

# Практичне заняття

## Дослідження процесу фрезерування торцевими фрезами

**Мета роботи:** Формування практичних вмінь визначати залежності параметрів шару, що зрізається, умов фрезерування та окружної складової сили різання від режиму різання та геометричних параметрів фрези.

### Теоретична частина

Фрезерування торцевими фрезами є найбільш розповсюдженим видом оброблення різанням плоских поверхонь деталей машин. Торцева фреза представляє собою сталевий корпус у якому закріплені окремі різці – зубці фрези. З практики торцевого фрезерування відомо, що збільшення кількості зубців приводить до збільшення потужності різання [18]. Крім того, твердосплавні зубці вимагають досить високої швидкості різання, що також підвищує потужність різання. Тому практично застосовують фрези з малою кількістю зубців: при фрезеруванні сталей  $z=(0,04\dots 0,06)D_f$ , при фрезеруванні чавунів  $z=(0,08\dots 0,1)D_f$ . Проте, слід пам'ятати, що таке рішення приводить до підвищення нерівномірності процесу різання.

Кожний зуб торцевої фрези працює аналогічно стругальному різцю, тому передній і задній кути, також як і у різця, вимірюють у головному перетині. При фрезеруванні сталевих деталей для попередження можливого руйнування леза різця фрези з причини нерівномірності процесу різання (вихід з зони різання – врізання у припуск), передній кут виконують від'ємним  $-5^\circ \dots -15^\circ$ . При обробленні чавунів різці виготовляють з передніми кутами  $5^\circ \dots 10^\circ$ . Задній кут різця зуба фрези у всіх випадках обирають у діапазоні  $12^\circ \dots 15^\circ$ .

Принципова кінематична схема рухів і перетин шару припуску, що зрізається, при фрезеруванні торцевими фрезами представлена на рис.4.1. Два послідовні положення фрези, що відрізняються подачею  $S_z$  на зуб, позначені цифрами 1 і 2 відповідно і траєкторії руху представлені колами. Таким чином схема є спрощеною, тому що насправді кожний зуб фрези рухається за циклоїдою, аналогічно схемі рухів при циліндричному фрезеруванні.

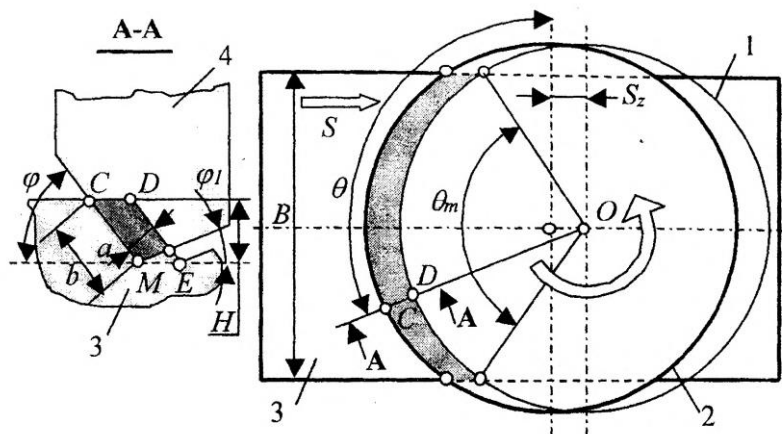


Рис.4.1. Схема розрахунку елементів різання

Фреза обертається навколо вертикальної вісі, забезпечуючи головний рух різання, а деталь 3 виконує рух повздовжньої подачі  $S$ . Положення  $CD$  різального зуба фрези визначається кутовою координатою  $\theta$ , що звичайно вимірюється від положення діаметру фрези, що є перпендикулярним до напрямку повздовжньої подачі. Максимальний кут  $\theta_m$  контакту залежить від ширини  $B$  фрезерування і при симетричному фрезеруванні може бути визначений з геометричних співвідношень схеми за формулою:

$$\theta_m = 2 \text{Arc sin} \left( \frac{B}{D_\phi} \right), \quad (4.1)$$

де  $D_\phi$  – діаметр фрези.

Площа поперечного перерізу шару припуску, що зрізається одним зубом, позначена темним фоном на рис.4.1 (див. перетин А-А). З деяким наближенням поперечний переріз може бути замінений на паралелограм  $CDEM$ . Тоді, урахувавши, що  $CD = S_z \sin \theta$ , отримаємо приблизну формулу для розрахунку площі поперечного перерізу шару припуску, що зрізається одним зубом:

$$F = S_z H \sin \theta. \quad (4.2)$$

Кількість зубців фрези, що знаходяться у роботі постійно змінюється від максимального  $m_{max} = 1 + \theta_m z / 2\pi$  до мінімального  $m_{min} = \theta_m z / 2\pi$ . Таким чином сумарна площа поперечного перерізу шару припуску, що зрізається:

$$F_{\Sigma} = S_z H \sum_{i=1}^m \sin \theta_i . \quad (4.3)$$

Оскільки кількість зубців фрези, що виконують різання і їхні кути весь час змінюються, то сумарна площа перерізу також не є постійною величиною і процес фрезерування повинен представлятися як квазістаціонарний.

