

УДК 621.91.01

DOI: 10.15587/1729-4061.2021.231779

Визначення товщини зрізаного шару пилками з різнонаправленими зубцями

О. А. Охріменко, В. В. Вовк, С. В. Майданюк, Ю. В. Лашина

Для прогнозування працездатності конструкції інструмента на стадії його проектування необхідно провести розрахунок параметрів зрізаного шару таким інструментом, оскільки величина зрізаного шару визначає силові та динамічні характеристики процесу різання.

Відомо, що на величину та форму зрізаного шару впливає схема різання припуску, закладена в конструкцію інструмента. Тому параметри зрізаного шару інструментом необхідно досліджувати з урахуванням реальних форм та розташування різальних кромок зубців інструмента та схеми різання окремими зубцями.

Існуючі аналітичні залежності по визначенню товщини зрізаного шару не враховують групового розташування зубців, які мають різну форму та розташування їх різальних кромок. Тому запропоновано методика аналітичного визначення товщини зрізаного шару, на прикладі дискових пил з різнонаправленими зубцями, з урахуванням особливостей розташування різальних кромок окремих зубців та реальних рухів інструмента в процесі його роботи.

Запропонована методика дозволяє визначати параметри зрізаного шару інструментом як з постійною, так і з прогресивною схемами різання припуску. Крім того, можна визначити параметри зрізаного шару в довільний момент роботи інструмента та аналізувати зміну форми зрізу у часі.

На основі аналізу параметрів зрізаного шару встановлено, що пилки з різнонаправленими зубцями працюють не всією шириною різальної кромки, а лише її частиною, частка якої не перевищує 55 % ширини інструмента.

Наведена методика може використовуватися для визначення завантаження різальної частини інструментів з більш складною схемою різання, до якої також відносяться інструменти що працюють методом обкатки.

Ключові слова: товщина зрізаного шару, дискова пила, схема різання припуску, різальна кромка, форма різальної кромки, різнонаправлені зубці.

1. Вступ

При розробці нових чи вдосконаленні існуючих конструкцій інструмента на етапі проектування постає задача прогнозування його працездатності. Найкращим з методів встановлення працездатності є проведення лабораторних та промислових досліджень, які також дають змогу ще й встановити вплив конструктивних параметрів інструмента та режимів оброблення на якісні характеристики обробле-

ної деталі. Проте проведення таких досліджень в повному обсязі потребує значних економічних та часових затрат.

Зменшити витрати на проведення досліджень можливо методами комп'ютерного моделювання, які дозволяють дослідити поведінку інструмента в процесі його роботи та оцінити характеристики оброблених поверхонь. Подібні методи хоча і є дещо спрощеними через певні припущення, проте відображають взаємозв'язок досліджуваних параметрів і дозволяють визначитися з подальшим напрямком досліджень.

Розробка моделей різання і прогнозування працездатності інструмента потребує точного опису характеристик процесу різання, на які суттєвий вплив мають параметри зрізуваного шару. Параметри зрізуваного шару визначають силові навантаження інструмента, впливають на потужність тепловиділення в зоні різання. Зміна площі зрізуваного шару в часі викликає відповідні зміну зусиль різання, вносить додаткову динамічну складову в процес різання, що негативно впливає в на якість обробленої поверхні та стійкість інструменту.

Визначення параметрів зрізуваного шару є актуальною задачею, вирішення якої дає змогу вже на етапі проектування інструмента прогнозувати параметри процесу різання, аналізувати можливості зменшення вібрацій внесенням змін в конструкцію інструмента.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботах [1–3] наводиться загальний підхід до визначення зрізуваного шару інструментом та визначаються фактори, що впливають на його формування. Також в [1–3] наведені аналітичні залежності визначення параметрів зрізуваного шару різними інструментами, до яких відносяться переріз, товщина, ширина та довжина зрізуваного шару [4]. Але, при визначенні параметрів зрізуваного шару при обробленні фрезами, до яких відносяться і дискові пилки, прийняті спрощення. Процес різання фрезами складається з двох рухів: головного – обертання фрези навколо осі, та руху подачі – поступального руху. Таким чином, траєкторія руху зубців фрези буде циклоїдою. В роботах [1–3] траєкторія зубців інструмента розглядається у вигляді дуги кола, що значно спрощує розрахунки. Але розглядаються інструменти що працюють за одинарною схемою різання припусків, у яких різальна кромка кожного зубця, за формою, розмірами та розташуванням, не відрізняється від інших зубців. В роботах [1–3], окрім того, відзначається, що параметри зрізуваного шару характеризують завантаження різальних кромки інструмента та, разом зі швидкістю різання, визначають силові, динамічні та теплові характеристики процесу різання.

Дослідження, наведені в роботах [5, 6], показують, що товщина зрізуваного шару є визначальним чинником, що впливає на сили різання при фрезеруванні. В роботі [5] досліджувався вплив товщини зрізуваного шару на середні та миттєві сили різання. Проте розрахунки товщини зрізуваного шару також проведено за наближеними залежностями, як і в роботах [1–3]. В роботі [6] наводиться методи-

ка моделювання сил різання при фрезеруванні на підставі точного визначення товщини зрізаного шару. До того ж, на відміну від попередніх робіт, за траєкторію руху зубців фрези прийнято циклоїдний рух. Проте, розглядається стандартна фреза, у якої всі зубці мають однакову форму та розташування різальної кромки.

Окрім того, в роботах [7, 8] показано, що на динамічні характеристики процесу різання впливає також характер зміни товщини зрізаного шару [7] та швидкість його зростання та спадання [8]. Але в роботах досліджуються лише інструменти, які працюють за одинарною схемою зрізання припуску.

