

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Ю. В. Петраков

ТЕХНОЛОГІЧНА ОСНАСТКА ЛАБОРАТОРНО-КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за спеціальністю 131 Прикладна механіка

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2023

Рецензент *Данильченко Ю. М.*, доктор технічних наук, професор,
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Охрименко О. А.*, доктор технічних наук, професор

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 5 від 23.02.2023 р.)
за поданням Вченої ради НН ММІ
(протокол № 6 від 30.01.2023 р.)*

Навчальний посібник містить лабораторні роботи з дослідження точності оброблення деталей у верстатних пристроях, визначення їх конструктивних та силових параметрів і призначений для курсу «Технологічна оснастка», що викладається студентам спеціальності 131 Прикладна механіка.

Реєстр. № НП 22/23-495. Обсяг 9,5 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056

<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© Ю. В. Петраков
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023

Зміст

	Стор
Передмова.....	4
Вступ.....	6
<i>Лабораторна робота №1. Визначення похибки базування у призмі...</i>	9
<i>Лабораторна робота №2. Визначення похибки базування деталей на палець і зрізаний палець.....</i>	19
<i>Лабораторна робота №3. Налагодження інструменту у верстатному пристрої для фрезерування шпонкового пазу.....</i>	30
<i>Лабораторна робота №4. Дослідження впливу частоти обертання шпинделя токарного верстата на силу затиску заготовки.....</i>	37
<i>Лабораторна робота №5. Дослідження умов закріплення заготовок в затискних елементах верстатних пристроїв.....</i>	49
<i>Лабораторна робота №6. Дослідження умов закріплення заготовки при розточуванні отворів.....</i>	63
<i>Лабораторна робота №7. Дослідження умов затиску в пристроях першого і другого типу при торцевому фрезеруванні.....</i>	75
<i>Лабораторна робота №8. Дослідження точності розточування тонкостінних кілець при затиску в патроні.....</i>	93
<i>Лабораторна робота №9. Дослідження похибки встановлення заготовки у пристрої від сили затиску.....</i>	110
<i>Лабораторна робота №10. Проектування самоцентруючого люнету..</i>	119
Список літератури.....	135

Передмова

Основна тенденція розвитку вищої освіти в світі і в Україні – зростання питомої ваги самостійної роботи студента, впровадження комп'ютерних технологій, нових форм навчання, у тому числі дистанційного. На цьому фоні дуже важливим стає методичне забезпечення навчального процесу, а саме, сучасними електронними засобами навчання. Міністерство освіти і науки України приділяє велику увагу цьому питанню, про що йдеться у наказі Міністерства освіти і науки України №532 від 19.07.01р. – в структурі механіко-машинобудівного інституту НТУУ «КПІ» створена галузева науково-методична лабораторія віртуальних засобів навчання з інженерної механіки.

Основна концепція діяльності лабораторії – розробка нових програмних продуктів у вигляді інтерактивних підручників, навчальних посібників та комп'ютерно-лабораторних методичних видань за дисциплінами навчального плану з напрямку інженерної механіки та подальшими спеціальностями для всіх освітньо-кваліфікаційних рівнів.

Головним стрижнем нових навчальних та методичних видань є застосування програм, що моделюють реальні фізичні процеси оброблення різнанням. Такі програми побудовані на базі математичної моделі, що може удосконалюватись та доповнюватись, мають окремий інтерфейс, а результати моделювання представляються із застосуванням анімаційних ефектів.

Програмні продукти з навчальних дисциплін забезпечують наступні переваги в навчальному процесі:

1. Дозволяють індивідуалізувати процес навчання та підвищити ефективність самостійної роботи студента, що особливо важливо в зв'язку із скороченням аудиторних видів занять.
2. Дозволяють проводити дослідження в таких областях зміни параметрів, які неможливо або небезпечно реалізовувати на реальному обладнанні.
3. При відсутності необхідної контрольної-вимірювальної апаратури дають можливість вести лабораторні дослідження технічних систем за

будь-якими параметрами та порівнювати отримані результати з реальними процесами.

4. Відкриває нові можливості для ефективної реалізації дистанційного та on-line навчання.

Розроблені програмні продукти можуть використовуватися під час проведення лекційних, лабораторних та практичних занять, самостійної роботи студента. Прикладні програми, що моделюють процеси та об'єкти, допоможуть підняти на якісно новий рівень виконання курсових, дипломних проєктів і особливо магістерських дисертацій. Крім того, вони спроможні наповнити новим змістом таку форму освіти як дистанційне навчання, що набуває бурхливого розвитку в останні часи.

Лабораторно-комп'ютерний практикум з технологічної оснастки забезпечений відповідними прикладними програмами для виконання всіх лабораторних робіт. Назви програм відповідають їх назві у тексті посібника.

Вступ

Будь-який верстатний пристрій призначений для виконання технологічних процесів або окремих операцій і має забезпечувати досягнення необхідної якості і точності оброблення деталей машин. Верстатний пристрій функціонує в замкненій технологічній обробній системі (ТОС) в умовах змінних зовнішніх збурень у вигляді як випадкових коливань розмірних ланцюгів так і квазістаціонарних силових характеристик. Тому математичні моделі, що представляють верстатний пристрій мають адекватно відображати динамічні процеси, які відбуваються в процесі різання. Без таких моделей якісне проектування верстатних пристроїв просто неможливе.

Запропонований цикл лабораторно-комп'ютерних робіт з дослідження верстатних пристроїв базується на новому підході, який вивчає функціонування таких пристроїв разом з процесом різання, ураховуючи найважливіші динамічні характеристики, що особливо актуально в зв'язку з підвищенням швидкостей різання на сучасних верстатах з ЧПУ. Такий підхід дозволить зменшити так званий коефіцієнт запасу, який часто називають «коефіцієнтом незнання», що приведе до підвищення ефективності пристроїв, оптимізації її вагових та енергетичних характеристик.

Цикл включає 10 лабораторних робіт, кожна з яких у своїй теоретичній частині має викладення запропонованого підходу для створення математичної моделі того чи іншого пристрою. Всі лабораторні роботи у завданні мають 100 варіантів, що розрізняються величинами вихідних даних і розраховані на індивідуальне виконання кожним студентом.

Лабораторна робота №1 «Визначення похибки базування у призмі» передбачає дослідження залежностей впливу похибки базування у призмі на розміри деталей від призначеного на кресленнику розміру та кількості деталей у партії. Для проведення досліджень використовується прикладна програма моделювання точності розмірів при фрезеруванні лиски на циліндричній деталі, що встановлюється у призму.

Лабораторна робота №2 «Визначення похибки базування деталей на палець і зрізаний палець» побудована на математичній моделі утворення похибки розташування отворів при базуванні заготовки на палець і зрізаний палець. Прикладна програма дає можливість визначати гістограму похибки та емпіричну дисперсію за координатними осями у функції від геометричних параметрів верстатного пристрою, допусків, кількості деталей у партії тощо.

Лабораторна робота №3 «Налагодження інструменту у верстатному пристрої для фрезерування шпонкового пазу» передбачає практичний розрахунок розміру і допуску на виготовлення щупа, за яким встановлюється інструмент і моделювання процесу фрезерування в прикладній програмі для перевірки отриманих характеристик точності фрезерування шпонкового пазу при установці заготовки у призмі.

Лабораторна робота №4 «Дослідження впливу частоти обертання шпинделя токарного верстата на силу затиску заготовки» побудована на новій математичній моделі, яка ураховує дію на затискний кулачок моменту, що виникає при виникненні відцентрової сили. В результаті були усунені розбіжності між експериментальними даними і теоретичними залежностями розрахунку послаблення сили затиску в кулачковому патроні від частоти обертання, що представлені в матеріалах різних фірм. Прикладна програма дозволяє виконувати експерименти при точінні заготовки, що закріплена в патроні і отримувати залежності фактичної сили затиску і коефіцієнту запасу від частоти обертання шпинделя.

В лабораторній роботі №5 «Дослідження умов закріплення заготовок в затискних елементах верстатних пристроїв» використовується нова модель пружних систем верстатних пристроїв першого і другого типів, які пояснюють фактичні умови затиску заготовок. Дослідження пружних характеристик затискних пристроїв першого та другого типів виконується за допомогою прикладної програми, що моделює процеси, які відбуваються при затиску і випробуванні силою навантаження в затискних верстатних пристроях з ручним та пневматичним затиском.

Лабораторна робота №6 «Дослідження умов закріплення заготовки при розточуванні отворів» використовується нова математична модель, що ураховує динамічні явища, які обов'язково виникають при реальних умовах оброблення. Модель дозволяє визначати умови затиску в залежності від режиму різання і пружної системи контакту заготовки з опорами верстатного пристрою. Доведено, що проектування затискного пристрою передбачає розв'язання диференціальних рівнянь руху за обома осями координат (разом восьмий порядок) і апріорі вимагає застосування чисельних методів розв'язання. Зрозуміло, що оскільки такі динамічні системи мають резонанс і зсув за фазою реакцій в опорах відносно діючих складових від сили різання, аналітичний розрахунок необхідної сили затиску практично неможливий. Прикладна програма, за якою виконується робота, дозволяє провести моделювання на всьому діапазоні зміни швидкості різання і визначити необхідну силу затиску із заданим коефіцієнтом запасу.

В лабораторній роботі №7 «Дослідження умов затиску в пристроях першого і другого типу при торцевому фрезеруванні» пропонується новий підхід до створення математичної моделі процесу торцевого фрезерування у верстатному пристрої, який ураховує замкненість процесу різання, що

виконується в пружній технологічній обробляючій системі (ТОС), а також оброблення за слідом. В результаті математична модель наближена до реального процесу і адекватно відображає динамічні процеси, які мають місце на практиці. Прикладна програма надає можливість вести дослідження процесу фрезерування при закріпленні заготовки у верстатних пристроях з ручним затиском (пристрої першого типу) або з пневматичним затиском (пристрої другого типу).

Лабораторна робота №8 «Дослідження точності розточування тонкостінних кілець при затиску в патроні» виконується оцінка точності розточування тонких кілець на токарному верстаті в залежності від затискного патрону і режиму різання. Математична модель ТОС представлена одномасовою динамічною системою, що надає можливість вивчати залежність похибки форми деталі (відхилення від круглості) не тільки від умов затиску, а й від швидкості різання. Такий новий підхід до вивчення похибки надає більшої адекватності процесу, що моделюється, ураховуючи зміну заданої глибини різання при деформації заготовки декілька разів за оберт. Ясно, що це приводить до зміни силового збурення, частота якого залежатиме від швидкості різання і до відповідної реакції ТОС у вигляді похибки форми. Саме такий феномен можна спостерігати за допомогою розробленої прикладної програми.

В лабораторній роботі №9 «Дослідження похибки встановлення заготовки у пристрої від сили затиску» виконується визначення залежності складової похибки встановлення заготовки від місця прикладання та величини сили затиску при базуванні заготовки у верстатному пристрої. Похибка закріплення визначається для партії деталей, виходячи з розсіювання за нормальним законом величини сили затиску и розраховується як різниця найбільшої і найменшої проекції зсуву вимірювальної бази на напрямок розміру, що виконується. Прикладна програма дозволяє визначати зсув заготовки за координатою переміщення вимірювальної бази і кутом повороту в залежності від величини та місця прикладання сили затиску.

Лабораторна робота №10 «Проектування самоцентруючого люнету» присвячена визначенню оптимальних конструктивних параметрів самоцентруючого люнету. Проектування відбувається шляхом дослідження залежності характеристик люнета (як технологічних, так і силових) від конструктивних розмірів його основних ланок. Завдяки розробленій математичній моделі люнету прикладна програма надає можливість спостерігати його функціонування при зміні будь-якого параметру і визначати масив даних для виготовлення профілю копіїв люнету, завдяки яким забезпечується центрування заготовки при зміні її діаметру.

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ БАЗУВАННЯ У ПРИЗМІ

***Мета роботи:** Дослідження залежностей впливу похибки базування у призмі на розміри деталей.*

Теоретична частина

Головним завданням будь-якого процесу виготовлення деталей машин є забезпечення необхідної точності оброблення. Розрізняють точність форми і точність геометричного розміру. Точність вимірюється величиною похибки, яка є відхиленням фактичного розміру деталі від теоретичного, заданого креслеником. Похибка оброблення є сумою багатьох складових, які умовно можна поділити на дві великі групи: похибки, що виникають в процесі оброблення (пружні і теплові деформації технологічної оброблюючої системи, розмірне зношування інструменту, вібрації тощо) і похибки, що виникають в результаті невірної розташування інструменту і деталі при встановленні в позицію оброблення (похибки базування, похибки закріплення, похибки пристрою тощо). Перша група похибок виникає в процесі оброблення і тому їх можна класифікувати як динамічні похибки, а другу групу віднести до статичних похибок.

Похибка базування є однією зі складових загальної похибки встановлення деталей на верстатах і у пристроях. Похибка базування визначається як відхилення фактично досягнутого положення заготовки при базуванні від того, що вимагається. Вона визначається як максимальне поле розсіювання відстаней між технологічною і вимірювальною базами в напрямку розміру, що виконується на операції. Приблизно, похибку базування можна оцінити різницею між найбільшим і найменшим значенням вказаної відстані. Величина похибки базування залежить від прийнятої схеми базування і точності виконання баз заготовок, в тому числі відхилення розміру, форми і взаємного розташування баз.

Величину похибки базування визначають відповідними геометричними розрахунками або аналізом розмірних ланцюгів, що в багатьох випадках гарантує більш просте рішення. В загальному випадку похибку слід визначати виходячи з просторової схеми розташування заготовки. Однак, для спрощення розрахунків, обмежуються аналізом зміщень тільки в одній площині [7].

Таким чином, похибка базування у загальному випадку залежить від відхилення вимірювальної і установчої баз і тому дорівнює допуску на розмір між цими базами чи сумі допусків розмірів, які зв'язують ці бази.

При обробці лисок або шпонкових пазів на заготовках циліндричної форми їх встановлюють на призму. Розмір, що визначає розташування таких елементів по відношенню до деталі, проставляється на кресленику і залежить від положення деталі у складальному вузлі (рис. 1.1).

