{zm} = 0.3 - 0.5$ мм.

Визначимо мінімальну кількість переточувань зуба обкатної фрези. Прийmemo, згідно (41), що мінімально допустима висота зуба обкатної фрези буде:

$$h_{\phi} = 0.3 \cdot \frac{\pi \cdot D_{0 min}}{Z_0}$$

Тоді можна записати залежність для визначення мінімальної кількості переточок зуба фрези:

$$K_{min} = \frac{0.5 \cdot D_{0 min}}{Z_0} \quad (44)$$

З умови максимально допустимої висоти сточування зуба фрези (43) та формули для розрахунку висоти зуба (41), мінімальний розрахунковий діаметр слід збільшити на величину допустимого сточування зуба.

Таким чином формулу для розрахунку зовнішнього діаметра обкатної фрези з урахуванням переточувань запишемо як:

$$D_{\phi min} = \frac{D_{0 min} \cdot (Z_0 + 0.471)}{Z_0} \quad (45)$$

Визначення зовнішнього діаметра обкатної фрези з урахуванням переточувань, та формули для розрахунку наведені у табл. 5.

При перевірці третьої умови теорії формоутворення було доведено, що при утворенні обкатною фрезою западин зубів пили, при установці її осі перпендикулярно до осі заготовки відрізної пили, в западині зуба виникають перехідні криві. Розмір цих кривих впливає на умови розміщення стружки і має важливе значення. Нормативними документами та фірмами-виробниками визначаються розміри радіуса западин зубів відрізних пил.

Таблиця 5. Зовнішній діаметр обкатної фрези з урахуванням переточувань

№	Параметр	Позначення	Формула
1	Мінімальний розрахунковий зовнішній діаметр, мм	D_{0min}	$D_{0min} = \frac{D \cdot \sin\left(\frac{\varepsilon_{max}}{2}\right) + H_{max} \cdot \sin \gamma}{\sin(\psi + \gamma) \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\varepsilon_{max} \cdot Z}{2 \cdot Z_{gr}}\right)\right)}$
2	Допустима висота зуба, мм	$h_{\phi min}$	$h_{\phi} = 0.3 \cdot \frac{\pi \cdot D_{0min}}{Z_0}$
3	Мінімальна кількість допустимих переточок	K_{min}	$K_{min} = 0.5 \cdot \frac{D_{0min}}{Z_0}$
4	Зовнішній діаметр з урахуванням переточок, мм	$D_{\phi min}$	$D_{\phi min} = \frac{D_{0min} \cdot (Z_0 + 0.471)}{Z_0}$

Наприклад, величина радіуса заокруглення западини зуба за нормами ГОСТ 2679-93 (ISO 2296-72) повинна бути, при діаметрі відрізної пили $D \geq 200 \text{ мм}$, не більш ніж 0,4 мм, а для $D = 315 \text{ мм}$ – не більш ніж 0,5 мм. Згідно європейським стандарти DIN1837, DIN1838, DIN1840 радіуси заокруглення западини зуба залежать від кроку t , та мають дещо більші розміри.

В залежності від загальної кількості зубів та кількості зубів у групі відрізної пили радіуси кривизни перехідних кривих, які утворюються при обробці западини зуба, приймають певні значення, величини яких можуть бути більші або менші ніж радіуси заокруглення западини зуба, що нормуються. Якщо ці радіуси кривизни менші або лежать в межах допуску радіуса заокруглення

западини зуба, прийнятною є установка осі дискової обкатної фрези перпендикулярно до осі відрізної пили.

Для визначення величин радіусів кривизни перехідних кривих, що утворюються в западині зуба при установці осі обкатної фрези перпендикулярно до осі заготовки відрізної пили, використовуються раніше виведені залежності (32-34). При цьому вважаємо відомим мінімальний зовнішній діаметр найбільшого зуба обкатної фрези з урахуванням переточувань, а вершина зуба обкатної фрези не має радіуса заокруглення. Як показали попередні розрахунки, перехідні поверхні більшого розміру виникають на зубі обкатної фрези, що обробляє канавку відрізної пили найменшого кутового кроку.