При фрезеруванні, на кожному зубі, що ріже, виникає сила різання  $P$ , яка може бути розкладена на складові за визначеною системою координат (рис.4.2). Отже, сила різання  $P$  розкладається на складову  $P_{zx}$ , що діє в площині, перпендикулярній вісі фрези, та складову  $P_y$ , що діє у напрямку вісі фрези.

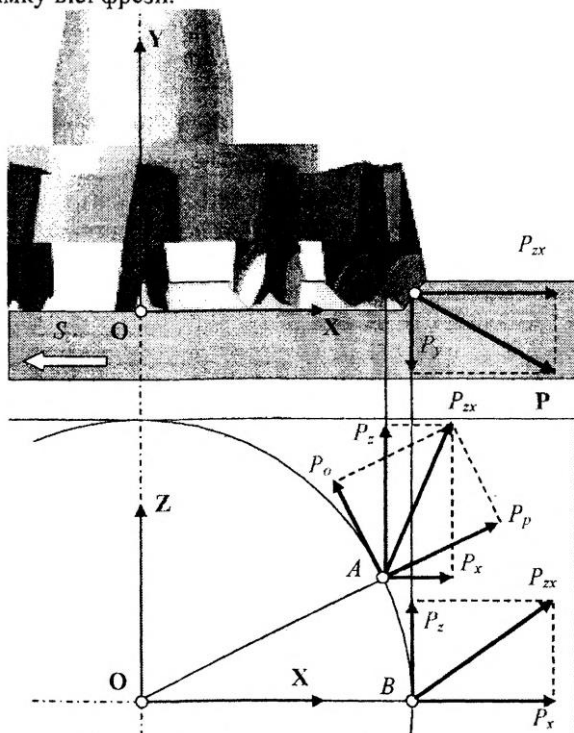


Рис.4.2. Схема розкладу сили різання

Складова  $P_{zx}$  сили різання для положення зуба, що не співпадає з будь-якою віссю координат, наприклад у точці  $A$  на рис.4.2, може бути розкладена двома способами: по відношенню до фрези, що обертається, та по відношенню до нерухомої системи координат  $XYZ$ . У першому випадку:

$$\bar{P}_{zx} = \bar{P}_o + \bar{P}_p,$$

де  $\bar{P}_o$  - окружна складова сили різання,  $\bar{P}_p$  - радіальна складова сили різання. Окружна складова вважається головною складовою сили різання оскільки саме вона створює крутячий момент різання і визначає ефективну потужність різання. У другому випадку:

$$\bar{P}_{xz} = \bar{P}_z + \bar{P}_x$$

де  $\bar{P}_z$  - складова сили різання, що діє за віссю Z,  $\bar{P}_x$  - складова сили різання, що діє за віссю X.

Для випадку розташування зуба у точці B складові сили різання співпадають: окружна складова з  $P_z$ , радіальна з  $P_x$ .

Ураховуючи нестационарність процесу різання при фрезеруванні торцевими фрезами тут, також як і у випадку фрезерування циліндричними фрезами (дивись лаб. роб. 3), намагаються побудувати таку математичну модель, яка відображає що особливість процесу.

Побудова математичної моделі починається з визначення питомої сили  $p$  різання, що у випадку невільного різання, яким є процес фрезерування торцевими фрезами, розраховується за формулою:

$$p = \frac{C_p}{a^k H^\mu}, \quad (4.4)$$

де  $C_p$ ,  $k$  і  $\mu$  - коефіцієнт і показники степеня, що залежать від механічних властивостей оброблюваного матеріалу,  $a$  - товщина шару припуску, що зрізається зубом.

Окружна складова сили різання на одному зубі **при  $\varphi=90^\circ$**  обчислюється за формулою:

$$P_o = aHp, \quad (4.5)$$

Після підставлення у (4.5) залежності (4.4) і ураховуючи, що при  $\varphi=90^\circ$  товщина шару, що зрізається,  $a=S_z \sin \theta$ , отримують залежність для визначення окружної складової сили різання на одному зубі:

$$P_o = C_p S_z^{1-k} H^{1-\mu} \sin^{1-k} \theta, \quad (4.6)$$

звідки сумарна окружна складова сили різання, за аналогією з (4.3):

$$P_o = C_p S_z^{1-k} H^{1-\mu} \sum_{i=1}^m \sin^{1-k} \theta_i, \quad (4.7)$$

Отриману залежність з певними припущеннями для випадку, коли *ширина фрезерування дорівнює діаметру фрези* і  $\varphi=90^\circ$ , можна вважати адекватній реальному процесу різання при фрезеруванні. Вона

відображає нестационарність процесу фрезерування, тобто періодичну зміну сили різання, однак є приблизною і частинною внаслідок прийнятих припущень, що раніше у тексті були виділені курсивом. Залежність (4.7) є досить незручною для технологічних розрахунків на етапі визначення режиму різання, оскільки містить такі параметри, як кути розташування зубців фрези та їх кількість, що перебуває у роботі.

Аналогічно методиці, прийнятій для фрезерування циліндричними фрезами (дивись лаб.роб.3), визначають середнє значення сили різання через середню ефективну роботу різання чи ефективну потужність різання [1,18]. При цьому також, як і для випадку фрезерування циліндричними фрезами, повністю втрачається відображення реально існуючої нестационарності процесу, але значно спрощуються технологічні розрахунки за формулою, яка містить елементи режиму різання, що задаються та підлягають простому визначенню: подачу, та глибину фрезерування.