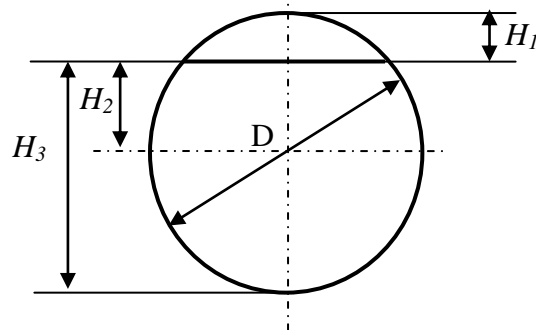


Рис. 1.1 Варіанти розташування розмірів положення лиски по відношенню до деталі

При встановленні деталі у призму через відхилення фактичного діаметру D заготовки від номінального неминучі похибки базування, що впливають на розміри H_1 , H_2 і H_3 . Такі похибки можуть бути визначені з геометричних співвідношень рис. 1.2.

На рис. 1.2. у призмі встановлені дві циліндричні заготовки з однієї партії з максимальним D_{max} і мінімальним D_{min} діаметрами.

1. Похибка базування розміру H_1 :

$$\varepsilon_{H_1} = OA_2 - OA_1. \quad (1.1)$$

Відрізок OA_2 в свою чергу дорівнює:

$$OA_2 = OO_2 + \frac{D_{max}}{2}. \quad (1.2)$$

Відрізок OO_2 може бути визначений з прямокутного ΔOO_2B_2 :

$$OO_2 = \frac{D_{max}}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (1.3)$$

Після підстановки (1.3) в (1.2) отримуємо:

$$OA_2 = \frac{D_{max}}{2} + \frac{D_{max}}{2 \sin(\alpha/2)}. \quad (1.4)$$

Аналогічно можна отримати вираз для відрізка OA_1 , тому достатньо замінити у формулі (1.4) D_{max} на D_{min} :

$$OA_1 = \frac{D_{min}}{2} + \frac{D_{min}}{2 \sin(\alpha/2)}. \quad (1.5)$$

Після підстановки (1.4) і (1.5) в (1.1) і нескладних алгебраїчних перетворень остаточно отримуємо:

$$\varepsilon_{H1} = (D_{\max} - D_{\min}) \left(\frac{1 + \sin(\alpha/2)}{2\sin(\alpha/2)} \right) = T_D k_1, \quad (1.6)$$

де T_D – допуск на діаметр,

k_1 – коефіцієнт, що залежить від кута призми.

Для призми з кутом $\alpha = 90^\circ$ $k_1 = 1,207$, для призми з кутом $\alpha = 120^\circ$ $k_1 = 1,077$.

2. Похибка базування розміру H_2 :

$$\varepsilon_{H2} = OO_2 - OO_1. \quad (1.7)$$

Після підстановки в (1.7) виразу (1.3) і аналогічного виразу для OO_1 і нескладних алгебраїчних перетворень, отримуємо:

$$\varepsilon_{H2} = (D_{\max} - D_{\min}) \frac{1}{2\sin(\alpha/2)} = T_D k_2, \quad (1.8)$$

де T_D – допуск на діаметр,

k_2 – коефіцієнт, що залежить від кута призми.

Для призми з кутом $\alpha = 90^\circ$ $k_2 = 0,707$, для призми з кутом $\alpha = 120^\circ$ $k_2 = 0,577$.

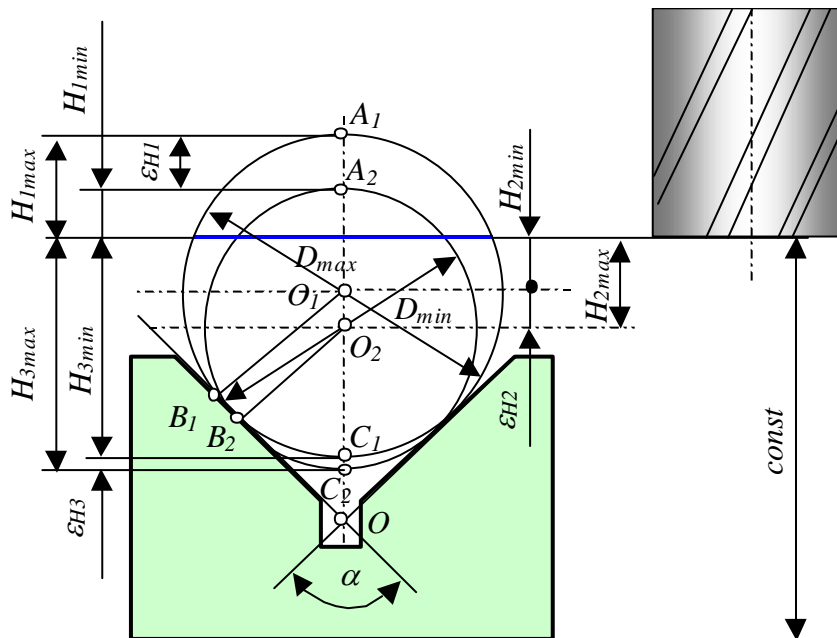


Рис. 1.2 Схема розрахунку похибки базування

3. Похибка базування розміру H_3 :

$$\varepsilon_{H3} = O_2C_1 - O_2C_2. \quad (1.9)$$

З використанням виразу (1.8) з геометричних співвідношень рис.1.2 можна визначити відрізок O_2C_1 :

$$O_2C_1 = \varepsilon_{H_2} + \frac{D_{\min}}{2}. \quad (1.10)$$

Ураховуючи, що $O_2C_2 = D_{\max}/2$, після підстановки (1.10) в (1.9) і використовуючи вираз (1.8), остаточно отримуємо:

$$\varepsilon_{H_3} = (D_{\max} - D_{\min}) \left(\frac{1 - \sin(\alpha/2)}{2\sin(\alpha/2)} \right) = T_D k_3, \quad (1.11)$$

де T_D – допуск на діаметр,

k_3 – коефіцієнт, що залежить від кута призми.

Для призми з кутом $\alpha = 90^\circ$ $k_3 = 0,207$, для призми з кутом $\alpha = 120^\circ$ $k_3 = 0,077$.

Похибку базування для розміру H_2 можна звести до нуля, якщо призму розташувати в зоні оброблення під кутом 90° , до її положення на рис. 1.2, або застосувати дві рухомі призми з двох боків заготовки (рис. 1.3). Саме таку схему базування застосовують на фрезерно-центрувальних верстатах для оброблення валів на чорнових операціях.

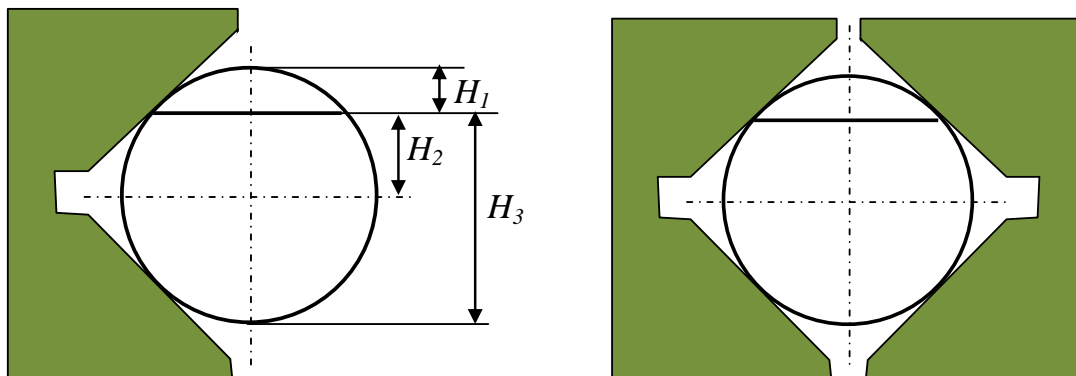


Рис. 1.3 Базування валів на фрезерно-центрувальних верстатах

Практична частина

Виконання практичної частини роботи передбачає дослідження залежностей впливу похибки базування у призмі на розміри деталей від призначеного на кресленнику розміру та кількості деталей у партії.

Для проведення досліджень використовується прикладна програма, інтерфейс якої представлений на рис. 1.4. Інструкції та пояснення для роботи з програмою містяться у самій програмі і з'являються на екрані монітора при натисканні кнопки Help. Для виконання роботи використовується прикладна програма «Фрезерування_лиски». На рис. 1.4 представлений стан інтерфейсу під час проведення експерименту з обробки першої деталі заданої партії.

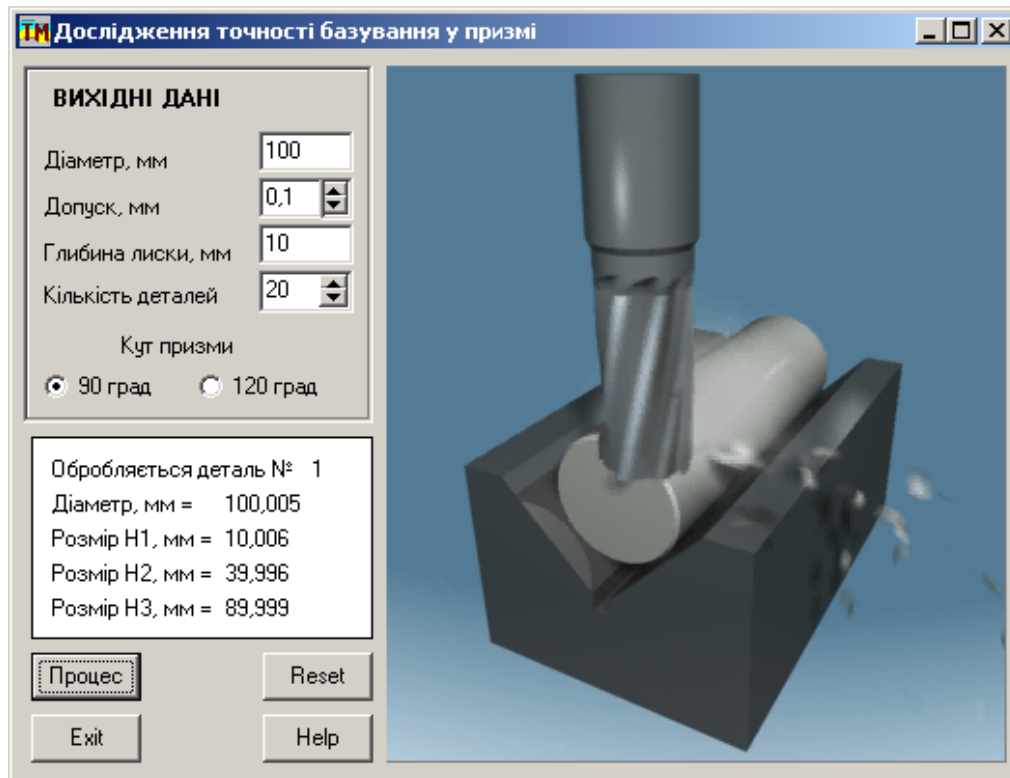


Рис. 1.4 Стан інтерфейсу прикладної програми під час моделювання

У якості вихідних даних задаються (у відповідності до варіанту – таблиця 1.3): номінальний діаметр заготовки, поле допуску при симетричному розташуванні навколо номіналу, номінальний розмір глибини лиски, розмір партії.

При виконанні машинного експерименту фактичний діаметр заготовки, обробка якої моделюється, вибирається автоматично, випадково, але за нормальним законом розподілу, що в цілому відповідає реальним умовам обробки. Таким чином, навіть при обмеженій кількості експериментів апіорі діє гіпотеза нормального закону розподілу фактичних розмірів, проте отримані результати безумовно залежатимуть від кількості деталей у партії.

При виконанні машинного експерименту діяти треба за Інструкціями, що містяться у програмі. Після виконання моделювання обробки кожної заготовки на інтерфейсі з'являються діаметр заготовки і отримані розміри H_1 , H_2 і H_3 . (дивись рис. 1.4). Процес моделювання продовжується автоматично до досягнення встановленої кількості деталей у партії. Після моделювання оброблення останньої заготовки партії автоматично з'являється інтерфейс з результатами моделювання, представлений на рис. 1.5,а.

Експеримент можна скоротити відразу отримавши результати оброблення всієї кількості заготовок, що встановлена у партії. Для виконання скороченої кількості експериментів – читайте Help.

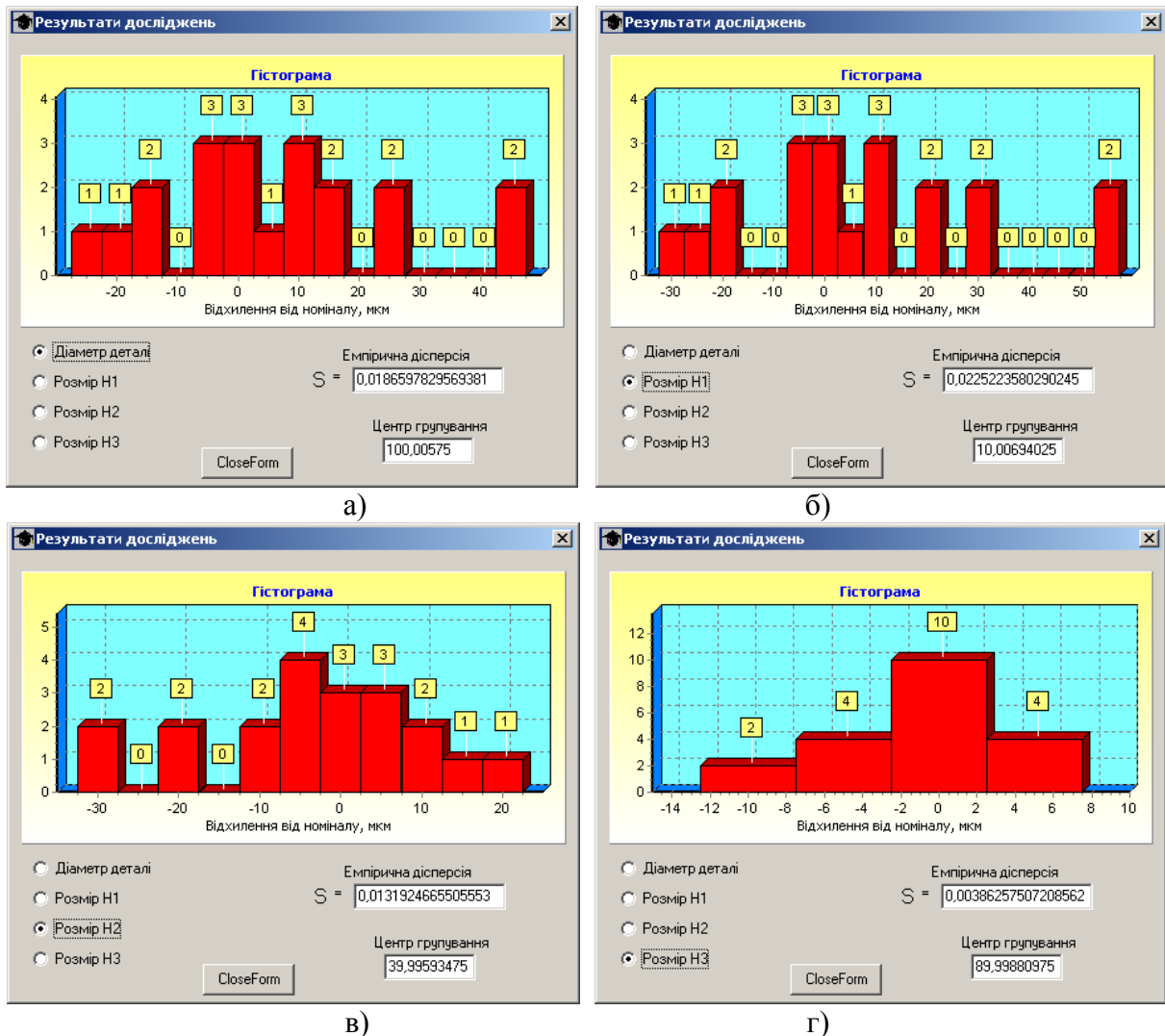


Рис. 1.5 Результати досліджень для партії 20 шт.:
а) – діаметр деталі, б) – розмір Н₁, в) – розмір Н₂, г) – розмір Н₃.