Вплив параметрів режимів різання, стратегії оброблення та зрізаного шару на силові характеристики процесу різання присвячено ряд робіт [9–11]. В роботах наведені різні підходи по уточненню моделей стружкоутворення та їх вплив на процес різання при точінні [9], фрезеруванні [10] та мікрорізанні [11]. Розглядаються різні стратегії, режими різання та припущення для інструментів з одинарною схемою зрізання припуску.

В роботі [12] описано метод розрахунку товщини зрізаного шару при торцевому фрезеруванні з використанням кругової інтерполяції в порівнянні з лінійною. В роботі [13] проводилося моделювання траєкторії зубця торцевої фрези для лінійного, дугового та профільного фрезерування та отримані залежності товщини зрізаного шару, кутів входу та виходу зубця інструмента із заготовки. В наведених роботах уточнюються залежності визначення параметрів зрізаного шару, відповідно до траєкторій руху інструментів. Але розглядаються стандартні конструкції інструментів, що працюють за одинарною схемою зрізання припуску.

З метою визначення параметрів зрізаного шару з більш високою точністю, в роботі [14] запропоновано новий підхід. Пропонується замість вирішення систем рівнянь траєкторій зубців чисельним методом апроксимувати їх рядом Тейлора, тим самим спростивши отримані залежності.

Існуючі методики хоча і враховують дійсну траєкторію руху зубців фрези, проте вони призначені для інструментів, які працюють з постійною схемою зрізання припуску. Зубці таких інструментів мають однакову форму, розміри та розташування, як наприклад, у дискових пилок [15].

Поряд з цим, існують інструменти, що працюють за груповою схемою зрізання припуску, у яких форма та / або розміри різальної кромки зубців у групі відрізняються один від одного.

До таких конструкцій інструмента відносяться дискові пилки [16], зубці яких згруповані по два (рис. 1, *а*) або більше (рис. 1, *б*). Відповідно до досліджень [2, 3] характер утворення зрізаного шару та його параметри, для таких інструментів, відрізняється від інструментів з одинарною схемою зрізання припуску.

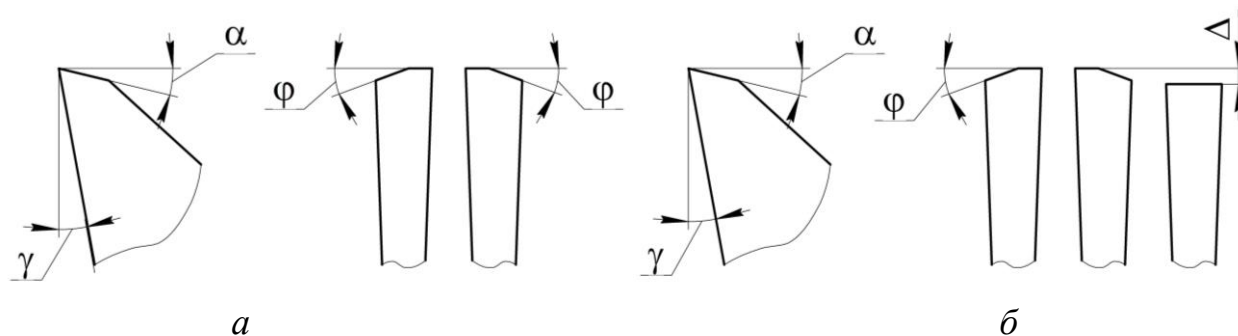


Рис. 1. Форма зубців пилок [16]: *a* – група схема з двох зубців; *б* – група з трьох зубців

Використання групової схеми розташування зубців, як відзначається в роботах [1–3], дозволяє зменшити навантаження на кожний окремий зубець і на інструмент в цілому. Окрім того, така схема зрізання припуску дозволить зменшити сили різання [1–3]. Але характеристики зрізуваного шару для таких інструментів не визначені, що пов'язано з труднощами розрахунків.

Дослідження [17] проведені для визначення впливу форми зубців пилки на швидкість різання інструментом, показали що за рахунок зміни форми зубців можна досягти зменшення вібрацій пилки в процесі її роботи та більшої динамічної стійкості. Але дослідження стосувалися лише пилок, у яких зубці були однакової форми та розмірів. Дослідження групової схеми розташування зубців не проводилося.

Різальна кромка зубців пилок (рис. 1) визначається розташуванням передньої та задньої поверхонь зубців [4]. Передня поверхня розташована під переднім кутом γ ; задня поверхня розташовується під двома кутами: заднім кутом α та кутом скоса, відповідно задня поверхня є поверхнею загального положення. Таким чином, різальна кромка у таких фрез буде лінією загального положення. Положення різальної кромки буде визначатися кутом в плані та кутом нахилу кромки. До того ж, зубці по чергово скошені [16], тобто чергуються один за одним.

Таке розташування зубців пилки призводить до того, що пилки [16], на відміну від пилок [15], працюють в умовах косокутного різання. А як відзначається в роботах [1–3], косокутне різання призводить до зменшення товщини зрізуваного шару, силових та динамічних характеристик процесу різання.

Вплив косокутного різання на процес різання досліджувався в роботі [18]. Експериментально встановлено, що збільшення кута нахилу кромки λ призводить до зменшення товщини зрізуваного шару.

Таким чином, розташування різальної кромки під кутом нахилу кромки λ сприяє покращенню умов різання. Але групова схема зрізання припуску не досліджувалася, оскільки таке розташування зубців (по два в групі (рис. 1, *a*) та по три (рис. 1, *б*)), спричиняє складнощі з визначення параметрів зрізуваного шару.