Елементарна робота  $dA_z$ , що виконується одним зубом фрези при повороті на елементарний кут  $d\theta$ .

$$dA_z = P_o R_\phi d\theta. \quad (4.8)$$

Після підстановки (4.6) в (4.8) та інтегрування, робота зуба фрези у межах зони різання, що визначається максимальним кутом контакту:

$$A_z = C_p R_\phi S_z^{1-k} H^{1-\mu} \int_0^{180^\circ} \sin^{1-k} \theta \cdot d\theta. \quad (4.9)$$

Тут можна використати приблизне вирішення інтегралу у межах від  $0^\circ$  до  $90^\circ$ , а потім подвоїти результат. Остаточнo отримують:

$$A_z = C_p D_\phi S_z^{1-k} H^{1-\mu} 2 \frac{2^{1-k}}{2-k} \sin^{2-k} \left( \frac{90^\circ}{2} \right). \quad (4.10)$$

Після використання відношення точного розв'язку інтегралу до приблизного і деяких алгебраїчних перетворень [1] отримують остаточний вираз для роботи одного зуба фрези:

$$A_z = 2^{\frac{k}{2}} C_p D_\phi S_z^{1-k} H^{1-\mu}. \quad (4.10)$$

За кінематичною схемою процесу торцевого фрезерування робота, яка виконується фрезою за один оберт  $A = A_z$ , а шлях, на якому працювала складова  $P_o$  сили різання за один оберт дорівнює половині довжини кола з діаметром  $D_\phi$ ,  $L = \pi R_\phi$ , (тут треба нагадати, що розглядається «повне» фрезерування, коли  $D_\phi=B$ ) за відомою залежністю  $A =$

$P_o \cdot L$  з (4.10), отримаємо формулу для визначення середнього значення окружної складової сили різання:

$$P_{cp} = \frac{2^{1+\frac{k}{2}}}{\pi} C_p S_z^{1-k} H^{1-\mu} z. \quad (4.11)$$

Аналіз наведеної вище аналітичної методики показує, що тут (як і для фрезерування циліндричними фрезами) формули (4.9) так і (4.11) отримані з певними припущеннями мають суттєві вади і їх застосування у математичній моделі процесу фрезерування циліндричними фрезами не приводить до адекватності з реальним процесом. Тому для створення адекватної моделі процесу торцевого фрезерування доцільно використовувати чисельні методи. В основу визначенні окружної складової сили різання покладена формула (4.4) і (4.5), а визначення товщини шару припуску, що зрізається одним зубом, виконується за алгоритмом, схема якого аналогічна алгоритму, представленою на рис.3.7. Середнє значенні окружної складової сили різання розраховується як середня величина окружних складових на кожному зубі за оберт фрези, тобто за первинним визначенням середньої величини. Такий підхід добре узгоджується з сучасними системами технологічної підготовки обробленні (САМ-системи).

Процес фрезерування торцевими фрезами характеризується нерівномірністю, для оцінювання якої застосовують коефіцієнт  $k_p$  нерівномірності, який визначається за геометричними співвідношеннями параметрів фрези і ширини фрезерування [1].

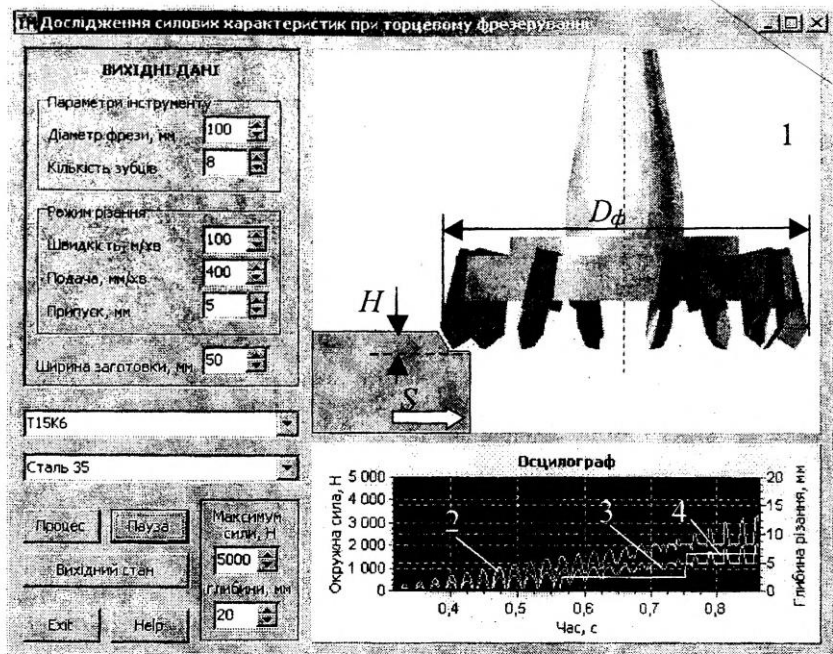
Для оцінювання нерівномірності процесу фрезерування торцевими фрезами при експериментальних дослідженнях доцільніше користуватися коефіцієнтом, який визначається із співвідношення максимальної  $P_{max}$  і мінімальної  $P_{min}$  величин сили різання:

$$k_p = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max}} 100\%. \quad (4.12)$$

Саме у такому вигляді цей коефіцієнт буде визначатиме динамічну нестабільність процесу різання, що провокуватиме виникнення коливань у пружній ТОС при фрезеруванні.