Для аналізу та представлення результатів експерименту у звіті необхідно натиснути клавіші “Alt” і “PrintScreen”, відкрити “Word”, вибрати у меню “Правка” і потім “Вставить”. Зображення інтерфейсу (як рисунок) з’являється на сторінці звіту.

Таким чином, в результаті проведеного машинного експерименту та автоматичної обробки результатів вимірів розмірів заданої партії заготовок отримуються гістограми розподілу фактичних розмірів, емпірична дисперсія і величина центру групування для кожного розміру H_1 , H_2 і H_3 (рис. 1.5). У відповідності до методики виконання необхідно провести 5 експериментів з заданою партією, а результати записати у таблицю 1.1 експериментальних даних. Для проведення нового експерименту натискати кнопку «Reset» на головному інтерфейсі.

Наступна частина експерименту передбачає отримання аналогічних результатів при партії деталей 500 шт. незалежно від варіанту завдання. Результати такого моделювання представлені на рис. 1.6.

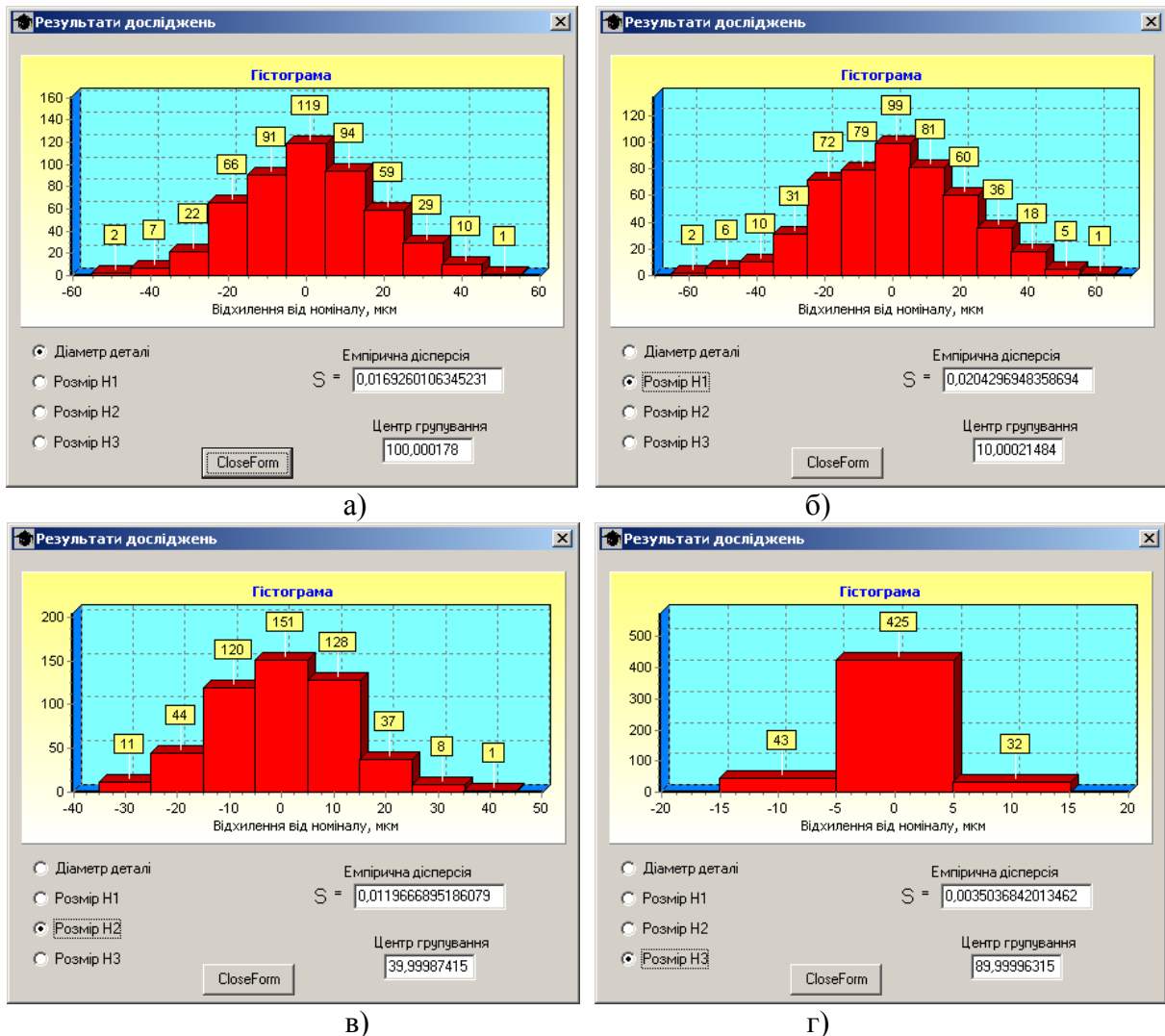


Рис. 1.6 Результати досліджень для партії 500 шт.:
а) – діаметр деталі, б) – розмір Н₁, в) – розмір Н₂, г) – розмір Н₃.

Зверніть увагу на зміну характеру розподілу і автоматичну зміну інтервалу, що відбулися. Величина *it* інтервалу в програмі визначається автоматично за формулами:

$$\begin{cases} it = 1 + 1.44 \ln N, & \text{якщо } N < 100 \\ it = 2.17 \ln N, & \text{якщо } N \geq 100 \end{cases}$$

Оскільки в формули входить кількість заготовок, що обробляються, інтервал автоматично адаптується до конкретних умов експерименту.

Кількість деталей у партії (20 штук – див. рис. 1.4) була недостатньою для візуального підтвердження нормального закону розподілу відхилень діаметру *D* заготовки і розмірів *H*₁ і *H*₂ за експериментальними гістограмами, проте для розміру *H*₃ експериментальні гістограми більш наближені до нормального закону завдяки зменшенню діапазону відхилень. Од-

нак, виходячи з прийнятої гіпотези, закони розподілу відхилень всіх розмірів вважаємо нормальними.

Таблиця 1.1 Емпірична дисперсія, мкм

№ експерименту	Кількість деталей у партії							
	20				500			
	Діаметр деталі	Розмір Н ₁	Розмір Н ₂	Розмір Н ₃	Діаметр деталі	Розмір Н ₁	Розмір Н ₂	Розмір Н ₃
1	17,6	21,2	12,4	3,6	17,3	20,9	12,2	3,6
2	16,4	19,7	11,6	3,4	16,4	19,8	11,6	3,4
3	15,7	18,9	11,1	3,2	16,9	20,4	12,0	3,5
4	19,2	23,1	13,6	4,0	16,6	20,0	11,7	3,4
5	18,7	22,5	13,2	3,9	16,5	19,9	11,7	3,4
Середня величина	17,52	21,08	12,38	3,62	16,74	20,2	11,84	3,46
Допуск	105,12	126,48	74,28	21,72	100,44	121,2	71,04	20,76

Після проведення експериментів необхідно підрахувати середню величину отриманих емпіричних дисперсій (дивись таблицю 1.1) та, спираючись на нормальний закон розподілу випадкових відхилень, розрахувати поля допусків на кожний розмір за простою формулою:

$$\varepsilon_i = 6s_i.$$

Результати занести в останній рядок таблиці 1.1.

Ясно, що аналогічні розрахунки можна зробити за теоретичними формулами, що були отримані у попередньому розділі (таблиця 1.2). При цьому, цілком очевидно, що результати розрахунків допусків на розміри Н₁, Н₂ і Н₃ будуть відрізнятись при застосуванні експериментально отриманої дисперсії діаметру і заданого у вихідних даних допуску на діаметр.

Таблиця 1.2 – Допуск, розрахований за теоретичними формулами, мкм

Діаметр деталі	Розмір Н ₁	Розмір Н ₂	Розмір Н ₃
100,0	120,71	70,71	20,71

Висновки

1. Найменша похибка базування для операції оброблення лиски при встановленні деталі у призмі виявляється для розміру Н₃. Вона складає 20% від допуску на діаметр деталі.
2. Порівняння результатів таблиці 1.1 і таблиці 1.2 показує, що при моделюванні обробки заданої партії деталей отримані експериментальні дані перевищують теоретично розраховані на 5%, а при збільшенні партії до 500 штук вони майже співпадають. Отримані розбіжності обумовлюються недостатньою кількістю експериментів.

3. Центри групування розмірів у всіх випадках при симетричному розташуванні допуску на діаметр співпадають з номінальним розміром.

Завдання

1. Провести експеримент за вихідними даними у відповідності до варіанту (таблиця 1.3) і отримати результати експерименту у вигляді експериментальної гістограми, експериментальної дисперсії і центру групування для кожного розміру.

Таблиця 1.3 - Вихідні дані

Перша цифра	Діаметр, мм	Допуск, мм	Глибина лиски, мм	Друга цифра	Розмір партії, шт.	Кут призми, град
0	60	0,10	10	0	30	90
1	70	0,14	12	1	50	120
2	80	0,08	15	2	140	90
3	90	0,16	18	3	35	120
4	100	0,20	20	4	150	90
5	110	0,18	22	5	40	120
6	120	0,24	25	6	130	90
7	130	0,30	27	7	60	120
8	140	0,26	30	8	30	90
9	150	0,22	35	9	240	120

2. Зберегти результати експериментів для кожного розміру в окремому файлі “Word” шляхом копіювання активного вікна екрану монітора “Alt” і “PrintScreen”.

3. За результатами експериментів, використовуючи відповідні залежності теоретичної частини заповнити таблицю 1.1 і 1.2.

Зміст протоколу

У протоколі навести: завдання, схему розташування розмірів лиски при базуванні циліндричної заготовки у призмі, копію головного інтерфейсу з вихідними даними, копії інтерфейсів з результатами експериментальних досліджень, необхідні розрахунки і таблицю експериментальних даних, пояснення отриманих розбіжностей, висновки.

Інструкції до роботи з програмою

Програма призначена для дослідження точності базування деталей у призмах. Вихідні дані задають у відповідних вікнах, що розташовані з лівої сторони інтерфейсу. На тому ж полі задають кількість деталей у партії і обирають кут призми і натискають кнопку "Процес".

УВАГА! Всі вихідні дані задають, використовуючи десяткову кому, а не крапку!

Починається процес моделювання обробки заданої партії деталей і після його закінчення результати вимірювань з'являються на додатковому інтерфейсі. Під час моделювання дані за деталлю, що обробляється висвітлюються в графічному вікні головного інтерфейсу. Для прискорення виконання експерименту підвести мишку до форми інтерфейсу в будь-якому місці і натиснути ліву клавішу. На додатковому інтерфейсі з'являються гістограма розсіювання того розміру, кругле віконце якого внизу інтерфейсу має точку. Справа внизу з'являються емпірична дисперсія і центр групування для цього розміру.

Щоб отримати аналогічні дані по будь-якому розміру, що міститься у списку, треба підвести мишку до відповідного круглого віконця і натиснути ліву клавішу.

Для виконання нового експерименту треба натиснути кнопку "Reset" і, після зміни вихідних даних, діяти у представленому вище порядку.

Запитання для самоконтролю

1. Для якого призначення розміру буде спостерігатися найменший вплив похибки базування деталі у призмі?
 2. Чи залежить похибка базування у призмі від номінального розміру деталі? Лиски? Допуску на діаметр? Кута призми?
 3. Чим пояснюється відхилення експериментально отриманої дисперсії від теоретичної? Чому таку відхилення завжди у бік збільшення?
 4. Чому інтервал для гістограм розмірів залежить від кількості деталей в партії?
-
-



ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ БАЗУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ НА ПАЛЕЦЬ І ЗРІЗАНИЙ ПАЛЕЦЬ

***Мета роботи:** Дослідження впливу координат розташування отвору, що обробляється, та точності координатних розмірів при базуванні на палець і зрізаний палець.*

Теоретична частина

При обробці деталей типу корпусів, кронштейнів, важелів тощо на верстатах з ЧПК їх базування найчастіше застосовують за схемою установки на два пальці: циліндричний і зрізаний. В таких випадках заздалегідь оброблену площину використовують в якості установчої технологічної бази, а отвори – подвійної опорної й опорної баз.

Як правило, такі деталі мають отвори з досить високими вимогами до точності, в тому числі і до точності розташування в заданій координатній системі. Попередній аналіз такої схеми базування доводить, що точність розташування отворів у координатній системі залежатиме не тільки від точності базових отворів і пальців, точності верстата, а й положення отвору, що обробляється по відношенню до баз. Тому на виробництві часто виникає проблема забезпечення необхідної точності розташування всіх отворів, що обробляються з одної установки, оскільки точність розташування однакових отворів, але розташованих по-різному до баз, виявляється різною.

Сумарна похибка будь-якого координатного розміру деталі складається з первинних похибок, які прийнято ділити на три групи:

- похибка установки заготовки;
- похибка налагодження верстату;
- похибка обробки.

Аналіз таких складових при обробці на верстатах з ЧПК доводить, що саме похибка установки заготовки, яка, в свою чергу, складається з похибки базування і похибки закріплення, має домінуючий характер. Крім того, всі складові похибки мають імовірнісний характер. Відомо також, що випадкові відхилення розмірів при механічній обробці з точністю до 8-го квалітету підкоряються закону нормального розподілу (закону Гауса), а при більш високій точності до 6-го квалітету - закону рівнобедреного трикутника (закону Сімпсона) [3, 4]. Тому, для подальших розрахунків доцільно прийняти нормальний закон розподілу, оскільки він забезпечує деякий корисний запас у розрахунках для всіх випадків.