На рис. 14 показано залежність розміру кривизни перехідних кривих від загальної кількості зубів, кількості зубів у групі, діаметра та товщини оброблювальної відрізної пили.

Найбільший вплив на розміри перехідної кривої (рис. 14) має загальна кількість зубів відрізної пили.

Розміри радіуса кривизни перехідної кривої різко зростають при зменшенні загальної кількості зубів пили. При одному і тому ж оброблювальному діаметрі відрізної пили на розміри перехідних кривих впливає кількість зубів у групі та товщина заготовки пили. Зі збільшенням кількості зубів у групі перехідні криві зменшуються, а при збільшенні товщини диску заготовки відрізної пили – незначно збільшуються, та найменша різниця між значеннями радіуса кривизни перехідної кривої має місце при формоутворенні відрізних пил з малою кількістю зубів і при її збільшенні ця різниця збільшується (рис. 14).

За отриманими даними розрахунків при збільшенні кількості зубів відрізної пили значення радіуса кривизни перехідної кривої наближається до значення нормованого радіуса заокруглення западини зуба пили. Величини цього радіуса згідно ГОСТ 2679-93 (ISO 2296-72) зображені на рисунку 14 двома горизонтальними лініями.

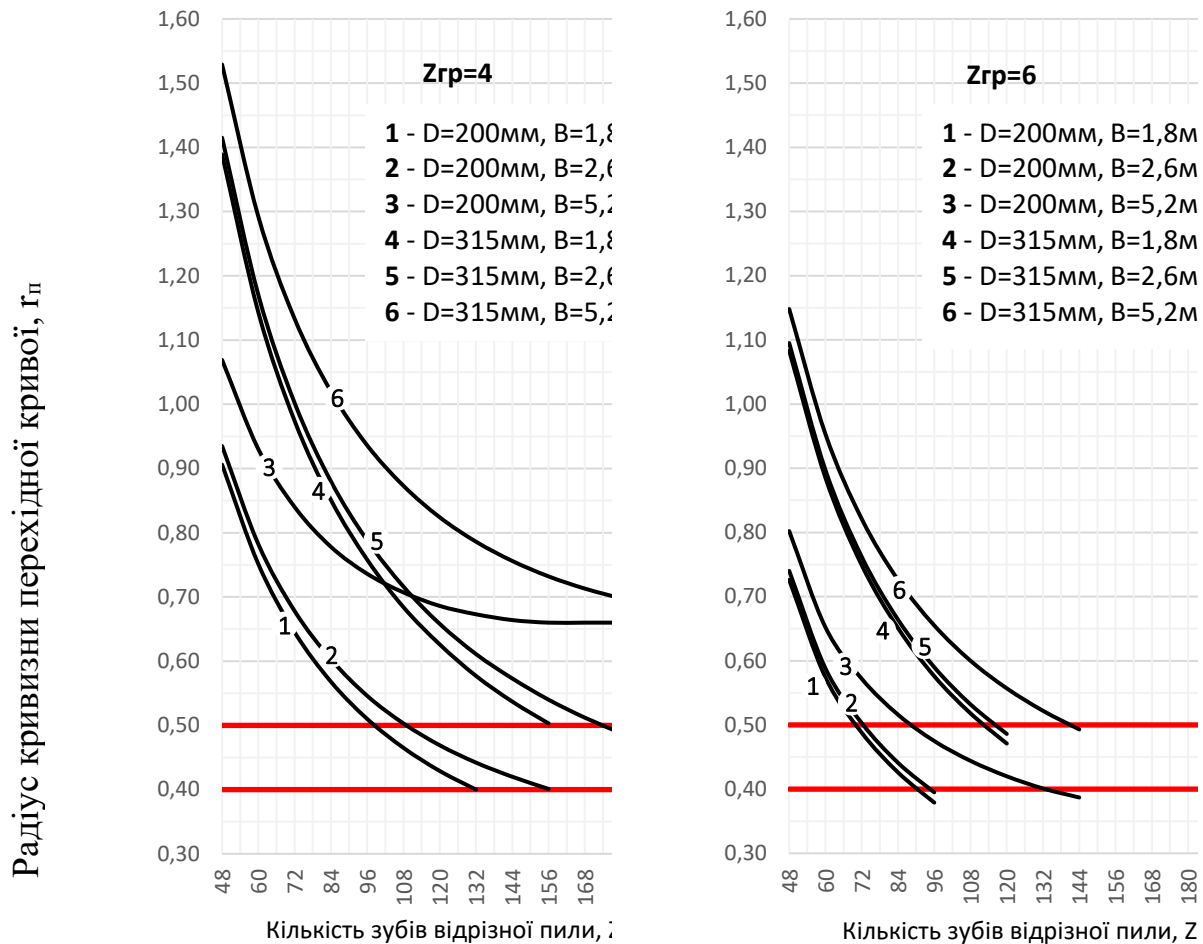


Рисунок 14. Радіуси кривизни перехідних кривих в западині зуба, що має найменший кутовий крок, при $\gamma=10^\circ$

Так, наприклад, при формоутворенні відрізної пили діаметром $D=315\text{мм}$, $Z_{gr}=4$ та $B=1,8\text{мм}$ та кількістю зубів $Z \geq 156$, обкатною фрезою мінімального зовнішнього діаметра, розмір радіуса кривизни перехідної кривої набуває значень $r_n \leq 0,5\text{мм}$, що є в межах допустимого значення за нормативними документами. Теж саме спостерігається, наприклад, при обробці відрізної пили діаметром $D=200\text{мм}$, $Z_{gr}=6$ та $B=2,5\text{мм}$ та кількістю зубів $Z \geq 96$, де радіус заокруглення канавки зуба має бути $r \leq 0,4\text{мм}$.