### Практична частина

Для виконання практичної частини використовується прикладна програма «Торцеве\_фрезерування», яка знаходиться на диску, а її головний інтерфейс представлений на рис.4.3. Інструкції і пояснення до роботи з прикладною програмою з'являються на додатковому інтерфейсі при натисканні кнопки Help.



**Рис.4.3. Головний інтерфейс прикладної програми**

На зображенні осцилографа синхронно з анімацією процесу фрезерування у графічному вікні 1 інтерфейсу з'являються осцилограми його характеристик: лінія 2 – окружна складова сили різання, лінія 3 – сумарна глибина різання, лінія 4 – середнє (за оберт фрези) значення окружної складової сили різання. Причому середнє значення окружної складової дорівнює величині, що була визначена на попередньому оберті фрези. При моделюванні оброблення ведеться за напрямом подачі  $S$ , а заготовка має прямокутну вихідну форму, спостерігається поступове збільшення окружної складової сили різання, сумарної глибини різання, оскільки кількість зубців, що різуть, збільшується з одного до двох. Тому поступово збільшується і величина середньої окружної складової і для її вірного визначення треба дочекатись процесу, що встановився. Ознакою такого процесу є стабілізація середньої окружної складової сили різання за два сусідніх оберти фрези.

Графічне зображення анімації фрезерування побудоване таким чином, що при зміні діаметра фрези у вихідних даних на зображенні він залишається постійним, проте змінюється графічне зображення припуску (глибини різання  $H$ ) так, щоб пропорції між ними витримувались.

У відповідності до варіанту індивідуального завдання для виконання лабораторної роботи необхідно провести дослідження процесу фрезерування з урахуванням наступних діапазонів зміни параметрів процесу оброблення.

Діаметр фрези змінюється в діапазоні  $D_f = 50 \dots 240$  мм з дискретністю 10 мм; кількість зубців фрези  $z_f = 8, 12, 16, 24$ ; швидкість різання –  $V = 60 \dots 250$  м/хв з дискретністю 10 м/хв; повздовжня подача –  $S = 50 \dots 600$  мм/хв з дискретністю 10 мм/хв; ширина обробки  $B = 10 \dots 250$  мм з кроком 1 мм; глибина різання змінюється від 0,5 мм до величини, що дорівнює  $0,06D_f$  з дискретністю 0,1 мм.

Для визначення величини окружної складової сили різання за залежностями (4.4) і (4.5) при моделюванні у програмі використані експериментальні дані [1], щодо коефіцієнту  $C_p$  і показників ступеня  $k$  і  $\mu$  в залежності від матеріалу заготовки (табл. 4.1).

Таблиця 4.1. Експериментальні дані для визначення окружної складової сили різання

№	Матеріал заготовки	$C_p$	$k$	$\mu$
1	Сталь 20, 35	1920	0,24	0,07
2	Сталь 40, 50	1950	0,20	0,06
3	Чавун HB95X	700	0,27	0,05
4	Чавун HB150	930	0,32	0,09
5	Чавун HB195	1100	0,25	0,08

Для всіх варіантів індивідуального завдання, вихідні дані яких наведено в табл. 4.7, експериментально визначити наступні залежності:

- ✓ нерівномірності фрезерування та середньої окружної складової сили різання від ширини фрезерування;
- ✓ нерівномірності фрезерування та середньої окружної складової сили різання від кількості зубців фрези;
- ✓ середньої, максимальної та мінімальної окружної складової сили різання від: парні варіанти – швидкості різання, непарні варіанти - діаметра фрези;
- ✓ середньої, максимальної та мінімальної окружної складової сили різання від глибини різання - для парних варіантів, подачі - для непарних варіантів.

Дослідження виконуються за методикою однофакторних експериментів, а діапазони зміни параметрів, у функції яких виконуються дослідження, обираються з урахуванням діапазонів, що були наведені вище, таким чином, щоб максимально продемонструвати деяку загальну тенденцію. Результати вимірювань записують у таблиці експериментальних даних, за якими необхідно побудувати відповідні графіки залежностей у кожному експерименті.



Порядок виконання лабораторної роботи доцільно розглянути на **прикладі**, вихідні дані для якого наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2. Вихідні дані прикладу

Матеріал		$D_{\phi}$ , мм	$z_{\phi}$	$V$ , м/хв	$S$ , мм/хв	$H$ , мм	$B$ , мм
заготовка	інструмент						
Сталь 35	T15K6	100	8	100	400	5	50

Саме такі вихідні дані введені у відповідні віконця інтерфейсу прикладної програми, що представлений на рис.4.3. Нехай, варіант прикладу, що розглядається, відповідає парному і у відповідності до цього визначений зміст завдання.

Перед активацією прикладної програми необхідно підготувати таблиці експериментальних даних, де зазначити конкретні цифрові величини параметрів, у функції яких будуть проводитись дослідження. При цьому треба орієнтуватися на рекомендовані діапазони та кроки зміни параметрів. Після активації програми ввести вихідні дані, встановити перше значення параметру, що змінюється і послідовно провести визначення необхідних характеристик процесу за осцилограмами процесу фрезерування.