Допуски і посадки при встановленні заготовки двома циліндричними отворами з паралельними осями на циліндричний і зрізаний пальці визна-

чають в наступній послідовності. Звичайно допуски на діаметри циліндричного і зрізаного пальців призначають за полем допуску $f7$, при підвищених вимогах за точністю і великих діаметрах отворів – $g6$, $g5$, при менш точних – $f8$, $f9$. Призначені допуски мають бути перевірені за умови забезпечення необхідної точності оброблення [7].

При призначенні розмірів діаметру d_3 зрізаного пальця виходять з розміру отвору D_3 під цей палець (рис. 2.1):

$$d_3 = D_{EI}^{ES}, \quad (2.1)$$

де ES , EI – верхнє і нижнє відхилення для обраного поля допуску.

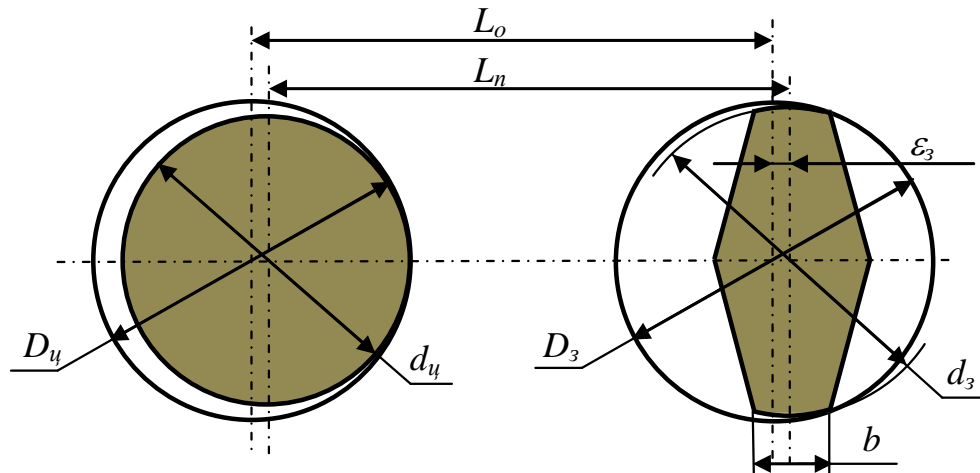


Рис. 2.1 Схема розмірів

Звичайно приймають однакові розміри як діаметрів отворів, так і діаметрів пальців під них. Ширину b пояса зрізаного пальця розраховують за формулою:

$$b = 0,25(D_{zp} + d_{zp})(D_{zp} - d_{zp}) / \varepsilon_{zp}, \quad (2.2)$$

де $D_{zp} = D_3 + 0,25ITD_3$, $d_{zp} = d_3 - 0,25ITd_3$ – розрахункові діаметри отвору і пальця відповідно, ITD_3 , ITd_3 – допуски на діаметри отвору і зрізаного пальця відповідно.

Розрахункове зміщення ε_{zp} осі зрізаного пальця визначається за формулою, що впливає з аналізу геометричних ланцюгів рис. 2.1:

$$\varepsilon_{zp} = 0,5(ITL_o - ES) + ITL_n, \quad (2.3)$$

де ITL_o , ITL_n – допуски на відстані між отворами і між осями пальців відповідно.

З аналізу можливих переміщень заготовки встановлено, що вона може зміщуватись від теоретичного положення на величину, яка обумовлюється фактичними зазорами в пальцях і базових отворах, рухаючись у двох напрямках: за плоско-паралельним рухом та повертаючись біля певного полюса [1, 2, 3].

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ БАЗУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ НА ПАЛЕЦЬ І ЗРІЗАНИЙ ПАЛЕЦЬ

Для розроблення математичної моделі утворення похибки розташування отворів необхідно скористатися схемою базування у координатній системі верстата при базуванні на палець і зрізаний палець. В системі координат верстату XOY , яка може бути розташована по відношенню до пристрою випадковим чином, координати циліндричного пальця позначені як $[x_{ц}, y_{ц}]$, координати зрізаного пальця - $[x_з, y_з]$ та координати отвору, що обробляється - $[x_o, y_o]$ (рис. 2.2).

Похибка від плоско-паралельного руху. Максимальний зсув Δ_{\max} заготовки від її середнього положення при плоско-паралельному русі на одному пальці обмежується наступними розмірами:

$$\Delta_{\max} = \Delta_p + \frac{\delta_o}{2} + \frac{\delta_n}{2} + \frac{\delta_{nz}}{2}, \quad (2.4)$$

де Δ_p – максимальний радіальний зазор, δ_o – допуск на діаметр базового отвору, δ_n – допуск на діаметр пальця, δ_{nz} – допуск на його зношування.

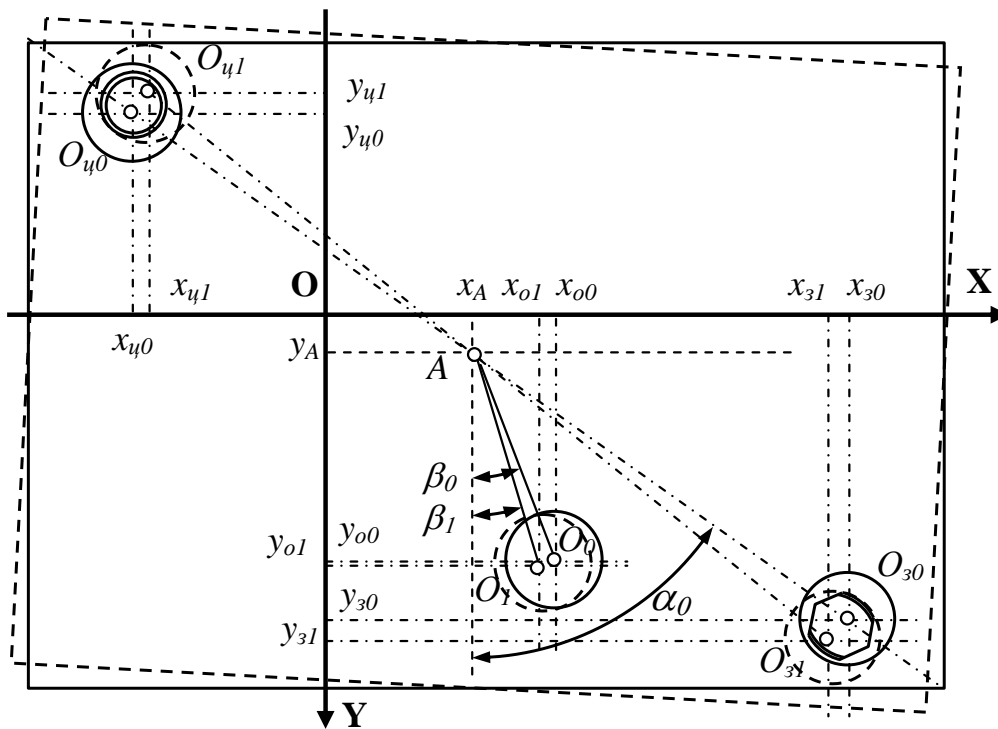


Рис. 2.2 Схема утворення похибки

Оскільки базові отвори та пальці, як правило, виготовляються за однаковим квалітетом точності, а зношування зрізаного пальця буде більше, ніж у циліндричного, то максимальна похибка Δ_{nl-n} будь-якого координатного розміру при плоско-паралельному русі обмежується мінімальним з двох максимальних зміщень на обох пальцях:

$$\Delta_{nl-n} = \min\{(\Delta_{\max})_ц, (\Delta_{\max})_з\}. \quad (2.5)$$

Похибка від повороту. З аналізу геометричних співвідношень рис. 2.2, де пунктирними лініями показано положення заготовки при можливому повороті, можна знайти координати полюсу A повороту.

Для вирішення такої задачі доцільно скористатися відомим співвідношенням між максимальними зазорами пальців і базових отворів та міжцентровою довжиною. Міжцентрова відстань базових отворів:

$$O_{y0}O_{z0} = \sqrt{(x_{z0} - x_{y0})^2 + (y_{z0} - y_{y0})^2}, \quad (2.6)$$

а полюс A визначається за відрізком:

$$O_{z0}A = O_{z0}O_{y0} \cdot (\Delta_{\max})_z / [(\Delta_{\max})_z + (\Delta_{\max})_y]. \quad (2.7)$$

Таким чином, координати полюса можуть бути розраховані за наступними формулами:

$$\begin{cases} x_A = x_{z0} - O_{z0}A \cdot \sin\alpha_0 \\ y_A = y_{z0} - O_{z0}A \cdot \cos\alpha_0 \end{cases}, \quad (2.8)$$

де кут нахилу міжцентрової лінії до осі Y :

$$\alpha_0 = \arctan\left(\frac{x_{z0} - x_{y0}}{y_{z0} - y_{y0}}\right). \quad (2.9)$$

Кут β_0 , який визначає положення центру отвору, що обробляється, в полярній системі координат з центром у полюсі A :

$$\beta_0 = \arctan\left(\frac{x_0 - x_A}{y_0 - y_A}\right). \quad (2.10)$$

Максимальна похибка $\delta\beta$ кута β_0 внаслідок максимально можливих зміщень у базових отворах:

$$\delta\beta = \frac{(\Delta_{\max})_y + (\Delta_{\max})_z}{O_{y0}O_{z0}}. \quad (2.11)$$

Таким чином, нові координати отвору, що обробляється, при максимально можливому повороті заготовки по відношенню до полюса можуть бути визначені за наступними залежностями:

$$\begin{cases} x_{o1} = x_A + O_{z0}A \cdot \sin\beta_1 \\ y_{o1} = y_A + O_{z0}A \cdot \cos\beta_1 \end{cases}, \quad (2.12)$$

де $\beta_1 = \beta_0 + \delta\beta$.

В результаті максимально можливих похибок за координатами розташування отвору, що обробляється, в наслідок повороту заготовки визна-

чаються з порівняння координат, розрахованих за залежностями (2.12) з вихідними (теоретичними) величинами цих координат:

$$\begin{cases} \delta_x = x_{o1} - x_{o0} \\ \delta_y = y_{o1} - y_{o0} \end{cases} \quad (2.13)$$

Оскільки поле розсіювання координатних розмірів отвору, що обробляється, фактично буде визначатися при випадковому положенні заготовки по відношенню до баз, яке складається з певного переміщення за плоско-паралельним рухом і певного повороту, то:

$$\begin{cases} \Delta_x = \max\{\Delta_{nl-n}, \delta_x\} \\ \Delta_y = \max\{\Delta_{nl-n}, \delta_y\} \end{cases} \quad (2.14)$$

Розроблена математична модель (2.4)-(2.14) покладена в основу прикладної програми моделювання точності розташування отворів при обробленні на верстатах з ЧПК, коли заготовка базується за циліндричним та зрізаним пальцями. Оскільки розроблена модель є детермінованою, то для отримання стохастичної моделі була розроблена спеціальна процедура, яка відтворює нормальний закон розподілу.

Практична частина

Моделювання впливу геометричних параметрів схеми базування та координат розташування центру отвору, що обробляється, на точність виконується за допомогою розробленої прикладної програми, головний інтерфейс якої представлений на рис. 2.3.

У вікна інтерфейсу вводяться дані у відповідності до варіанту, які визначають геометричні параметри циліндричного і зрізаного пальців та координати отвору, що обробляється.

Наприклад, прийнято, що координати циліндричного пальця $X=-50\text{мм}$, $Y=-40\text{мм}$; координати зрізаного пальця $X=50\text{мм}$, $Y=40\text{мм}$; квалітет точності обох отворів 7; допуск на відстань між отворами 0,02мм. Встановити бажаний розмір партії деталей, наприклад 500, який дозволить зробити висновки щодо розподілу похибки оброблення з урахуванням випадкових складових.

Необхідно провести дослідження впливу координат розташування отвору на його точність. Діапазон зміни координат отвору за віссю X від 110мм до 0мм при $Y=0\text{мм}$ та за координатою Y від 90мм до 0мм при $X=0\text{мм}$. Для першого експерименту встановлюємо координати отвору $X=110\text{мм}$, $Y=0\text{мм}$. Стан інтерфейсу з введеними даними на початку моделювання показаний на рис. 2.3.

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ БАЗУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ НА ПАЛЕЦЬ І ЗРІЗАНИЙ ПАЛЕЦЬ

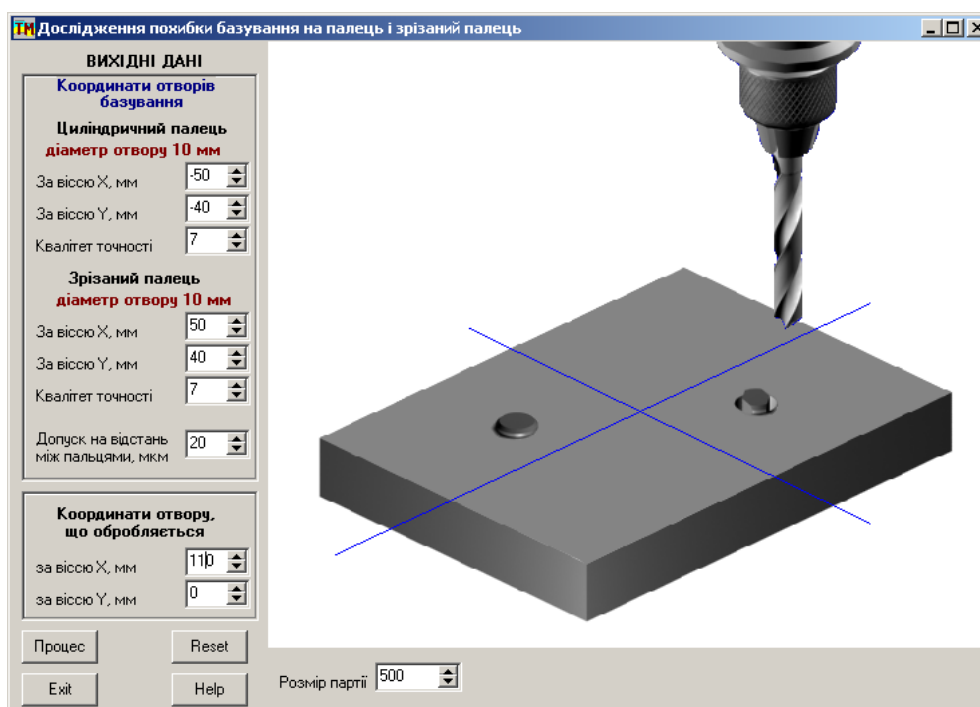


Рис. 2.3 Головний інтерфейс програми на початку моделювання

Для моделювання натиснути кнопку «Процес». У графічному вікні відбувається анімація процесу оброблення і після закінчення циклу (рис. 2.4) для отримання розрахункових даних треба натиснути кнопку «Результати статистичної обробки». Не зважаючи на одноразовий цикл оброблення, в програмі моделюється оброблення всієї партії деталей, розмір якої був заданий у вікні інтерфейсу.