Таким чином, зі збільшенням загальної кількості зубів відрізної пили можлива обробка при установці осі обкатної фрези перпендикулярно до осі заготовки пили.

При відносно невеликій кількості зубів пили і при установці осі дискової обкатної фрези перпендикулярно до осі відрізної пили виникають порівняно

великі за розмірами перехідні поверхні. Щоб зменшити розміри перехідних поверхонь, та виконати третю умову формоутворення використовують нахилену установку осі дискової обкатної фрези по відношенню до осі пили [533, 545].

Від параметрів відрізних пил залежать діаметри обкатних фрез.

На рис. 15 наведено графік залежності діаметра найбільшого зуба обкатної фрези від конструктивних параметрів відрізних пил з нерівномірним кроком в групі.

З теорії формоутворення зубів відрізних пил обкатними фрезами, для виконання її другої умови, діаметри обкатної фрези можуть збільшуватись, тому є можливість обробляти відрізні пили з різними параметрами, обкатною фрезою одного діаметра, лише використовуючи різну заточку її по задніх поверхнях.

Так, відповідно до рисунка 15 обкатною фрезою діаметра $D=115\text{мм}$ можливо обробляти відрізні пили $D=200\text{мм}$, $Z_{gr}=4$ та $B\geq 1,8\text{мм}$ та загальною кількістю зубів $Z\geq 72$ при установці осі обкатної фрези перпендикулярно до осі відрізної пили. Обкатною фрезою цього ж діаметру можливо також обробляти пили $D=250\text{мм}$, $Z_{gr}=6$ та $B\geq 1,8\text{мм}$ з загальною кількістю зубів $Z\geq 156$.

Однак, з рис. 15 видно, що для формоутворення профілів зубів відрізних пил з невеликою загальною кількістю зубів обкатними фрезами, величини їх діаметрів різко зростають, що унеможливорює використання їх на зубофрезерних верстатах із-за їх розмірів та неекономічного використання інструментального матеріалу, особливо при виготовленні їх із швидкорізальних сталей.