Перша серія експериментів у відповідності до завдання проводиться для визначення залежностей середньої величини окружної складової сили різання. Експериментальні дані занотовані у табл. 4.3. На рис.4.4. представлені частини інтерфейсів програми наприкінці експерименту №8 табл. 4.3.

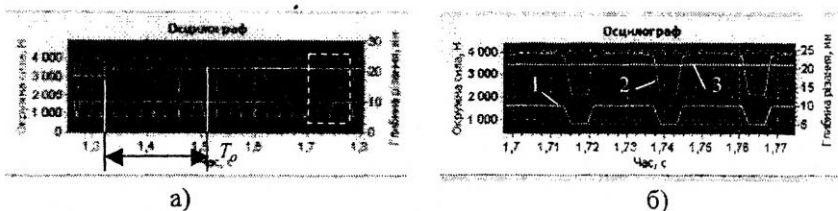


Рис.4.4. Стан інтерфейсу для експерименту №8 у таблиці 4.3

Як видно з рис.4.4, а), процес, що встановився відносно середнього значення окружної складової сили різання, починається з часу 1,51 с від початку процесу моделювання. Свідченням цього є незмінність середньої величини окружної складової сили різання за два сусідніх оберти фрези. На рис.4.4, а) час одного оберту фрези позначений як  $T_0$ . Точне визначення необхідних величин для таблиці експериментальних даних можливе при збільшенні певної ділянки осцилограм (виділено пунктирним прямокутником на рис.4.4, а) як показано на

рис.4.4, б): лінія 1 – сумарна глибина різання, лінія 2 – окружна складова сили різання, лінія 3 – середня величина окружної складової сили різання.

Таблиця 4.3. Залежність параметрів процесу фрезерування від глибини різання

№	$B$ , мм	$H_{max}$ мм	$H_{max}$ мм	$P_{min}$ Н	$P_{max}$ Н	$P_{cp}$ Н	$k_p$ %
1	30	5	0	0	2100	1550	100
2	35	5	0	0	2100	1900	100
3	40	10	5	2070	3960	2225	48
4	45	10	5	2070	3960	2545	48
5	50	10	5	2070	3960	2700	48
6	55	10	5	2070	3960	2850	48
7	60	10	5	2070	3960	3150	48
8	65	10	5	2070	3960	3460	48
9	70	10	5	2100	3960	3740	48
10	75	15	10	3800	5330	4000	29
11	80	15	10	3900	5330	4500	27
12	85	15	10	3930	5330	4730	26
13	90	15	10	3960	5330	5120	26
14	95	20	15	5170	5980	5440	14
15	100	20	15	5330	5980	5780	11

За результатами експериментальних даних табл. 4.3, з використанням пакету Excel, побудовані графіки залежностей (рис.4.5).



Рис.4.5. Графіки залежностей  $k_p$  і  $P_{cp}$  від ширини фрезерування

Причому графік залежності коефіцієнта нерівномірності побудований у вигляді гістограми. Таке представлення найбільш відповідає характеру зміни цього показника в ході проведення експериментів. Коефіцієнт нерівномірності змінюється стрибком при досягненні певного співвідношення між геометричними параметрами процесу фрезерування. Збільшення ширини фрезерування, при всіх інших постійних параметрах, провокує збільшення кількості зубців, що приймають участь у різанні, про що свідчить також і зафіксовані у табл. 4.3 зміни сумарної глибини різання ( $H_{max} + H_{min}$ ).

Проведення наступної серії експериментальних досліджень виконується також за схемою одно факторного експерименту у відповідності до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4. Залежність характеристик процесу фрезерування від кількості зубців

№	$z$	$P_{max}$ Н	$P_{min}$ Н	$P_{ср}$ Н	$H_{min}$ мм	$H_{max}$ мм	$k_p$ %
1	8	3960	2070	2700	5	10	48
2	12	3010	2935	2980	10	10	2
3	16	3580	2440	3190	10	15	32
4	24	3530	3510	3520	20	20	1

Внаслідок графічних обмежень анімаційного модуля прикладної програми можливо виконати тільки експерименти з кількостями зубців фрези, що зазначені у табл. 4.4.

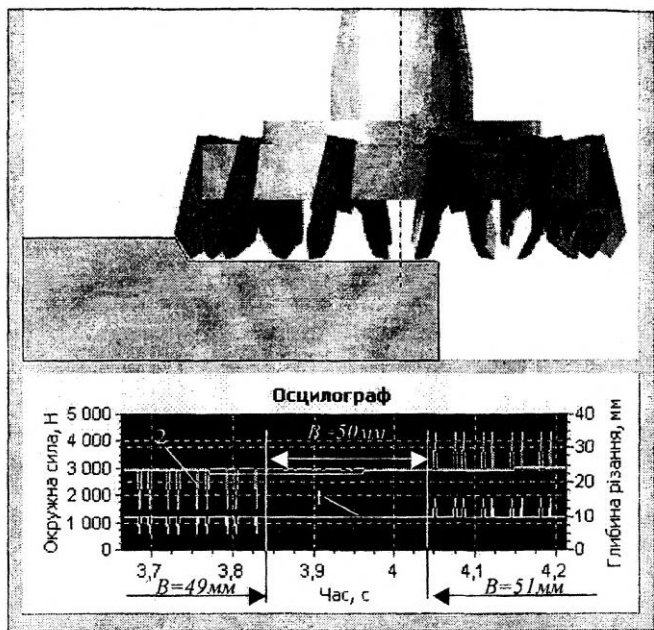
Для представлення результатів експериментів тут зручно користуватися гістограмами не тільки тому, що обмежений крок зміни аргументу, але й тому, що зміни характеристик фрезерування відбуваються стрибком у деякій точці процесу. Тому представлення у вигляді гістограм найбільш відповідає суті процесу, що відбувається.