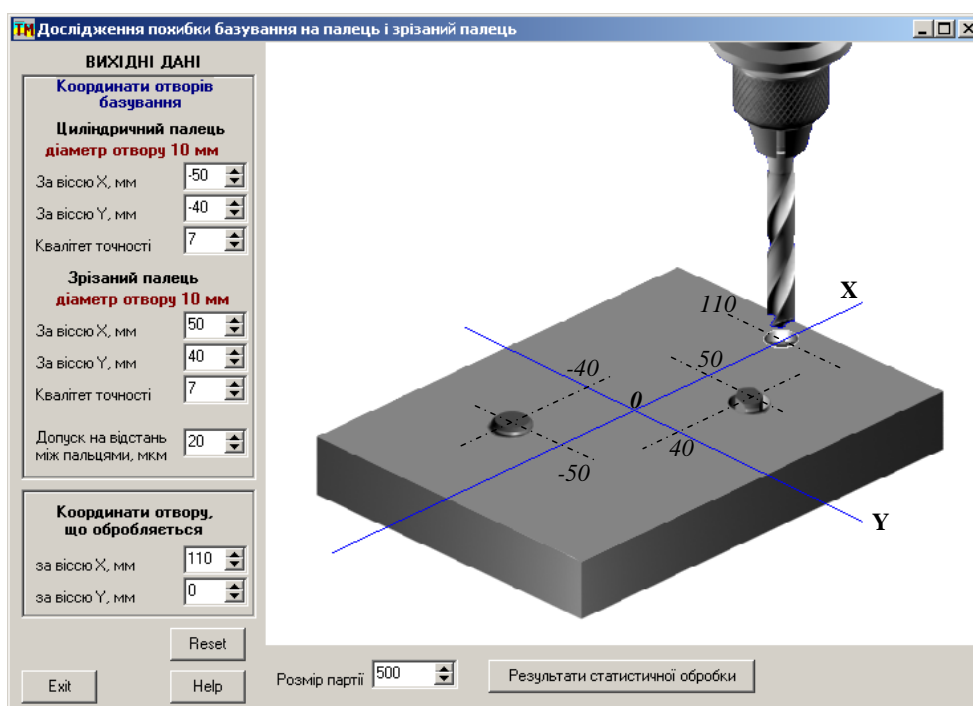


Рис. 2.4 Головний інтерфейс програми в кінці моделювання

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ БАЗУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ НА ПАЛЕЦЬ І ЗРІЗАНИЙ ПАЛЕЦЬ

На додатковому інтерфейсі з'являються гістограми похибок розташування отвору відповідно за віссю X і Y (рис. 2.5). Розраховані результати необхідно записати в заздалегідь підготовлену таблицю експериментальних досліджень (таблиця 2.1).

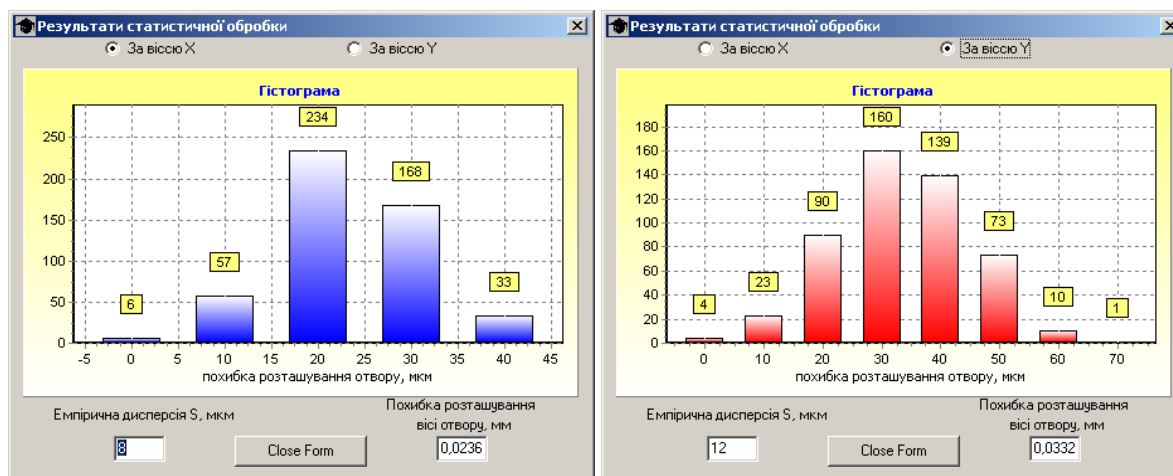


Рис. 2.5 Гістограми похибки розташування отвору за осями X і Y

Для переведення програми в стан моделювання натиснути кнопку «Close Form», а на головному інтерфейсі натиснути кнопку «Reset» і встановити координати наступного отвору. Повторити цикл моделювання.

Таблиця.2.1 – Результати експериментальних досліджень

№	Координати отвору		За віссю X		За віссю Y	
	X_0 , мм	Y_0 , мм	S , мкм	$\pm\delta$, мм	S , мкм	$\pm\delta$, мм
1	110	0	7,7	0,0240	11,5	0,0324
2	90	0	7,9	0,0235	9,3	0,0278
3	70	0	8	0,0234	7,4	0,0238
4	50	0	7,6	0,0229	6,9	0,0217
5	30	0	7,5	0,0233	7	0,0219
6	10	0	7,9	0,0236	7,2	0,0216
7	0	90	10,5	0,0298	7,4	0,0221
8	0	70	8,3	0,0247	7,1	0,0215
9	0	50	7,5	0,0238	7,2	0,0217
10	0	30	7,7	0,0236	7,4	0,0216
11	0	10	7,3	0,0237	7,6	0,0216

Результати експериментів в графічній формі представлені на рис. 2.6.

Висновки

1. Похибка розташування отворів у координатній системі суттєво залежить, при інших рівних умовах, від координат отвору по відношенню до координат базових отворів, що необхідно урахувати при призначенні допусків на координатні розміри отворів, що обробляються.

2. При зміні координати X за віссю Y (експерименти №1-6, таблиця 2.1) точність розташування отворів за координатою X не змінюється, а за

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ БАЗУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ НА ПАЛЕЦЬ І ЗРІЗАНИЙ ПАЛЕЦЬ

координатою Y похибка збільшується при віддаленні отвору від координати X розташування пальця. Так, при свердлінні отвору з координатами $X=110\text{мм}$ та $Y=0\text{мм}$ похибка на розташування досягає $0,0324\text{мм}$, що в 1,6 рази перевищує допуск на відстань між пальцями.

3. При зміні координати Y за віссю X (експерименти №7-11, таблиця 2.1) точність розташування отворів за координатою Y не змінюється, а за координатою X похибка збільшується при віддаленні отвору від координати Y розташування пальця. Так, при свердлінні отвору з координатами $X=0\text{мм}$ та $Y=90\text{мм}$ похибка на розташування досягає $0,0298\text{мм}$, що в 1,5 рази перевищує допуск на відстань між пальцями.

4. Результати проведених експериментів підтверджують необхідність розташування отворів, що базують, якомога далі від центру деталі, або початку координат, щоб усі елементи деталі, що обробляються знаходились між координатами цих отворів. При виході координат елемента деталі, що обробляється, за межі прямокутника з вершинами в координатах пальців треба урахувувати збільшення відхилення при призначенні допусків на відстань між пальцями.

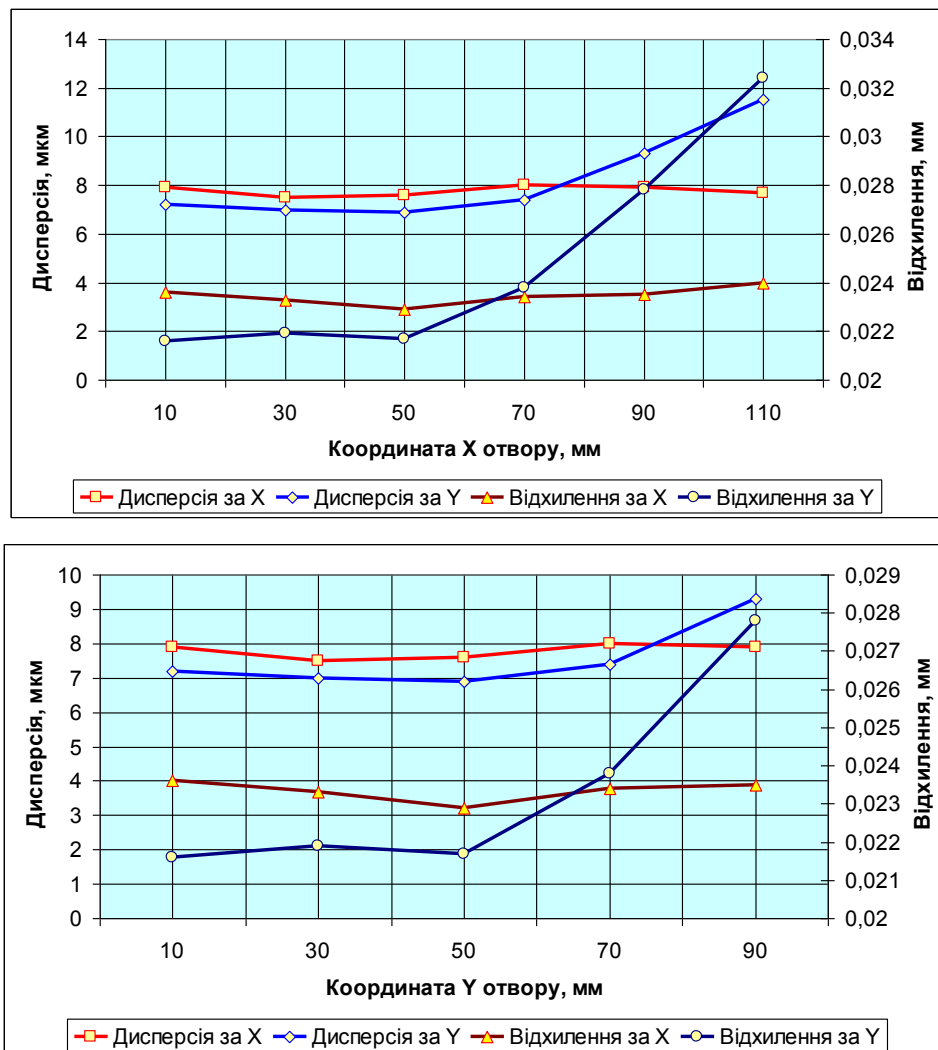


Рис. 2.6 Графіки дисперсій та відхилень

Як впливає з аналізу отриманої математичної моделі, та результатів експериментів похибка базування буде тим більше, чим далі від отворів, що базують, буде розташовані елементи деталі, що обробляються. Тому на практиці намагаються отвори, що базують, розташовувати по краях деталі, що обробляється. Однак є спеціальні деталі, де неможливо виконати таку умову, наприклад лопаті гідравлічних турбін (рис. 2.7).



Рис. 2.7 Лопать гідротурбіни

При фрезеруванні робочої поверхні, заготовка встановлюється на стіл верстату з ЧПК і для усунення похибки базування, яка буде спотворювати форму поверхні на віддалених ділянках, виконують підналагодження управляючої програми безпосередньо на верстаті.

Завдання

1. Провести експеримент за вихідними даними у відповідності до варіанту (таблиця 2.2) при зміні координати отвору, що обробляється, яка позначена як var з постійним значенням іншої координати з обраним кроком і отримати результати експерименту у вигляді експериментальних гістограм, експериментальних дисперсій та відхилень для кожної координати отвору, що обробляється. Програма «Свердління» знаходиться на диску в кінці книги.

2. За результатами експериментів заповнити таблицю 2.1 і побудувати графіки дисперсій та відхилень за відповідними координатами.

3. Зробити висновки щодо точності розташування отворів у порівнянні з допуском на відстань між пальцями.

Зміст протоколу

У протоколі навести: завдання з вихідними даними, схему розташування отворів, що обробляються по відношенню до координат пальців (вид

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХИБКИ БАЗУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ НА ПАЛЕЦЬ І ЗРІЗАНИЙ ПАЛЕЦЬ

у плані деталі), копію головного інтерфейсу з вихідними даними та копії інтерфейсів з гістограмами при одному положенні отвору, що обробляється, результати експериментальних досліджень у вигляді таблиці, графіки отриманих залежностей, висновки і пояснення.

Таблиця 2.2 - Вихідні дані

Перша цифра	Квалітет точності	Допуск на відстань, мкм	Друга цифра	Цил. палець		Зріз. палець		Напрямок руху, мм
				X, мм	Y, мм	X, мм	Y, мм	
0	7	20	0	-60	-60	60	60	X=var, Y=30
1	6	30	1	-40	-60	40	60	Y=var, X=20
2	6	40	2	-50	-60	50	60	X=var, Y=40
3	7	50	3	-30	-60	30	60	Y=var, X=10
4	9	60	4	-30	-50	30	50	X=var, Y=0
5	8	30	5	-30	-40	30	40	Y=var, X=0
6	6	40	6	-30	-30	30	30	X=var, Y=10
7	9	50	7	-40	-30	40	30	Y=var, X=10
8	7	60	8	-50	-30	50	30	X=var, Y=20
9	8	70	9	-60	-30	60	30	Y=var, X=0

Інструкції до роботи з програмою

Програма призначена для моделювання точності виготовлення отворів при базуванні деталі на циліндричний і зрізаний палець.

У вікнах головного інтерфейсу програми задати:

- координати розташування отвору під циліндричний палець;
- його квалітет точності;
- координати розташування отвору під зрізаний палець;
- його квалітет точності;
- координати отвору, що обробляється;
- кількість деталей в партії.

Для запуску процесу моделювання необхідно натиснути кнопку "Процес". У вікні анімації відбувається моделювання процесу свердління отвору. Після закінчення, для представлення результатів, натиснути на кнопку "Результати статистичної обробки". На додатковому інтерфейсі представляється гістограма точності деталей, що оброблені: похибка розташування отвору та її дисперсія за двома координатами.

Для відновлення роботи програми з новими даними необхідно натиснути кнопку "Reset".