Через те, що кожний зубець пилки (рис. 1, а) має різні за значенням кути в плані φ та нахилу кромки λ , в процесі різання в кожного зубця буде своя поверхня різання. Ця поверхня буде відмінною від поверхні різання попереднього зубця. І тому визначення товщини зрізуваного шару як довжини нормалі до поверхні різання, обмеженої положеннями поверхонь різання двох сусідніх зубців буде некоректним.

Тому при визначенні завантаження кромки пил постає задача визначення розмірів перерізів зрізуваного шару, тобто товщини зрізів та активної довжини різальної кромки, які є залежними від кутів в плані φ та нахилу кромки λ .

Загальна методика аналітичного визначення товщини зрізуваного шару a в довільній точці різальної кромки будь-якого інструмента наведена в роботі [19], а залежність для підрахунку має вид (1):

$$a = \frac{\left(\bar{N} \cdot \bar{S} \right)}{\bar{N}}, \quad (1)$$

де \bar{N} – вектор нормалі до поверхні різання в досліджуваній точці; \bar{S} – вектор подачі.

За наведеною залежністю (1) для кожного зубця інструмента можна розрахувати товщини зрізуваного шару в довільній точці його різальної кромки в будь-який момент роботи інструмента.

Але в дослідженнях [10–14, 18, 19] не показано, як впливає форма різальної кромки зубця інструмента на параметри зрізуваного шару, і яким чином потрібно враховувати групове розташування зубців інструмента.

В роботі [20] наведено методику визначення параметрів зрізуваного шару дискових пилок, які працюють за груповою схемою зрізання припуску, за допомогою САД систем. Показано, що товщина зрізуваного шару зубцем визначається розташуванням різальних кромки досліджуваного зубця та попереднього зубця, оскільки форми поверхонь різання зубців є відмінними. Однак, хоча така методика і є наглядною, проте для автоматизації розрахунків є непридатною.

Аналіз робіт [1–19] показав, що існуючі методики визначення товщини зрізу стосуються лише інструментів які працюють за одинарною схемою різання, крім того деякі з них є наближеними. Лише в роботі [20] показано визначення товщини зрізуваного шару, з використанням САД систем, для інструментів зубці яких зібрані в групи. Проте ця методика не може бути застосована для автоматизованого розрахунку параметрів зрізуваного шару. Тобто існує проблема визначення параметрів зрізуваного шару для інструментів з груповою схемою різання.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є визначення параметрів зрізуваного шару дисковими пилками, що працюють за груповою схемою зрізання припуску. Це дасть можливість створення точних моделей процесів різання пилками з різнонаправленими зубцями.

ми. Крім того, проведення відповідного аналізу дозволить знизити динамічну складову процесу різання і, відповідно, підвищити стійкість інструменту та якість оброблених поверхонь.

Для досягнення поставленої мети було поставлено наступні задачі:

- розробити методику визначення параметрів зрізуваного шару для дискових пил з різнонаправленими зубцями;
- провести розрахунок параметрів зрізуваного шару дисковими пилами з різнонаправленими зубцями.

4. Матеріали та методи дослідження параметрів зрізуваного шару дисковим інструментом, що працює за груповою схемою зрізання припуску

Визначення параметрів зрізуваного шару інструментом, з врахуванням кінематики процесу різання, виконано за допомогою системи символічних обчислень. Застосування такого підходу спричинено складністю математичного опису процесу різання інструментом з груповою схемою зрізання припуску та великою кількістю взаємопов'язаних рівнянь. Окрім того, системи символічних обчислень є наочними та дозволяють легко і просто виконувати символічне диференціювання, інтегрування, підстановку виразів та спрощення формул.

В результаті розгляду розрахункової схеми, яка відображає кінематику процесу різання та визначення необхідних векторів, отримується система рівнянь, результатом розв'язку якої є товщина зрізуваного шару. Оскільки рівняння, що входять в систему, визначаються в символічному вигляді, то розв'язок задачі відбувається в системі автоматизованого проектування Mathcad (PTC Inc., USA), що дозволяє проводити розрахунки для великого масиву розрахункових точок та положень.

5. Визначення параметрів зрізуваного шару пилами з різнонаправленими зубцями

5.1. Методика аналітичного визначення параметрів зрізуваного шару дисковими пилами з різнонаправленими зубцями

Відповідно [15, 16], зубці дискових пил для оброблення металів можуть мати різні форми різальних кромки, розташованих в осьовій площині: прямолінійну та ламану – з різним розташуванням і чергуванням фасок на зубцях.

Таке різноманіття форм різальних кромки дискових відрізних фрез пов'язане зі складними умовами протікання процесу відрізання металів, а ускладнення конструкції різальних зубців направлене на підвищення стійкості інструмента та продуктивності оброблення.

Однією з конструкцій пилки, направлена на зниження силових характеристик та підвищення динамічної стійкості інструменту в процесі різання є дискова пилка з різнонаправленими зубцями. Конструкція такої пилки для різання металів складається з двох зубців у групі, різальні кромки яких розташовані з різними за знаком кутами в плані φ та кутами нахилу кромки λ (рис. 2).

Для вирішення задачі по визначенню товщини зрізаного шару запропонована наступна розрахункова схема (рис. 3).

Система координат $S(X, Y, Z)$ є нерухомою (рис. 3). Вісь обертання фрези завжди паралельна осі Z і рухається у площині XZ в напрямку подачі S_0 (подачі на оберт пилки), якщо подача попутна – то протилежно напрямку осі X , для зустрічної подачі – за напрямком осі X .