Підтвердження такого характеру можна продемонструвати за допомогою додаткового експерименту, результати якого представлені на рис.4.6. На осцилограмі представлений запис характеристик процесу при вихідних даних, що відповідають табл. 4.2 крім кількості зубців, яка дорівнює 12. Параметром, який змінювався, була ширина фрезерування відповідно 49, 50 і 51мм.

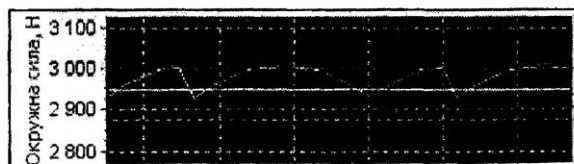
При фрезеруванні з шириною 49мм сумарна глибина різання (лінія 1) змінюється від 5 до 10мм при заданій глибині 5мм. Такий характер свідчить про те, що у процесі різання приймають участь або один, або два зубці фрези. Відповідні зміни відбуваються і з окружною складовою сили різання (лінія 2).

Збільшення ширини фрезерування до 51 мм приводить до зміни кількості зубців фрези, що різуть. Сумарна глибина різання змінюється від 10 до 15мм, отже одночасно різуть або 2 або 3 зубці фрези. При

ширині фрезерування 50мм весь час у різання перебуває 2 зубці фрези – сумарна глибина різання постійна і дорівнює 10мм. Проте навіть у такому випадку окружна складова сили різання не є постійною (дивись збільшену ділянку осцилограми при  $B=50\text{мм}$  на рис.4.7). Однак нерівномірність процесу значно зменшена.



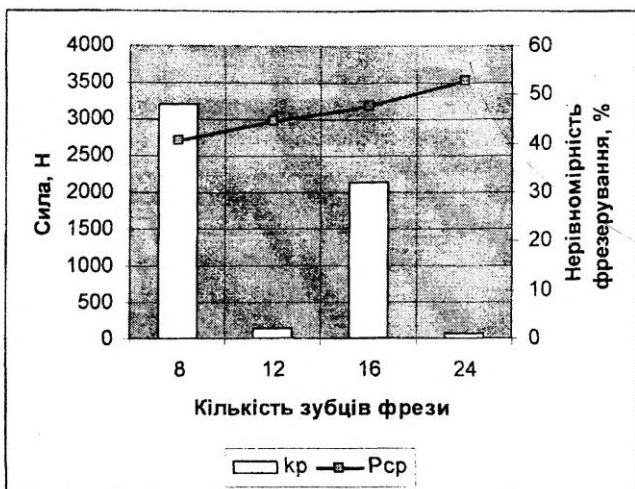
**Рис.4.6.** Стан інтерфейсу при експерименті щодо впливу ширини фрезерування і кількості зубців фрези на нерівномірність процесу



**Рис.4.7.** Збільшена ділянка осцилограми рис.4.6 при  $B=50\text{мм}$

Отримані при моделюванні за допомогою прикладної програми результати повністю співпадають з теоретичними дослідженнями процесу торцевого фрезерування, що викладені у роботах [1,18] і набули практичного підтвердження. Це також свідчить про адекватність запропонованої математичної моделі, яка є базою прикладної програми.

За результатами експериментальних досліджень табл. 4.4 побудовані відповідні графіки на рис. 4.8.



**Рис. 4.8.** Графіки залежності коефіцієнта нерівномірності фрезерування і середньої величини окружної складової сили різання від кількості зубців фрези

Проведення серії експериментів з визначення залежності процесу фрезерування торцевими фрезами від швидкості різання (у відповідності до завдання) виконувалось за підготовленою таблицею у відповідності до визначених діапазону і кроку зміни аргументу (табл. 4.5).