Вихід з програми - натиснути кнопку "Exit".

Примітка: при завданні координат базування необхідно ураховувати встановлену систему координат – дивись рисунок справа інтерфейсу.

Запитання для самоконтролю

1. Для якого призначення координат отвору, що обробляється, буде спостерігатися найменший вплив похибки базування деталі?
 2. Який допуск на відстань між пальцями треба призначити, щоб при обробленні найбільш віддаленого отвору похибка базування не перевищувала задану? За якими залежностями робити такий розрахунок?
-
-



НАЛАГОДЖЕННЯ ІНСТРУМЕНТУ У ВЕРСТАТНОМУ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ФРЕЗЕРУВАННЯ ШПОНКОВОГО ПАЗУ

Мета роботи: Розрахунок геометричних параметрів установу верстатного пристрою для фрезерування шпонкового пазу та експериментальна перевірка точності обробки шпонкового пазу.

Теоретична частина

До шпонкового пазу, який зазвичай виконується на циліндричній поверхні деталі, висуваються вимоги щодо розташування його вісі відносно вісі деталі. Оскільки операція фрезерування шпонкового пазу найчастіше виконується при базуванні заготовки у призмі, то, при використанні універсального обладнання, для налагодження технологічного розмірного ланцюга, що забезпечує потрібну точність, використовують установи у вигляді еталонів, які встановлюються у призму.

Схема такого налагодження представлена на рис. 3.1, де при фрезеруванні пазу у призму 1 встановлюється заготовка 2.

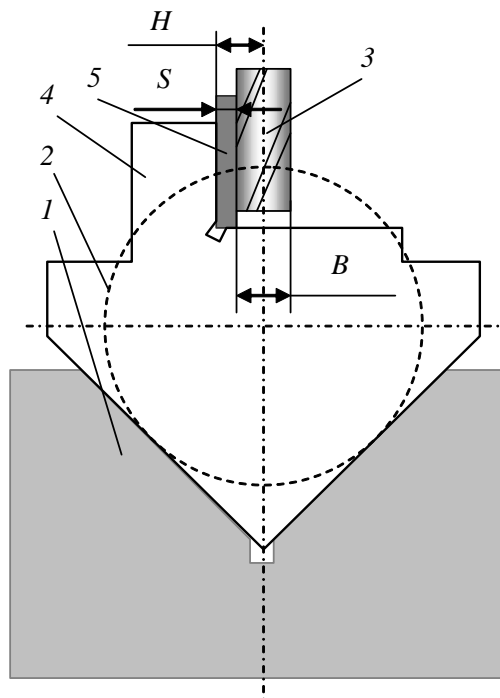


Рис. 3.1 Схема налагодження для фрезерування шпонкового пазу

Для налагодження положення фрези 3 у призму 1 встановлюється еталон-установ 4, а відстань фрези від його поверхонь визначається щупом 5. За рахунок щупу забезпечується необхідний розмір установка, який є розрахунковою величиною і на практиці забезпечується відповідним розміром H еталона і товщиною S щупа.

Таким чином, вихідними даними для розрахунку є:

1. Розмір $H_{EI_H}^{ES_H}$ еталону-установу, де ES_H , EI_H – верхнє і нижнє відхилення розміру H відповідно.

2. Розмір $B_{EI_B}^{ES_B}$ ширини пазу, де ES_B , EI_B – верхнє і нижнє відхилення розміру B відповідно.

3. Поле допуску на відхилення пазу від вісі заготовки ε_{II} , причому розташування, зазвичай, симетричне.

Треба визначити розмір і допуск на виготовлення щупа $S_{EI_S}^{ES_S}$, що забезпечує необхідне розташування пазу відносно вісі заготовки.

Розрахунок проводять у такій послідовності:

1. Визначають середній розмір B_c пазу і розміру H_c еталону-установу:

$$B_c = B + EI_B + \frac{ES_B - EI_B}{2}, \quad H_c = H + EI_H + \frac{ES_H - EI_H}{2}, \quad (3.1)$$

причому відхилення у формули підставляють з відповідним знаком.

2. Розраховують середній розмір S_c щупа:

$$S_c = H_c - \frac{B_c}{2}. \quad (3.2)$$

3. Розраховують верхній ES_S і нижній EI_S допуски на виготовлення щупа за формулами, що випливають з аналізу розмірних ланцюгів рис.3.1:

$$ES_S = \frac{\varepsilon_{II}}{2} + EI_H - \frac{ES_B}{2};$$

$$EI_S = ES_H - \frac{\varepsilon_{II}}{2} + \frac{EI_B}{2}. \quad (3.3)$$

Контроль точності виготовлення шпонкового пазу можна перевірити за схемами вимірювання, що показані на рис.3.2.

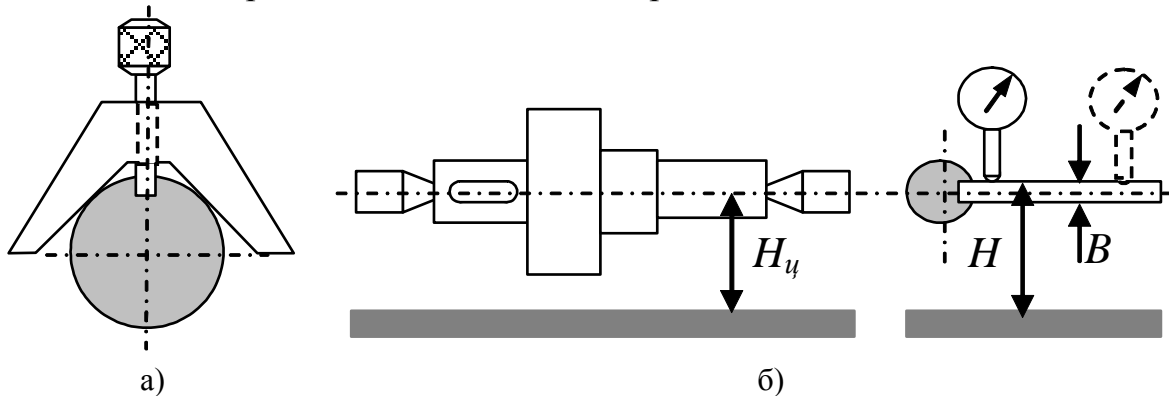


Рис. 3.2 Схема контролю шпонкового пазу:

а) симетричності, б) вимірювань похибки симетричності

На практиці контроль точності розташування пазу відносно вісі валу, тобто симетричність пазу, перевіряють накладною призмою з контрольним стрижнем (рис. 3.2,а). Для виміру похибки симетричності розташування пазу при наявності центрових отворів у валу можна застосовувати пристрій, що базується на стандартних вимірювальних центрах (рис. 3.2,б).

Для виміру похибки симетричності вал встановлюють у центрах висота H_0 яких відома, а у шпонковий паз вставляють калібровану пластину товщиною B і виставляють вал за допомогою індикатора так, щоб пластина була розташована горизонтально. Потім вимірюють відстань H від пластини до столу. Похибка дорівнює $\varepsilon_f / 2 = H - H_0 - B/2$.

Практична частина

Практична частина складається з двох етапів.

1. У відповідності до завдання, за вихідними даними, необхідно розрахувати розмір і допуск на виготовлення щупа.

Нехай розмір еталону-установу $30^{+0,015}_{-0,005}$, а розмір шпонкового пазу $12^{-0,015}_{-0,065}$. Допуск на відхилення пазу від вісі заготовки $\pm 0,05$ мм, отже поле допуску $\varepsilon_{II} = 0,1$ мм. За формулами (3.1) розраховуємо середні розміри пазу і еталону-установу:

$$B_c = B + EI_B + \frac{ES_B - EI_B}{2} = 12 - 0,065 + \frac{-0,015 + 0,065}{2} = 11,955 \text{ мм},$$

$$H_c = H + EI_H + \frac{ES_H - EI_H}{2} = 30 - 0,005 + \frac{0,015 + 0,005}{2} = 30,005 \text{ мм}.$$

Далі розраховуємо середній розмір щупа за формулою (3.2):

$$S_c = H_c - \frac{B_c}{2} = 30,005 - \frac{11,955}{2} = 24,0275 \text{ мм}.$$

Тепер можна визначити відхилення поля допуску на виготовлення щупа за формулами (3.3):

$$ES_S = \frac{\varepsilon_{II}}{2} + EI_H - \frac{ES_B}{2} = 0,05 - 0,005 - \frac{-0,015}{2} = 0,0525 \text{ мм},$$

$$EI_S = ES_H - \frac{\varepsilon_{II}}{2} + \frac{EI_B}{2} = 0,015 - 0,05 + \frac{-0,065}{2} = -0,0675 \text{ мм}.$$

2. Для виконання другого етапу роботи з метою перевірки точності обробки шпонкового пазу з урахуванням випадкової складової похибки оброблення використовується прикладна програма, інтерфейс якої пред-

ставлений на рис. 3.3. Інструкції та пояснення для роботи з програмою містяться у самій програмі і з'являються на екрані монітора при натисканні кнопки Help.

У вікна інтерфейсу підставляються вихідні і розрахункові дані, що отримані при виконанні розрахунків першого етапу у відповідності до вихідних даних завдання (таблиця 3.1), а для моделювання натискається кнопка «Процес».

На рис. 3.3 представлений стан інтерфейсу під час проведення експерименту з обробки заданої партії деталей. Оскільки всі розміри підпорядковують нормальному закону розподілу, то для отримання достовірних результатів розмір партії встановлюється не менше 200 штук. Після закінчення моделювання на інтерфейсі з'являється кнопка «Показати результати статистичної обробки».

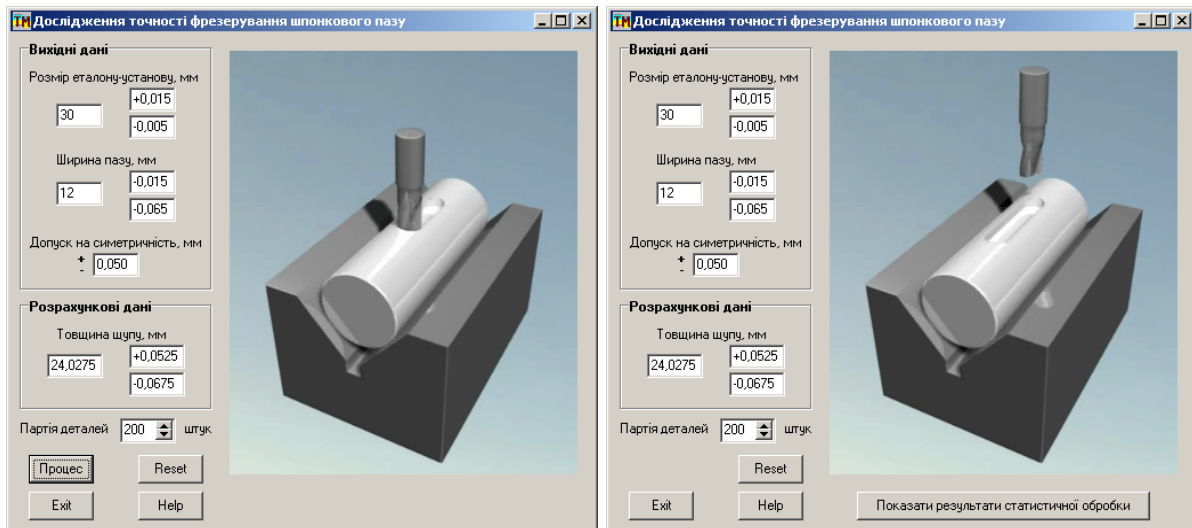


Рис. 3.3 Інтерфейси прикладної програми

На додатковому інтерфейсі (рис. 3.4) показана гістограма розподілу розмірів відхилення від симетричності, що відповідає вихідним і розрахунковим даним. З гістограми випливає, що зроблені розрахунки повністю забезпечують розташування шпонкового пазу в заданих межах допуску на відхилення від симетричності: емпірична дисперсія 20 мкм, а центр групування відхиляється від осі всього на 3,6 мкм.

На практиці при виготовленні щупа не ставлять номінальний розмір з такою точністю, що була отримана при розрахунках за формулами. Округляємо отримані розміри: $24,03^{+0,05}_{-0,07}$. Отже, необхідно виконати перевірку при розмірі щупа $24,03^{+0,05}_{-0,07}$. Результати такої перевірки показують, що не зважаючи на збільшення дисперсії до 22,7 мкм відхилення центру групування розмірів від осі залишається таким (3,3 мкм), що забезпечує задану точність виготовлення.



Рис. 3.4 Результати статистичної обробки

Висновки

1. Моделювання виготовлення шпонкового пазу при налаштуванні інструменту за щупом, розміри якого були розраховані, підтверджує їх вірність. Отриманий розмір щупу $24,0275^{+0,0525}_{-0,0675}$ забезпечує відхилення від симетричності центру групування 3,6 мкм, з дисперсією 20 мкм.

2. Виготовлення щупа за розміром $24,03^{+0,05}_{-0,07}$ також забезпечує виконання заданих умов, проте на практиці треба пам'ятати, що похибка базування складає тільки деяку частину від всієї похибки виготовлення.

Завдання

1. За вихідними даними у відповідності до варіанту (таблиця 3.1) розрахувати розмір установка верстатного пристрою для фрезерування шпонкового пазу, що забезпечує необхідну точність відхилення вісі паза відносно вісі циліндричної заготовки.

2. Провести моделювання процесу обробки заданої партії деталей за допомогою прикладної програми з накопиченням статистичної інформації за вимірами фактичного положення вісі шпонкового пазу. Програма «Шпонковий_паз» знаходиться на диску в кінці книги.

3. За допомогою прикладної програми провести моделювання при відхиленні розрахункових розмірів щупу від теоретичних.

Таблиця 3.1 - Вихідні дані

Перша цифра	Розмір еталону, мм	Допуск, мм		Друга цифра	Ширина пазу, мм	Допуск, мм		Допуск на симетричність, мм
0	20	+0,020	-0,020	0	10	-0,010	-0,030	±0,05
1	30	+0,015	-0,010	1	8	+0,005	-0,005	±0,01
2	25	+0,015	-0,015	2	6	+0,010	-0,005	±0,02
3	35	+0,025	-0,010	3	12	+0,015	-0,015	±0,03
4	40	+0,050	0	4	14	-0,010	-0,050	±0,04
5	45	+0,045	-0,025	5	16	-0,015	-0,050	±0,06
6	50	+0,005	-0,030	6	6	-0,010	-0,020	±0,05
7	55	+0,010	-0,040	7	8	-0,010	-0,050	±0,04
8	60	-0,010	-0,030	8	10	-0,020	-0,055	±0,03
9	65	-0,030	-0,060	9	12	-0,040	-0,065	±0,02

Зміст протоколу

У протоколі навести: завдання, розрахункову схему за рис. 3.1, розрахунки геометричних розмірів щупа, копію головного інтерфейсу програми моделювання з вихідними та розрахунковими даними, копію інтерфейсу з результатами статистичної обробки, результати моделювання при відхиленні від розрахункових даних, висновки.