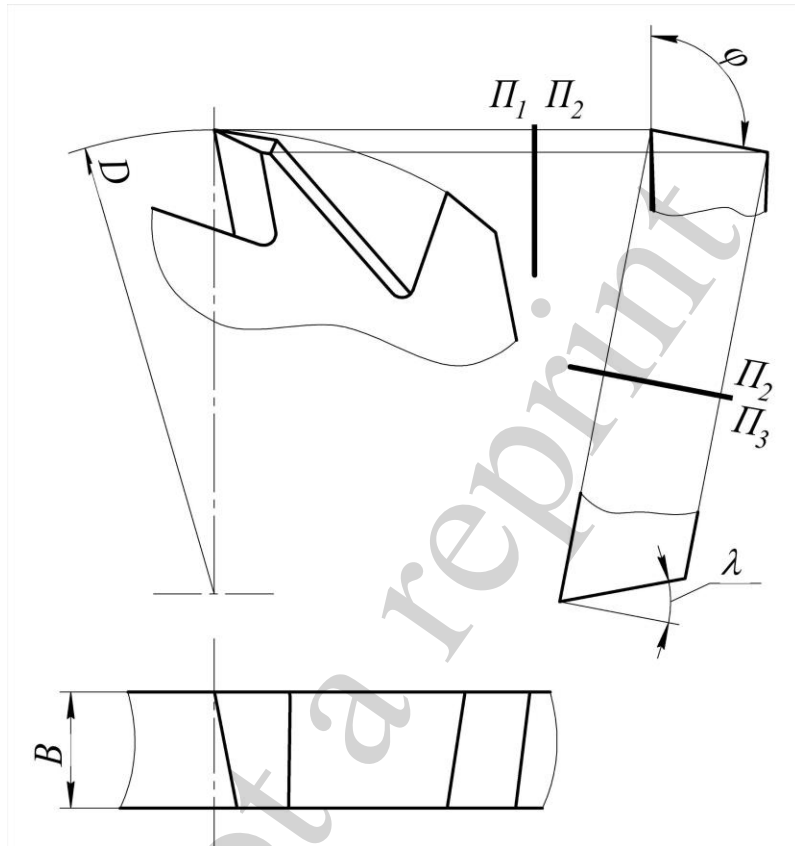


Рис. 2. Форма зубців досліджуваної пилки

Положення у просторі зубця пилки при його обертанні навколо осі інструмента задається кутом повороту t , поворот інструмента відбувається проти годинникової стрілки.

Положення різальної кромки зубця пилки задається головним кутом в плані ϕ та кутом нахилу різальної кромки λ . Положення досліджуваної точки M на різальній кромці задається параметром u , який відповідає координаті Z цієї точки.

Верхня площина заготовки розташована, відносно осі інструмента, на відстані h (рис. 3).

Для визначення товщини зрізаного шару спочатку визначимо рівняння різальної кромки інструмента з різнонаправленими зубцями, розташованими у шаховому порядку.

Відповідно до схеми (рис. 3) рівняння різальної кромки у векторній формі буде описане залежністю (2):

$$K(u, n) = \begin{pmatrix} \frac{-u \cdot (-1)^n + B \cdot \frac{(-1)^n - 1}{2} \cdot \operatorname{tg} \lambda}{\sin(\varphi \cdot (-1)^n)} \\ \frac{D}{2} - \left(-u \cdot (-1)^n + B \cdot \frac{(-1)^n - 1}{2} \right) \cdot \operatorname{ctg} \varphi \\ u \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де u – параметр, що відповідає за положення досліджуваної точки на різальній кромці (рис. 3); n – номер досліджуваного зубця, що здійснює різання (нумерація зубів починається з 0 (рис. 3)).

Визначимо рівняння поверхні різання, що утворюється такою різальною кромкою (2) при її русі в процесі роботи.

Для цього спочатку запишемо матрицю афінного перетворення, що описує обертальний рух інструмента (головний рух різання) та одночасно прикладений до його осі поступальний рух (рух подачі – S_0):

$$m_t(t, n) = \begin{pmatrix} \cos(t + \theta \cdot n) & -\sin(t + \theta \cdot n) & 0 & S_0 \cdot t \\ \sin(t + \theta \cdot n) & \cos(t + \theta \cdot n) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де t – параметр руху, що відповідає куту повороту інструмента навколо своєї осі (рис. 3); S – параметр поступального переміщення, що відповідає переміщенню фрези вздовж осі X (рис. 3).

Параметр руху t обмежується кутом контакту досліджуваного зубця з оброблюваною заготовкою та знаходиться в межах: $t_{\text{поч}} \leq t \leq t_{\text{кін}}$, де початкове значення кута контакту $t_{\text{поч}}$ визначається із залежності $P_{nY}(u, t, n) = h$, а кінцеве значення $t_{\text{кін}}$ – із залежності $P_{nY}(u, t, n) = h - H$.

Параметр переміщення S визначається величиною та знаком. Знак параметра S визначається напрямком руху інструмента: у випадку зустрічної подачі – “+ S ”, у випадку попутної “– S ”.