**Таблиця 4.5.** Залежність характеристик процесу фрезерування від швидкості різання

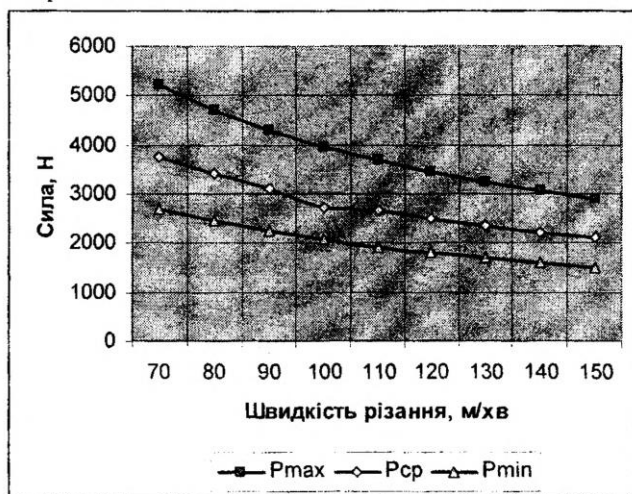
№	$V, \text{ м/хв}$	$P_{\text{max}}, \text{ Н}$	$P_{\text{min}}, \text{ Н}$	$P_{\text{cp}}, \text{ Н}$
1	70	5200	2700	3750
2	80	4700	2450	3400
3	90	4285	2245	3100
4	100	3960	2070	2700
5	110	3680	1920	2650
6	120	3450	1800	2500
7	130	3250	1700	2350
8	140	3060	1600	2200
9	150	2900	1500	2100

Тут, також як і для фрезерування циліндричними фрезами, на інтерфейсі прикладної програми містяться віконця для введення швидкості різання і повздовжньої подачі, які мають розмірність  $\text{м/хв}$  і  $\text{мм/хв}$  відповідно. Швидкість різання впливає на процес фрезерування перш

за все внаслідок зв'язку кінематичних параметрів процесу між собою. Такий зв'язок обумовлений відомими з теорії різання залежностями

$$S_z = S_o/z \text{ і } S_o = S_{x\phi}/n, \text{ де } n = 1000V/\pi D_\phi, \quad (4.13)$$

звідки очевидно, що зміна швидкості  $V$  різання при незмінному діаметрі  $D_\phi$  фрези може відбуватись тільки за рахунок зміни частоти  $n$  обертання фрези. Таким чином, зміна швидкості різання за таких умов викликає зміну подачі на оберт  $S_o$  і подачі  $S_z$  на зуб фрези відповідно. Ось чому зміна швидкості різання викликає суттєву зміну окружної складової сили різання, що і було зафіксоване при проведенні експерименту, результати якого занотовані у табл. 4.5 і представлені у вигляді графіків на рис.4.9.



**Рис.4.9. Графіки залежностей максимальної ( $P_{max}$ ), мінімальної ( $P_{min}$ ) і середньої ( $P_{cp}$ ) величин окружної складової сили різання від швидкості різання**

Наступний експеримент призначений для визначення залежності характеристик процесу фрезерування циліндричними фрезами від припуску, що зрізається, або заданої глибини різання. Тут слід нагадати, що при моделюванні на осцилографі прикладної програми фіксується сумарна глибина різання, яка визначається як додаток припуску і кількості зубців, що одночасно ріжуть. Експеримент необхідно спланувати таким чином, щоб у можливішому діапазоні зміни припуску з кроком зміни, який закладений у прикладній програмі, визначити практичний діапазон досліджень (табл.4.6). При цьому треба зважувати на те, що максимальна величина припуску не може перевищувати  $0,06D_\phi$ .

Таблиця 4.6. Залежність характеристик процесу фрезерування від глибини різання

№	$H$ , мм	$P_{max}$ , Н	$P_{min}$ , Н	$P_{cp}$ , Н
1	2,0	1690	880	1220
2	2,5	2080	1085	1500
3	3,0	2460	1290	1780
4	3,5	2840	1485	2050
5	4,0	3220	1680	2320
6	4,5	3600	1880	2600
7	5,0	3960	2070	2700
8	5,5	4320	2250	2950

Результати експериментальних досліджень представлені у графічному вигляді на рис.4.10.

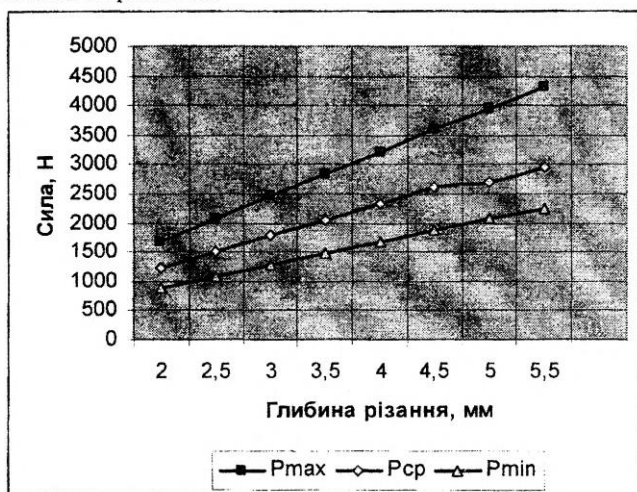


Рис.4.10. Графіки залежностей максимальної ( $P_{max}$ ), мінімальної ( $P_{min}$ ) і середньої ( $P_{cp}$ ) величин окружної складової сили різання від глибини різання

Аналіз отриманих експериментальних залежностей дозволяє зробити наступні висновки, що відповідають досліджуваному діапазону режиму фрезерування для зазначених у прикладі матеріалів інструменту, заготовки та інших незмінних параметрів процесу різання:

1. З першої серії експериментів можна зробити висновок, що нерівномірність фрезерування суттєво залежить від ширини фрезерування при незмінних інших параметрах процесу. Вона змінюється стрибками, тому що при зміні ширини фрезерування.