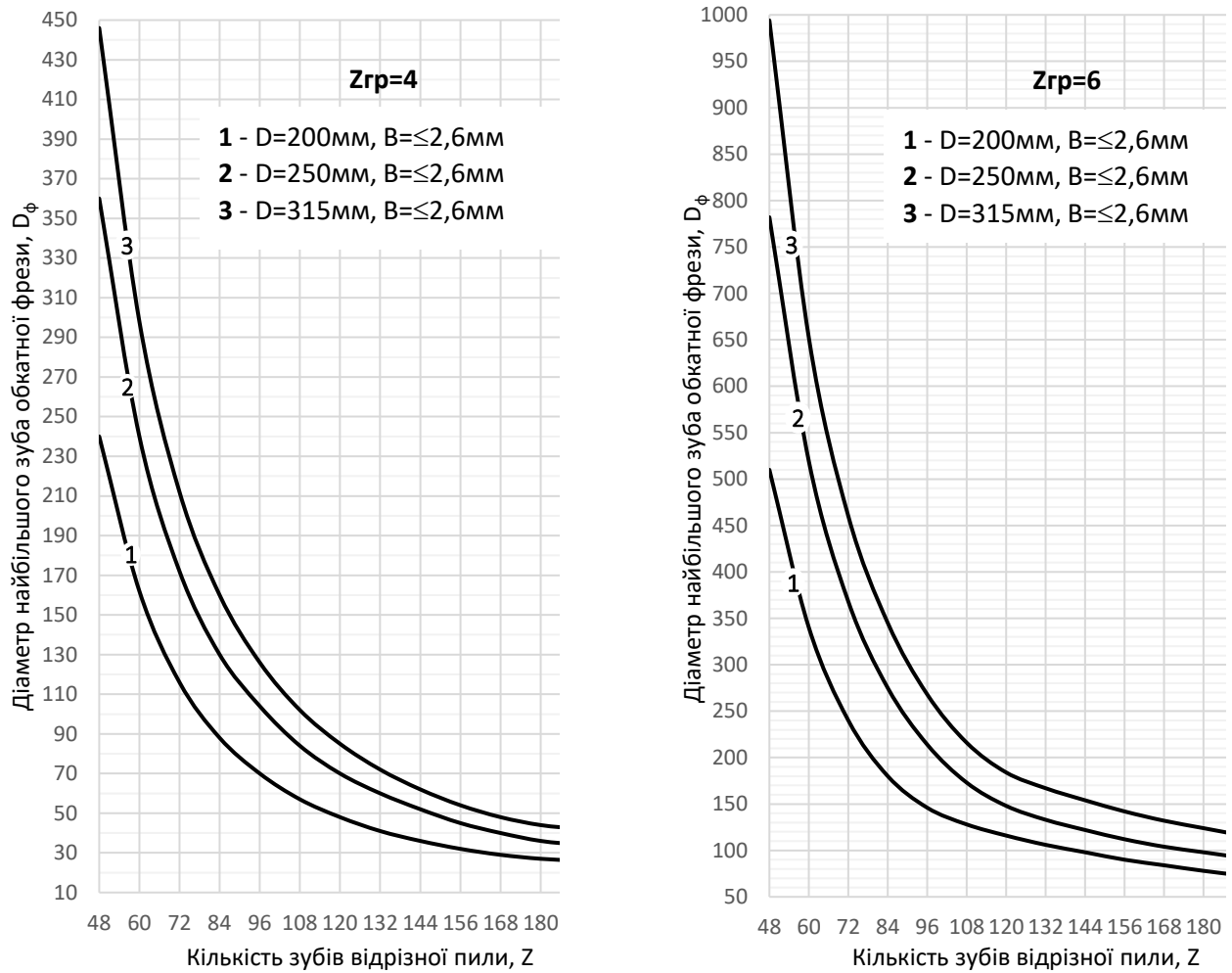


Рисунок 15. Діаметри обкатної фрези для обробки відрізних пил з різними параметрами, при $\gamma=10^\circ$

Таким чином представлена теорія являє собою теоретичну основу розробки обкатних фрез для обробки відрізних пил незалежно від профілю зуба пили та програм для їх виготовлення на верстатах с ЧПК, що найефективніше здійснюється на основі автоматизованого проектування обкатних фрез.