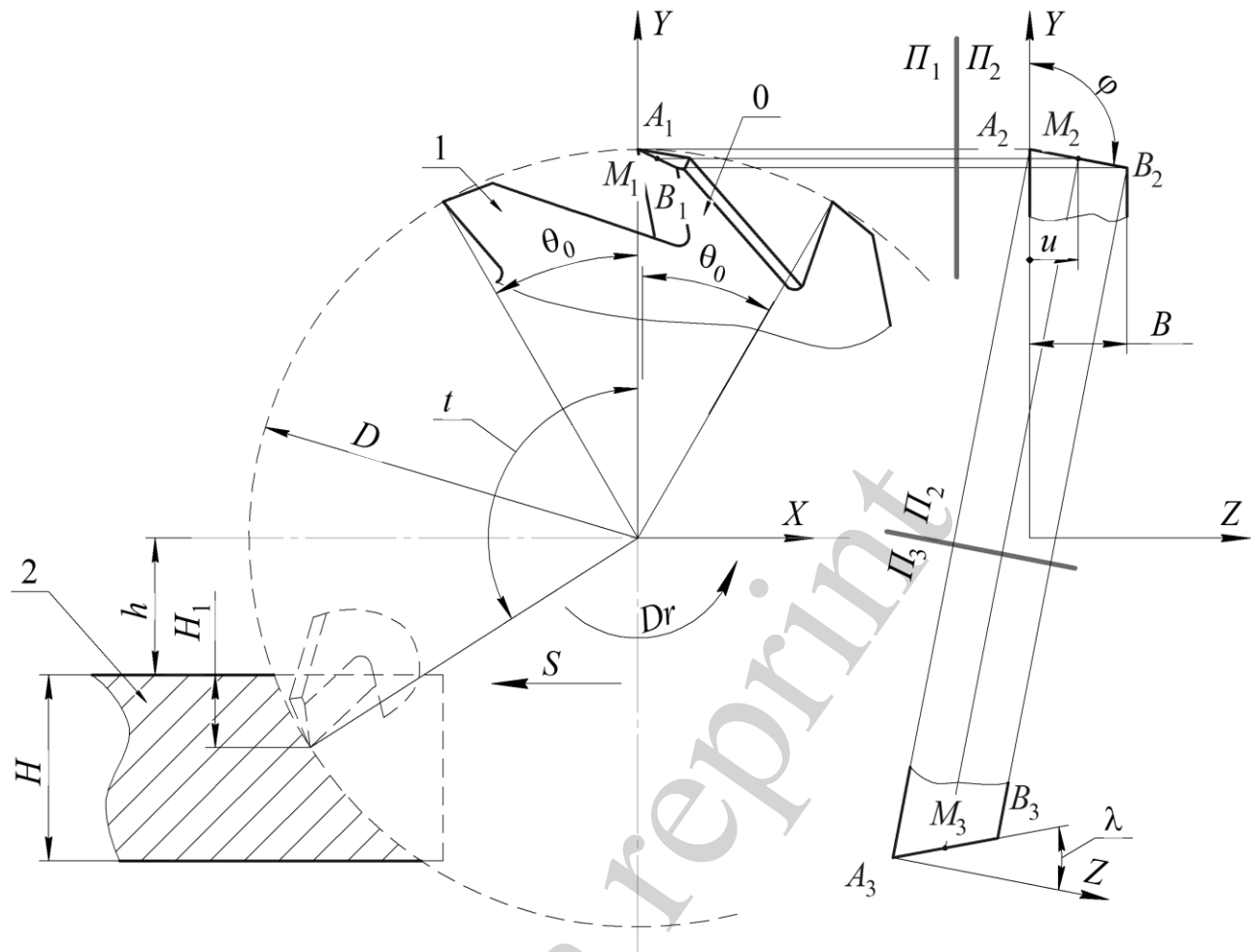


Рис. 3. Розрахункова схема визначення товщини зрізаного шару пилкою з різнонаправленими зубцями: D – зовнішній діаметр пилки, B – ширина пилки, θ_0 – кутовий крок зубців в середньому перерізі пилки, AB – граничні точки різальної кромки, M – досліджувана точка різальної кромки, h – положення заготовки відносно осі пилки, H – висота заготовки, H_1 – положення досліджуваного зубця відносно верхньої площини заготовки; 0 – зубець номер 0 (досліджуваний зубець), 1 – зубець номер 1 (попередній зубець), 2 – заготовка

Величина параметра переміщення пов'язана з величиною подачі інструмента на оберт S_0 чи величиною подачі на зубець S_z та кількістю зубців z і визначається залежністю (4):

$$S = \frac{S_0}{2 \cdot \pi} = \frac{S_z \cdot z}{2 \cdot \pi}. \quad (4)$$

Кутовий крок зубців θ_0 в середньому перерізі пилки пропорційний кількості зубців z та визначається залежністю (5):

$$\theta_0 = \frac{2\pi}{z}. \quad (5)$$

Таким чином, рівняння поверхні різання будь-якого зубця інструмента в процесі його роботи, тобто при обертанні його навколо осі пилки та поступальному русі з величиною подачі S_0 або S_z , визначатиметься залежністю (6):

$$R(u, t, n) = m_t(t, n) \cdot K(u, n). \quad (6)$$

Для знаходження товщини зрізаного шару a в досліджуваній точці різальної кромки запишемо вектор нормалі до поверхні різання.

Знаючи рівняння поверхні різання (4), при фіксованому значенні параметру n (номер досліджуваного зубця), нормаль до поверхні різання визначатиметься як векторний добуток рівняння поверхні різання з часткових похідних по незалежним параметрам u, t .

Вектор нормалі повинен бути направлений обов'язково в тіло заготовки.

Для зручності, рівняння нормалі запишемо в одиничному вигляді (7):

$$\begin{aligned} V(u, t, n) &= \frac{\partial}{\partial t} R(u, t, n); \\ \tau(u, t, n) &= \frac{\partial}{\partial u} R(u, t, n); \\ NP_n(u, t, n) &= \frac{-(V(u, t, n) \times \tau(u, t, n)) \cdot (-1)^n}{|V(u, t, n)| \cdot |(u, t, n)|}. \end{aligned} \quad (7)$$

Товщина зрізаного шару буде визначатися як найменше невід'ємне значення параметру a при перетині нормалі NP_n з поверхнями різання окремих зубців, різання яких у часі відбулося раніше, тобто тих зубців, у яких параметр n має більше значення ніж у досліджуваного зубця.