Інструкції до роботи з програмою

Програма призначена для моделювання точності обробки шпонкового пазу. Для роботи з програмою задати вихідні дані у відповідних вікнах інтерфейсу і натиснути кнопку "Процес".

Після демонстрації обробки однієї деталі обраної партії з'являється кнопка "Показати результати статистичної обробки". Після натискання цієї кнопки на додатковому інтерфейсі з'являються результати для всієї заданої партії деталей.

Для виконання нового експерименту закрити додатковий інтерфейс і натиснути кнопку "Reset" на головному інтерфейсі. Після зміни вихідних даних для нового моделювання – кнопка "Процес".

Запитання для самоконтролю

1. Яким чином контролюється точність виготовлення шпонкового пазу?
2. Накресліть розмірні ланцюги, з аналізу яких були отримані формули для розрахунку відхилень розміру щупа (3.3).
3. Чи буде відбуватися таке розсіювання розмірів відхилення від симетричності шпонкового пазу, як при моделюванні, на практи-

НАЛАГОДЖЕННЯ ІНСТРУМЕНТУ У ВЕРСТАТНОМУ ПРИСТРОЇ ДЛЯ
ФРЕЗЕРУВАННЯ ШПОНКОВОГО ПАЗУ

ці, при виготовленні партії деталей за одним налагодженням положення фрези? Чому?

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ШПИНДЕЛЯ ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА НА СИЛУ ЗАТИСКУ ЗАГОТОВКИ

Мета роботи: Визначення залежностей сили затиску та коефіцієнту запасу затиску заготовки від частоти обертання шпинделя токарного верстату.

Теоретична частина

Підвищення технічного рівня верстатів з ЧПК вимагає відповідного підвищення якості оснастки, що використовується. Тенденції розвитку верстатів з ЧПК, крім систем управління, полягають у підвищенні потужності, жорсткості, точності, частоти обертання шпинделя. Сучасні токарні верстати з ЧПК для використання переваг високошвидкісної обробки оснащуються шпинделями з відповідними приводами безступінчастого регулювання, які мають верхню межу 6000 об/хв. і вище.

Однак, підвищення частоти обертання шпинделя викликає збільшення відцентрових сил в патроні, що зменшує силу затиску заготовки. Так, за даними фірми «Forkardt» сила затиску при частоті обертання 4000 об/хв. для патрона 3NH250 знижується майже наполовину.

Для пояснення дії відцентрових сил в патроні токарного верстата можна скористатися схемою за рис. 4.1. На схемі пунктирними лініями показано положення затискного механізму при торканні заготовки кулачком. Далі, під дією сили F_1 відбувається деформація всього ланцюгу передачі зусилля, жорсткість цього ланцюгу умовно представлена пружиною C на схемі, і механізм займає положення затиску, яке показано суцільними лініями на рис. 4.1.

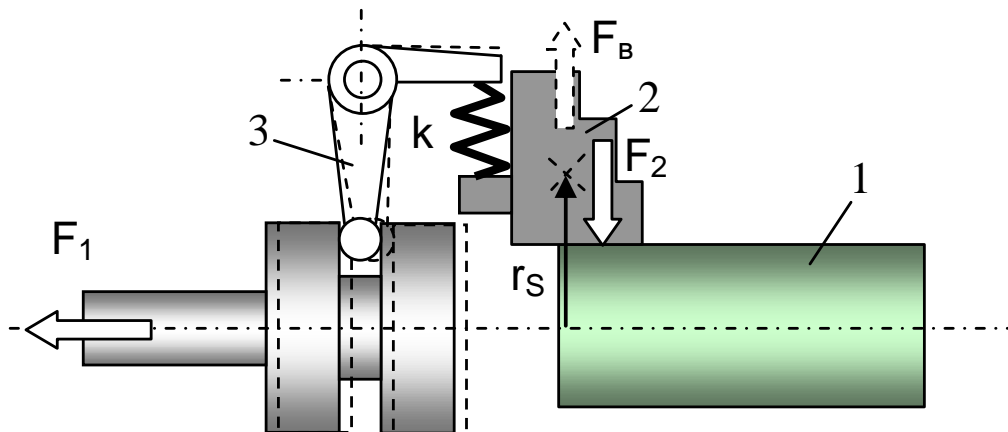


Рис. 4.1 Схема дії сил в патроні токарного верстата

При обертанні патрона навколо вісі на кулачок діють відцентрові сили, які визначаються за відомою формулою:

$$F_g = m r_s \omega^2, \quad (4.1)$$

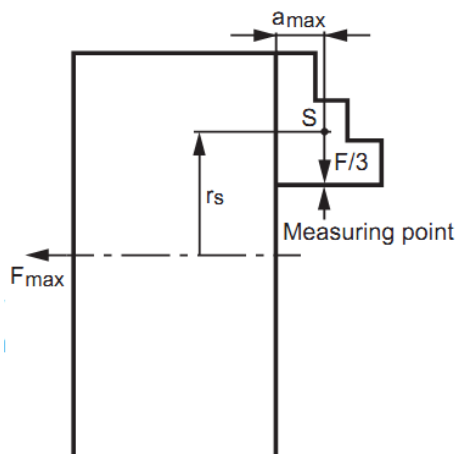
де m – маса кулачка, r_s – радіус центра мас кулачка від осі обертання, ω – частота обертання шпинделя.

Таким чином, сила затиску на одному кулачку зменшується:

$$F_2 = (F_2)_0 - F_g, \quad (4.2)$$

де $(F_2)_0$ – сила затиску на одному кулачку при $\omega=0$. Слід зауважити, що при закріпленні заготовки розтисканням кулачків, в рівнянні (4.2) знак «-» змінюється на знак «+».

Порівняння залежності сили затиску від частоти обертання шпинделя з експериментальними даними (рис. 4.2), які наводить фірма Schunk (www.schunk.com), показують, що отримані формули (4.2) не дають адекватного результату.



$F/3$ – сила затиску на одному кулачку,
 S – центр мас кулачка,
 r_s – радіус центра мас кулачка,
 a_{max} – відстань центра мас в осьовому напрямку,
 F_{max} – сила на приводі,
 Measuring point – точка вимірювань.

Рис. 4.2 Схема експериментальних вимірювань

На рис. 4.3 представлені графіки експериментальних залежностей фірми Schunk, отримані для наступних кулачків: лінія 1 – кулачок SHB FR-130 масою 0,4кг, лінія 2 – кулачок SWB FR-132 масою 1,0кг, лінія 3 – кулачок FR-AL 130 масою 0,4кг. Як видно з графіків рис. 4.3 сила затиску для кулачка SWB-FR 132 масою $m_2=1,0$ кг при частоті обертання шпинделя 4000 об/хв. дорівнює 32,9кН (лінія 2), а для кулачка FR-AL 130 масою $m_3=0,4$ кг такої ж форми, але виготовленого з алюмінію, дорівнює 40,9кН (лінія 3).

За використання формул (4.1) - (4.2) можна визначити радіус центра мас кулачка. Після підстановки (4.1) в (4.2) маємо:

$$m_2 r_s \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 - m_3 r_s \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 = 1 r_s (418)^2 - 0,4 r_s (418)^2 = 40,9 - 32,9 = 8 \text{ кН},$$

звідки $r_s=0,076\text{м}$.

Тепер за залежністю (4.1) можна визначити відцентрову силу, що діє на кулачок, наприклад SWB-FR 132, з масою $m_2=1\text{кг}$:

$$m_2 r_s \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 = 1 \cdot 0,076 \cdot (418)^2 = 13,336 \text{кН}.$$

Проте, за графіком рис. 4.3 вона складає $45\text{кН} - 32,9\text{кН} = 12,1\text{кН}$.

Spannkraft-Drehzahl-Diagramm ROTA NCD 132-32

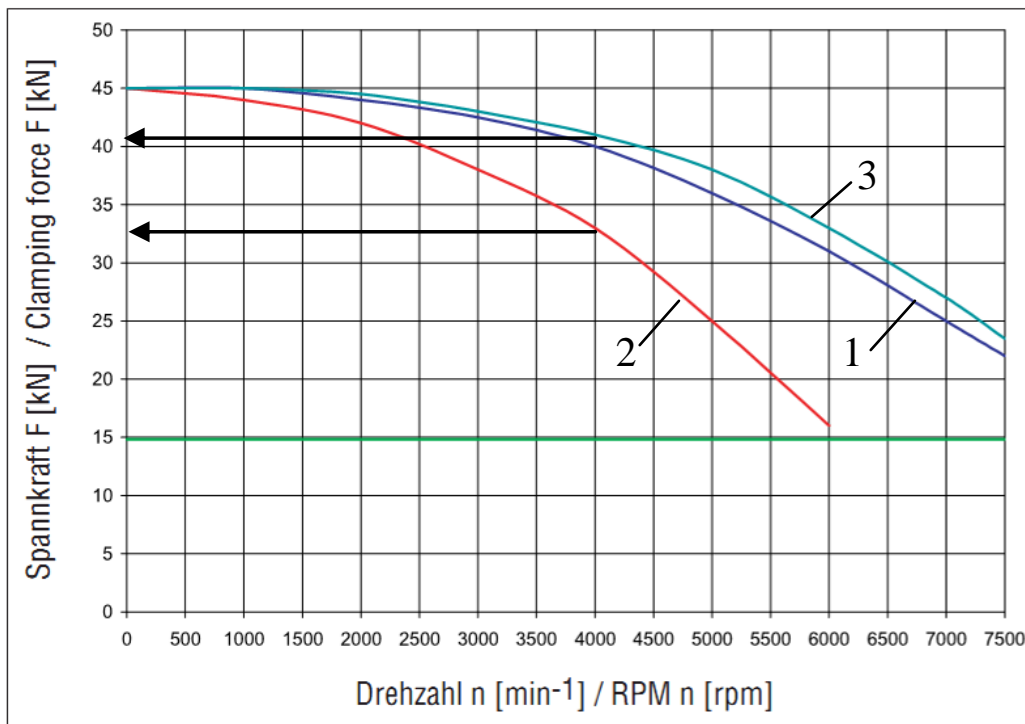


Рис. 4.3 Графіки експериментальних залежностей фірми Schunk

Таку розбіжність можна пояснити неадекватністю розрахункової моделі, яка не урахує дії на кулачок моменту, що виникає при дії на нього відцентрової сили. Усунути такі розбіжності можна з аналізу схеми рис. 4.4.

На рис. 4.4,а показаний момент у циклі затиску заготовки, коли кулачок торкнувся заготовки. Зв'язки кулачка з патроном і заготовкою умовно позначені пружними зв'язками з однаковими жорсткостями C .

При затисканні заготовки (рис. 4.4,б) виникає сила затиску F , яка викликає пружну деформацію δ в напрямку дії:

$$(F_2)_0 = 2C\delta. \quad (4.3)$$

При обертанні патрона в кулачку виникає відцентрова сила F_e і відповідний момент M_e , що діє навколо центру S мас кулачка:

$$F_e = m\omega^2 r_s, \quad M_e = aF_e. \quad (4.4)$$

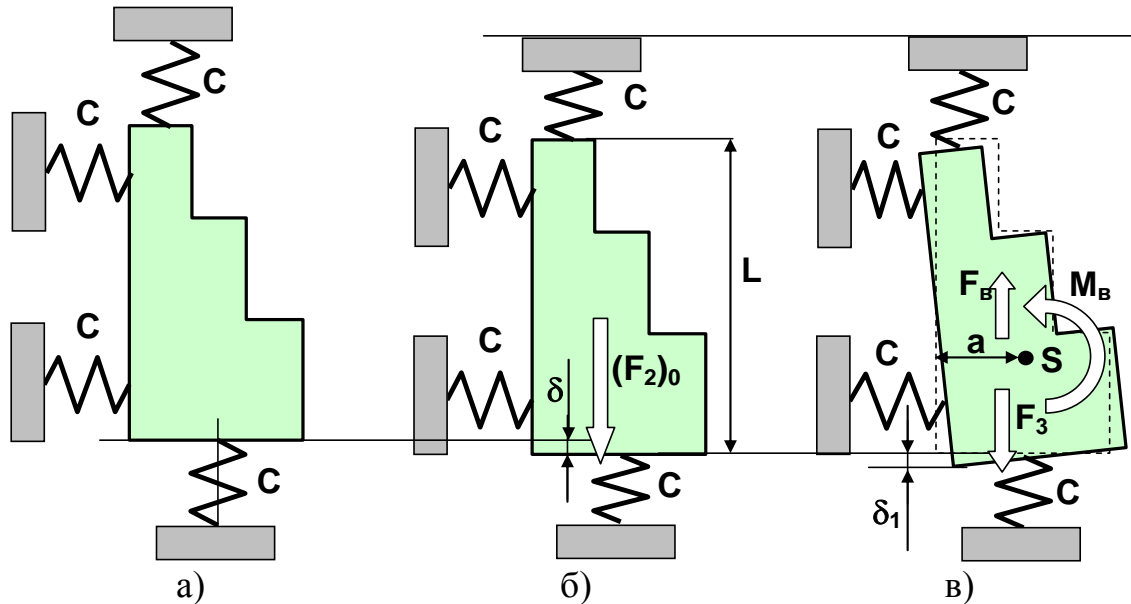


Рис. 4.4 До визначення сили затиску

Момент M_e викликає реакції умовних опор і їх відповідні деформації, які спричиняють поворот кулачка і переміщення δ_1 :

$$\delta_1 = \frac{F_e a}{CL}. \quad (4.5)$$

Таким чином, сила затиску під час обертання патрону може бути визначена з наступного рівняння:

$$F = (F_2)_0 - m r_s \omega^2 + C \delta_1. \quad (4.6)$$

Після підстановки рівняння (4.5) з урахуванням (4.4) в залежність (4.6) остаточно отримуємо формулу придатну для розрахунків:

$$F = (F_2)_0 - m\omega^2 \left(r_s - \frac{a}{L} \right). \quad (4.7)$$

В конструкціях сучасних патронів для високошвидкісних токарних верстатів намагаються використовувати ті ж самі відцентрові сили для компенсації ослаблення сили затиску. На рис. 4.5 представлений такий патрон де відцентрові сили, що утворюються на базових кулачках 1, компенсуються також відцентровими силами вантажів 2 через важільну передачу з віссю 3 повороту. Чим більше частота обертання шпинделя разом з патроном, тим більше відцентрові сили, що діють одночасно на кулачок і вантаж. Оскільки компенсація відцентрових сил відбувається тільки при певному розмірі розташування кулачків, такі патрони мають обмежений діапазон заготовок, що затискаються.