кількість зубців фрези, що одночасно ріжуть, також буде змінюватись дискретно, причому у різних діапазонах, про що свідчать результати табл. 4.3. Так, при ширині фрезерування від 30 до 40мм у різанні весь час перебуває тільки один зуб фрези, при ширині від 40 до 75мм одночасно ріжуть один, або два зуби, при ширині від 75 до 90мм – два або три зуби і при ширині, більшій за 90 мм одночасно ріжуть три або чотири зубці фрези. Нерівномірність фрезерування на всьому діапазоні досліджень різна, хоча різниця у кількості зубців, що одночасно ріжуть однакова і дорівнює одиниці. Такий характер повністю збігається з теоретичними залежностями (4.7) і пояснюється кінематичними особливостями процесу фрезерування торцевими фрезами, а саме, тим, що із збільшенням ширини фрезерування збільшується також кут  $\theta_m$  і кути  $\theta_i$ , що визначають миттєве положення кожного зуба фрези. Не зважаючи на те, що ширина фрезерування безпосередньо не входить до залежності (4.7), вона впливає на середню величину окружної складової сили різання через збільшення кількості зубців, що ріжуть і відповідно сумарну глибину різання.

2. Зміна кількості зубців фрези (при постійних інших параметрах процесу) викликає зміну нерівномірності фрезерування з причин зміни кількості зубців, що одночасно ріжуть. Результати цього експерименту показують, що при технологічному проектуванні для визначення умов, що забезпечують меншу нерівномірність, зручно користуватися простою формулою, яка ви-

значає кількість зубців, що ріжуть:  $z_p = \frac{\theta_m}{\theta_z} - 1$ , де  $\theta_z = 360^\circ/z$  –

кут між зубцями фрези. Якщо  $z_p$  – ціле, то процес буде відбуватися з мінімальною нерівномірністю. Дійсно, при  $z=12$  маємо  $\theta_z = 30^\circ$  і для умов експерименту за формулою (4.1)  $\theta_m = 90^\circ$ , тому  $z_p=2$ . Аналогічно і при  $z=24$ :  $\theta_z=15^\circ$  і  $z_p=4$ . Експерименти показали також, що збільшення кількості зубців викликає збільшення середньої величини окружної складової сили різання. Таку тенденцію слід урахувати при технологічній підготовці операцій торцевого фрезерування. До речі, отримані при моделюванні результати збігаються з відомими з практики тенденціями торцевого фрезерування, які були наведені у теоретичній частині.

3. Збільшення швидкості різання приводить до зменшення максимальної, мінімальної і середньої величин окружної складової сили різання. Такий вплив пояснюється опосередкованою дією,



в основному, через зменшення подачі на зуб фрези (дивись формулу (4.13)). Проте, зменшення не є пропорційним (порівняйте результати експериментів №1 і №8 у табл. 4.5). Таким чином, хоча збільшення швидкості різання зменшує силову напруженість процесу фрезерування, проте для реалізації висуває додаткові вимоги до фрезерних верстатів: крім підвищення частоти обертання шпинделя, необхідне підвищення потужності приводу головного руху.

- Збільшення глибини різання (точніше глибини припуску, що зрізається) викликає майже пропорційне збільшення максимальної, мінімальної і середньої величин окружної складової сили різання. Такий характер підтверджено експериментальними дослідженнями, результати яких представлені у табл. 4.3. Проте, зміна глибини припуску, до речі, як і зміна швидкості різання, не викликає зміну нерівномірності фрезерування. Нерівномірність залишається постійною і для умов експерименту складає 48%.

### Завдання

У відповідності до варіанту визначити зміст завдання підготувати таблиці відповідних експериментальних даних для кожного експерименту, за допомогою прикладної програми провести експериментальні дослідження, занотувати результати у таблиці, побудувати графіки експериментальних залежностей та зробити їх аналіз. Вихідні дані у відповідності до варіанту наведені у таблиці 4.7.

Таблиця 4.7. Вихідні дані

Перша цифра	Матеріал		D <sub>ф</sub> , мм	z <sub>ф</sub>	V, м/хв	Друга цифра	S, мм/хв	H, мм	B, мм
	заготовка	інструмент							
0	Чавун СЧ20	ВК6	220	16	180	0	300	5,0	100
1	Чавун ВЧ60	ВК8	200	16	200	1	280	6,5	90
2	Сталь 35	T15K6	180	16	140	2	260	4,5	80
3	Сталь 50	T14K8	160	12	120	3	320	6,0	70
4	Сталь 20	T15K6	140	12	160	4	350	3,0	110
5	Чавун КЧ60-3	ВК8	80	8	90	5	420	2,5	50
6	Алюміній АЛ6	P6M5	60	8	70	6	240	3,5	60
7	Сталь 30ХМА	T15K6	110	12	110	7	450	4,0	30
8	Сталь 40	T14K8	130	16	150	8	380	5,5	120
9	Сталь 12ХНТ	T15K6	90	8	130	9	400	2,0	40

## Зміст протоколу

У протоколі навести вихідні дані і завдання у відповідності до варіанту, необхідну інформацію з теоретичної частини, експериментальні таблиці, копію інтерфейсу для будь-якого експерименту, графіки експериментальних залежностей. Висновки.

---