У випадку, якщо значення товщини зрізаного шару a буде від'ємним – зрізування матеріалу не відбувається.

Рівняння одиничної нормалі NPO_n до поверхні різання (7) в досліджуваній точці різальної кромки визначатиметься залежністю (8):

$$NPO_n(u, t, n, l) = \begin{pmatrix} R_x(u, t, n) + NP_{nx}(u, t, n) \cdot l \\ R_y(u, t, n) + NP_{ny}(u, t, n) \cdot l \\ R_z(u, t, n) + NP_{nz}(u, t, n) \cdot l \end{pmatrix}, \quad (8)$$

де R_x, R_y, R_z – складові, по відповідним осям координат, поверхні різання досліджуваного зубця (6); NP_x, NP_y, NP_z – складові, по відповідним осям координат, вектора нормалі до поверхні різання досліджуваного зубця (7); l – параметр, що відповідає довжині нормалі до поверхні різання досліджуваного зубця.

Товщина зрізуваного шару визначається як мінімальне значення параметру l із залежностей (9):

$$a = \min(l_1, l_2, l_3, l_4) \Leftarrow \begin{cases} P_n(u_1, t_1, n+1) = NP_{n_0}(u, t, n, l_1); \\ P_n(u_2, t_2, n+2) = NP_{n_0}(u, t, n, l_2); \\ h = NP_{n_0}(u, t, n, l_3); \\ h - H = NP_{n_0}(u, t, n, l_4), \end{cases} \quad (9)$$

де u_1, t_1 – незалежні параметри, що описують поверхню різання попереднього зубця, що приймав участь в процесі різання раніше досліджуваного; u_2, t_2 – незалежні параметри, що описують поверхню різання другого попереднього зубця, що приймали участь в процесі різання раніше досліджуваного.

Останні два рівняння в залежностях (9) є рівняннями перетину нормалі до поверхні різання з граничними поверхнями заготовки (рис. 3).

5. 2. Розрахунок параметрів зрізуваного шару дисковими пилами з різнонаправленими зубцями в часі та вздовж кромки

За наведеною схемою (рис. 3) та отриманими залежностями (1)–(9) проведено розрахунки параметрів зрізуваного шару a для дискової пилки з різнонаправленими зубцями. Розміри пилки: діаметр $D=200$ мм, ширина $B=3$ мм, кількість зубців $z=64$, геометрія зубців: $\varphi=115^\circ$, $\lambda=-20^\circ$. Режими різання – подача попутна $S_z=0,05$ мм/зуб. Параметри заготовки (рис. 3): висота заготовки $H=40$ мм, положення заготовки відносно осі пилки $h=50$ мм.

Результати розрахунків розподілення товщини зрізуваного шару a в залежності від розташування досліджуваного зубця пилки на шляху різання та по ширині інструмента B наведені на рис. 4.

Зміна форми зрізуваного шару матеріалу зубцем пилки, в залежності від шляху різання та параметра t показана на рис. 5. Умови досліджень відповідають умовам до рис. 4.

На рис. 5 показано механізм формування зрізуваного шару окремим зубцем дискової пилки з різнонаправленими зубцями в процесі роботи. Видно, що на форму та параметри зрізуваного шару зубцем пилки, в процесі його роботи, впливають два попередні зубця.

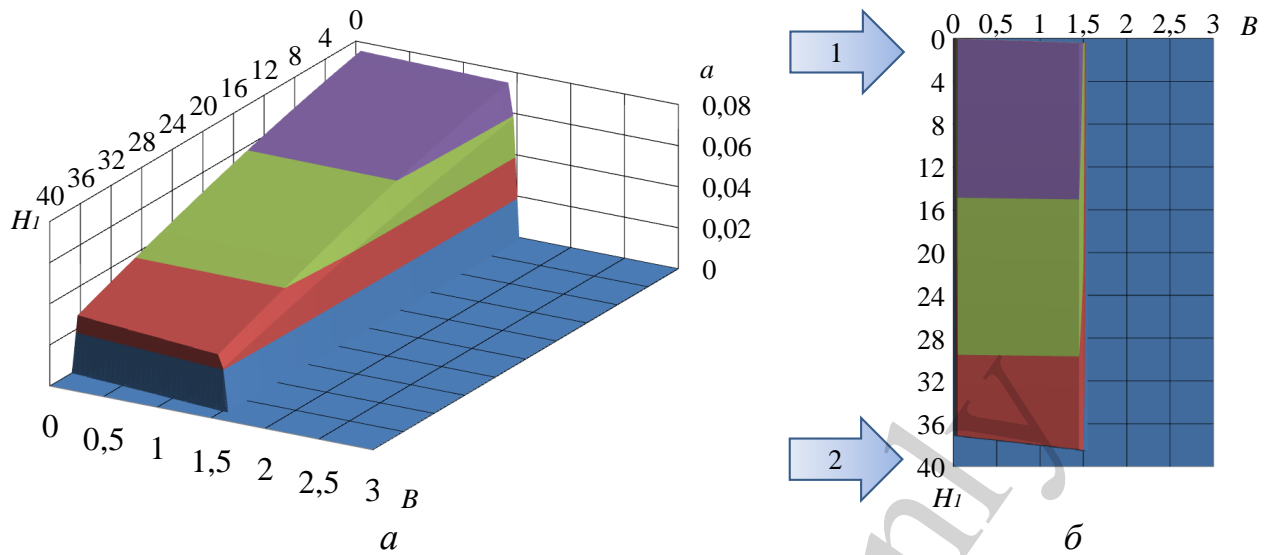


Рис. 4. Розподілення товщини зрізаного шару: *a* – в залежності від розташування зубця, на шляху різання; *б* – по ширині інструменту: 1 – врізання в заготовку; 2 – вихід із заготовки

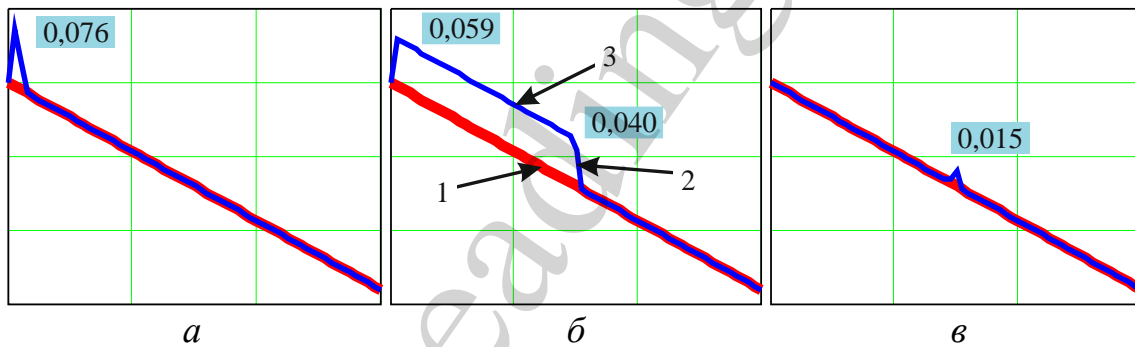


Рис. 5. Форма та товщина зрізаного шару матеріалу зубцем пилки з різнонаправленими зубцями, в залежності від шляху різання: *a* – на вході в заготовку; *б* – в середині заготовки; *в* – на виході із заготовки; 1 – різальна кромка, 2 – границя зрізаного шару, сформована попереднім зубцем, 3 – границя зрізаного шару, сформована другим попереднім зубцем

6. Обговорення результатів дослідження товщини зрізаного шару дисковими пилками з різнонаправленими зубцями

Як показали результати розрахунків:

– товщина зрізаного шару зубцем пилки не постійна як на шляху різання, по висоті заготовки, так і по ширині пилки (рис. 4, *a*), максимальне значення становить $a_{\max}=0,076$ мм (рис. 4, *a*);

– ширина зрізаного шару (рис. 4, *a*) менша за ширину зубця пилки, на відміну від дискових пил, у яких кут нахилу кромки $\lambda=0$, найбільша ширина становить 0,55 *B*.

Результати розрахунків корелюються з результатами, наведеними в роботі [20], які отримані на основі графічного методу визначення параметрів зрізуваного шару за допомогою комп'ютерних систем 3D проектування.

Такі результати пояснюються просторовим розташуванням різальної кромки – під кутом в плані φ та кутом нахилу кромки λ [1–3]. Окрім того, таке розподілення товщини зрізуваного шару призводить до більш плавного зростання сили різання, що позитивно впливає на стійкість інструмента [5, 6] та його динамічні характеристики [7, 8].

Аналіз досліджень (рис. 4, б) показав що, за рахунок розташування різальної кромки зубців пилки під кутом нахилу кромки $\lambda \neq 0$, врізання в заготовку відбувається відносно плавно, не всією шириною різальної кромки зубця одразу. Аналогічна характер спостерігається і при виході зубця із заготовки (рис. 4, б) – різальна кромка плавно виходить із заготовки, на відміну від дискових пил, у яких кут нахилу кромки $\lambda = 0$.

Такий характер врізання зубця в заготовку та виходу із заготовки викликає плавне зростання та спадання навантаження на зубець, без різких ударів. Такий характер зміни навантажень на зубець інструмента позитивно впливає на силові [1–3, 5, 6] та динамічні [7, 8, 18] характеристики процесу різання.

Аналіз зрізуваного шару (рис. 5) зубцем пилки з різнонаправленими зубцями показав, що на форму, товщину та ширину зрізуваного шару впливають:

- параметри заготовки та її положення відносно осі пилки (рис. 3, 4);
- геометричні параметри зубця (2) та режими різання (3), (4);
- положення попереднього зубця, що працював в часі раніше від досліджуваного;
- положення другого попереднього зубця, розташованого аналогічно досліджуваному зубцю через один зубець.

На підставі аналізу зрізуваного шару (рис. 4, 5), форму та величину зрізуваного шару (рис. 5) формують:

- в момент врізання в заготовку – попередній зубець (рис. 5, а);
- в процесі різання – другий попередній зубець визначає товщину, а попередній зубець – тільки ширину зрізуваного шару (рис. 5, б);
- в момент виходу зубця із заготовки – лише попередній зубець (рис. 5, в).

Отримані залежності дозволяють визначити параметри зрізуваного шару при відрізанні пилками заготовок прямокутного перерізу в процесі сталого різання. Для визначення товщини зрізуваного шару при відрізанні заготовок іншого перерізу необхідно задати математичний опис обмежуючих поверхонь заготовки.

Відповідно до наведеної методики можна визначати параметри зрізуваного шару будь-яким інструментом з довільною схемою різання припуску. Для цього потрібно записати, для кожного зубця, рівняння різальних кромок K (2), визначити рівняння одиничних нормалей $NP0_n$ (8) до поверхні різання та сформувати систему рівнянь (9).

За наведеною методикою можна визначити параметри зрізуваного шару кожним окремим зубцем багатолезового інструмента під час сталого різання.

Наведена методика не враховує іншу специфічну форму заготовки та етапи врізання інструмента в заготовку та виходу з неї.

7. Висновки

1. В роботі, на основі врахування кінематики процесу, конструктивних та геометричних особливостей дискових пил з різнонаправленими зубцями, наведена методика аналітичного визначення параметрів зрізуваного шару. Суть наведеної методики полягає в тому, що при визначенні параметрів зрізуваного шару враховується не тільки кінематика процесу різання, а і специфічна форма та розташування кожного окремого зубця інструмента.

Наведена методика дозволяє встановити параметри зрізуваного шару вздовж різальної кромки зубця дискової пилки в довільний період часу при відрізання заготовок прямокутного перерізу та заданому розташуванні заготовки відносно пилки.

2. На основі проведеного розрахунку параметрів зрізуваного шару встановлено, що:

– товщина зрізуваного шару не є постійною як вздовж різальної кромки, так і шляху різання, залежить від геометрії зубців інструменту, кінематики різання, форми та розташування заготовки;

– товщина зрізуваного шару плавно зростає на вході інструмента в заготовку та плавно зменшується при виході з неї, що позитивно впливає на процес різання;

– ширина різання окремим зубцем не є постійною величиною, максимальне значення становить 55 % від ширини різання інструмента.

Література

1. Stephenson, D. A., Agapiou, J. S. (2016). *Metal Cutting Theory and Practice*. CRC Press, 969. doi: <https://doi.org/10.1201/b19559>
2. Васин, С. А, Верещака, А. С., Кушнер, В. С. (2001). *Резание материалов. Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании*. Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 448.
3. Мазур, М. П., Внуков, Ю. М., Залого, В. О., Новосолов, Ю. К., Якубов, Ф. Я. (2000). *Основи теорії різання матеріалів*. Львів: Новий світ, 422.
4. ISO 3002-1:1982. *Basic quantities in cutting and grinding – Part 1: Geometry of the active part of cutting tools – General terms, reference systems, tool and working angles, chip breakers* (1982). ISO, 52.
5. Rubeo, M. A., Schmitz, T. L. (2016). *Milling Force Modeling: A Comparison of Two Approaches*. *Procedia Manufacturing*, 5, 90–105. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.08.010>
6. Li, Y., Yang, Z. J., Chen, C., Song, Y. X., Zhang, J. J., Du, D. W. (2018). *An integral algorithm for instantaneous uncut chip thickness measuring in the milling process*. *Advances in Production Engineering & Management*, 13 (3), 297–306. doi: <https://doi.org/10.14743/apem2018.3.291>

7. Altintas, Y. (2012). *Manufacturing automation: metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design*. Cambridge University Press. doi: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511843723>
8. Davim, J. P. (Ed.) (2011). *Modern Machining Technology. A Practical Guide*. Woodhead Publishing. doi: <https://doi.org/10.1533/9780857094940>
9. Insperger, T., Stepan, G. (2004). Stability Analysis of Turning With Periodic Spindle Speed Modulation Via Semidiscretization. *Journal of Vibration and Control*, 10 (12), 1835–1855. doi: <https://doi.org/10.1177/1077546304044891>
10. Duan, X., Peng, F., Yan, R., Zhu, Z., Huang, K., Li, B. (2015). Estimation of Cutter Deflection Based on Study of Cutting Force and Static Flexibility. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138 (4). doi: <https://doi.org/10.1115/1.4031678>
11. Kim, C.-J., Mayor, J. R., Ni, J. (2004). A Static Model of Chip Formation in Microscale Milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126 (4), 710–718. doi: <https://doi.org/10.1115/1.1813475>
12. Sai, L., Bouzid, W., Zghal, A. (2008). Chip thickness analysis for different tool motions: for adaptive feed rate. *Journal of Materials Processing Technology*, 204 (1-3), 213–220. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.094>
13. Yan, X., Tao, H., Zhang, D., Wu, B. (2010). Chip Thickness Analysis Based on Tooth Trajectory for Different End Milling Processes. 2010 International Conference on Manufacturing Automation. doi: <https://doi.org/10.1109/icma.2010.23>
14. Li, H. Z., Liu, K., Li, X. P. (2001). A new method for determining the undeformed chip thickness in milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 113 (1-3), 378–384. doi: [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(01\)00586-6](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(01)00586-6)
15. ISO 2296:2018. Metal slitting saws with fine and coarse teeth - Metric series (2018). ISO, 6.
16. Karnasch tools. General catalogue 2020/2021. URL: <https://docs.steelcam.org/karnasch/osnovnoj-katalog-karnasch-2021-page1>
17. Droba, A., Svoren, J., Marienčík, J. (2015). The Shapes of Teeth of Circular Saw Blade and Their Influence on its Critical Rotational Speed. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 63 (2), 399–403. doi: <https://doi.org/10.11118/actaun201563020399>
18. Mikołajczyk, T., Latos, H., Pimenov, D. Y., Paczkowski, T., Gupta, M. K., Krolczyk, G. (2020). Influence of the main cutting edge angle value on minimum uncut chip thickness during turning of C45 steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 57, 354–362. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.06.040>
19. Родін, П. Р., Равська, Н. С., Ковальова, Л. І. (1994). *Різальний інструмент в прикладах і задачах*. Київ: Вища школа, 293.
20. Равська, Н. С., Охріменко, О. А., Майданюк, С. В. (2013). Визначення параметрів зрізуваного шару багатозубих дискових інструментів та торцевих фрез за допомогою комп'ютерних систем 3D проектування. Надійність інструмента та оптимізація технологічних систем, 32, 20–29.