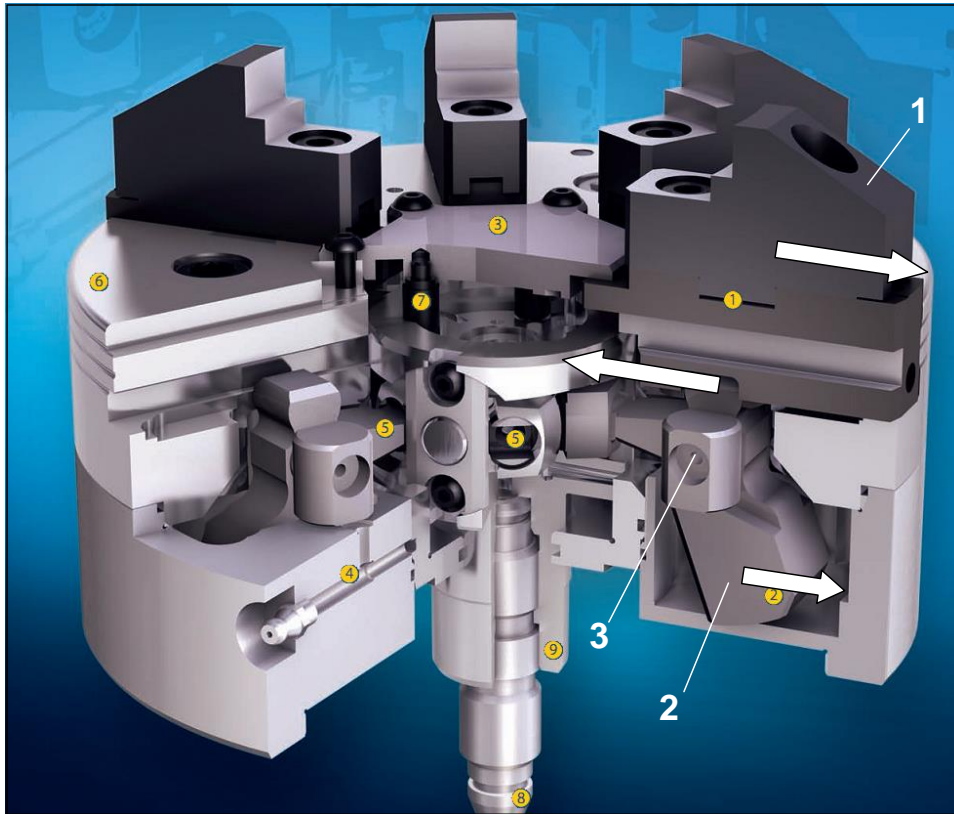


Рис. 4.5 Патрон фірми Schunk з компенсацією дії відцентрових сил

Таким чином, для урахування зменшення сили затиску та проектування спеціальних патронів з компенсацією відцентрових сил необхідно визначати масу затискних кулачків. Маса затискних кулачків визначається за їх об'ємом з урахуванням питомої ваги матеріалу, з якого вони зроблені. При визначенні маси, зазвичай, не ураховують отвори під закріплення кулачка в напрямних патрона, бо в складеному вигляді там знаходяться болти кріплення з Т-подібними елементами. Крім того, необхідно ураховувати радіус розташування центра мас по відношенню до вісі обертання шпинделя.

В таблиці 4.1 наведені формули для розрахунку маси і радіусу обертання кулачків трьох основних типів форм.

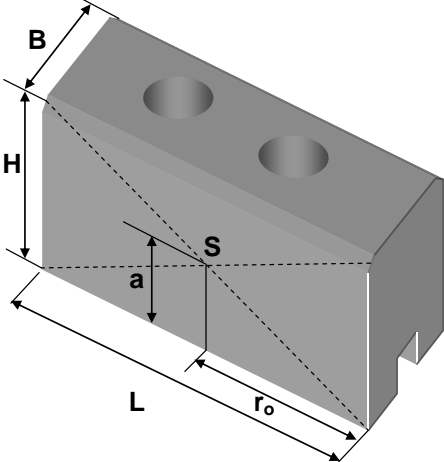
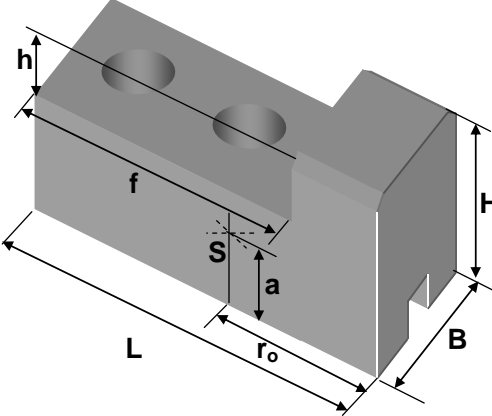
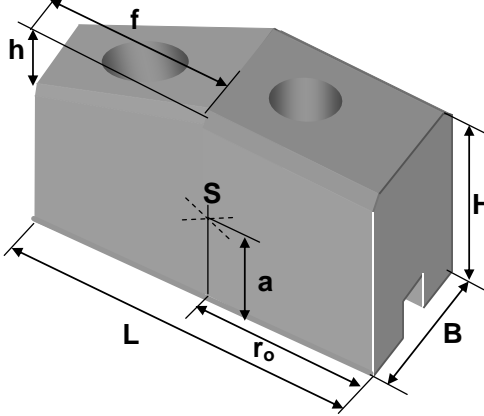
При розрахунках за формулами таблиці 4.1 розрахунок маси кулачка для визначення відцентрової сили, що зменшує силу затиску, обов'язково ураховувати кількість кулачків у відповідності до схеми за рис. 4.1.

Коефіцієнт k_3 запасу затиску заготовки визначається за формулою:

$$k_3 = \frac{Fk_{тер}D_3}{2M_p}, \quad (4.8)$$

де $M_p = P_Z D_3 / 2$ - момент різання, $P_Z = C_p H^{xp} S^{yp} V^n$ - складова сили різання, D_3 – діаметр заготовки, $k_{тер}$ – коефіцієнт тертя.

Таблиця 4.1 – Характеристики кулачків

Тип	Основні розміри	Формули
A		$m = HLB\gamma,$ <p>де H, L, B – висота, довжина і ширина кулачка, γ – питома вага матеріалу.</p> $r_0 = L/2, r_s = r_0 + D/2, a = H/2,$ <p>де r_s – радіус обертання центру мас кулачка в патроні, D – діаметр заготовки, a – відстань центра мас в осьовому напрямку.</p>
B		$m = (HLB - hfB)\gamma,$ <p>де H, L, B – висота, довжина і ширина кулачка, h, f – висота і довжина ступені, γ – питома вага матеріалу.</p> $r_0 = \frac{LHL/2 - fh(L - f/2)}{LH - fh},$ $r_s = r_0 + D/2,$ $a = \frac{HLH/2 - fh(H - h/2)}{LH - fh},$ <p>де r_s – радіус обертання центру мас кулачка в патроні, D – діаметр заготовки, a – відстань центра мас в осьовому напрямку.</p>
C		$m = (HLB - hfB/2)\gamma,$ <p>де H, L, B – висота, довжина і ширина кулачка, h, f – висота і довжина ступені, γ – питома вага матеріалу.</p> $r_0 = \frac{LHL/2 - fh(L - f/3)/2}{LH - fh/2},$ $r_s = r_0 + D/2,$ $a = \frac{HLH/2 - fh(H - h/3)/2}{LH - fh/2},$ <p>де r_s – радіус обертання центру мас кулачка в патроні, D – діаметр заготовки, a – відстань центра мас в осьовому напрямку.</p>

Практична частина

Для виконання роботи з метою визначення залежностей сили затиску та коефіцієнту запасу затиску заготовки від частоти обертання шпинделя токарного верстату, перш за все необхідно розрахувати параметри кулачка, що визначатимуть його відцентрову силу.

Нехай заданий кулачок типу А, виготовлений зі сталі з наступними геометричними розмірами: висота $H=80\text{мм}$, $L=100\text{мм}$, $B=30\text{мм}$. За формулами таблиці 4.1. визначаємо:

$$m = HLB\gamma = 8 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 7,8 = 1872\text{г} = 1,872\text{кг}, \quad r_s = L/2 = 50\text{мм},$$

$$a = H/2 = 40\text{мм}.$$

Практична частина роботи виконується за допомогою прикладної програми, інтерфейс якої показаний на рис. 4.6. Вихідні дані вводяться у вікна з лівої частини інтерфейсу (рис. 4.6).

При цьому, ураховуючи застосування трикулачкового патрону, у вікнці «Маса, кг» необхідно ввести масу $m = 1,872 \times 3 = 5,616\text{кг}$.

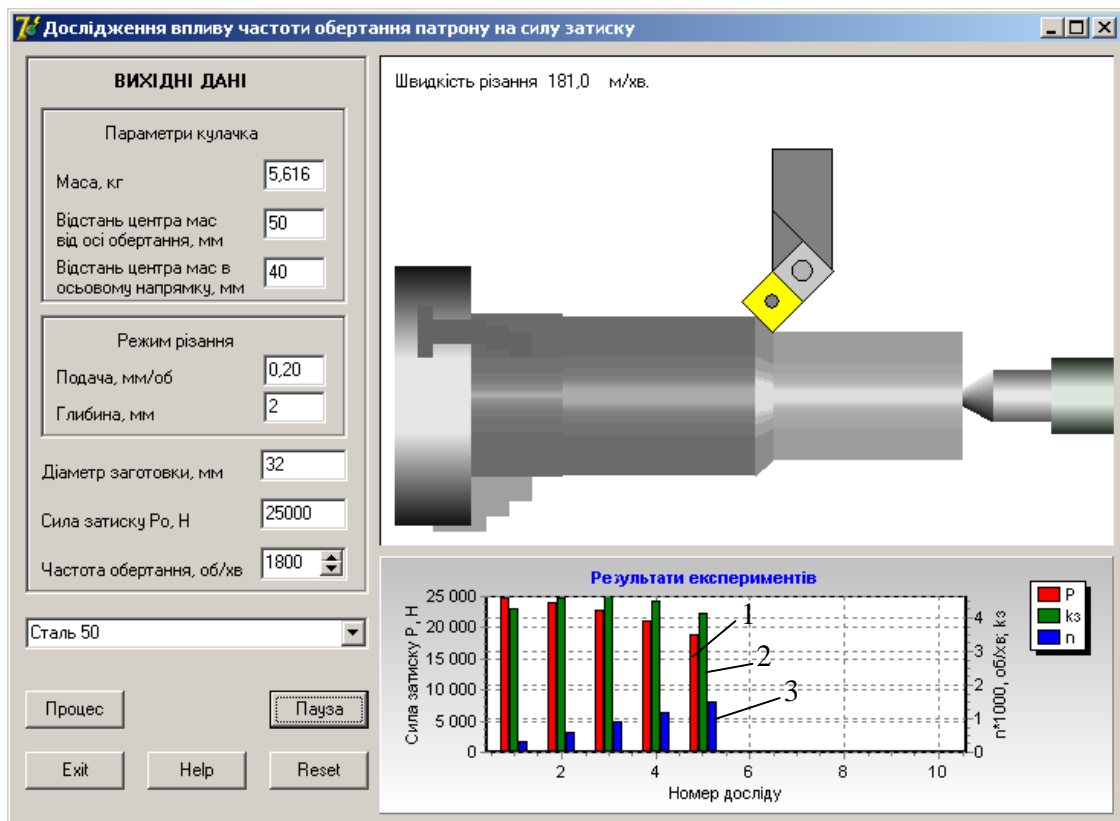


Рис. 4.6 Інтерфейс прикладної програми під час проведення експериментів

Увага! При невірному визначенні параметрів кулачка програма виводить відповідне повідомлення і далі не функціонує (рис. 4.7).

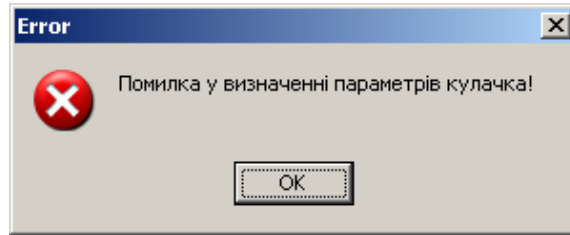


Рис. 4.7 Повідомлення про помилку

Дослідження рекомендується починати з частоти обертання 300 об/хв., а далі з обраним кроком змінювати її до отримання результатів, що визначатимуть певну залежність сили затиску і коефіцієнта запасу затиску від частоти обертання шпинделя.

Для проведення моделювання після завдання всіх необхідних параметрів, у відповідності до варіанту, натиснути кнопку «Процес». При цьому на графічному полі інтерфейсу відбувається моделювання процесу точіння заготовки, а у верхньому куті позначається швидкість різання.

Після закінчення експерименту на графіку з'являються результати у вигляді сили затиску, коефіцієнту запасу і частоти обертання (стовпчик 1, 2 і 3 відповідно на рис. 4.6). Після зміни частоти обертання для проведення наступного експерименту натиснути кнопку «Reset» і знов натиснути кнопку «Процес».

Всі інструкції з маніпулювання програмою з'являються на додатковому інтерфейсі при натисканні кнопки «Help» на головному інтерфейсі.

Експерименти виконуються до моменту, коли коефіцієнт запасу буде більше одиниці. При досягненні цього значення на інтерфейсі з'являється відповідне повідомлення (рис. 4.8) і експерименти з подальшим збільшенням частоти обертання стають неможливими. Якщо виникає потреба в додаткових даних, експерименти можна продовжувати тільки при зменшенні частоти обертання шпинделя.

Результати експериментів записати у таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати експериментів

№	Частота обертання, об/хв.	Сила затиску, Н	Коефіцієнт запасу
1	300	24750	4,25
2	600	24000	4,58
3	900	22800	4,62
4	1200	21100	4,47
5	1500	18900	4,13
6	1800	16200	3,65
7	2100	13050	3,00
8	2400	9390	2,21
9	2700	5250	1,25

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ШПИНДЕЛЯ ТОКАРНОГО ВЕРСТАТА НА СИЛУ ЗАТИСКУ ЗАГОТОВКИ

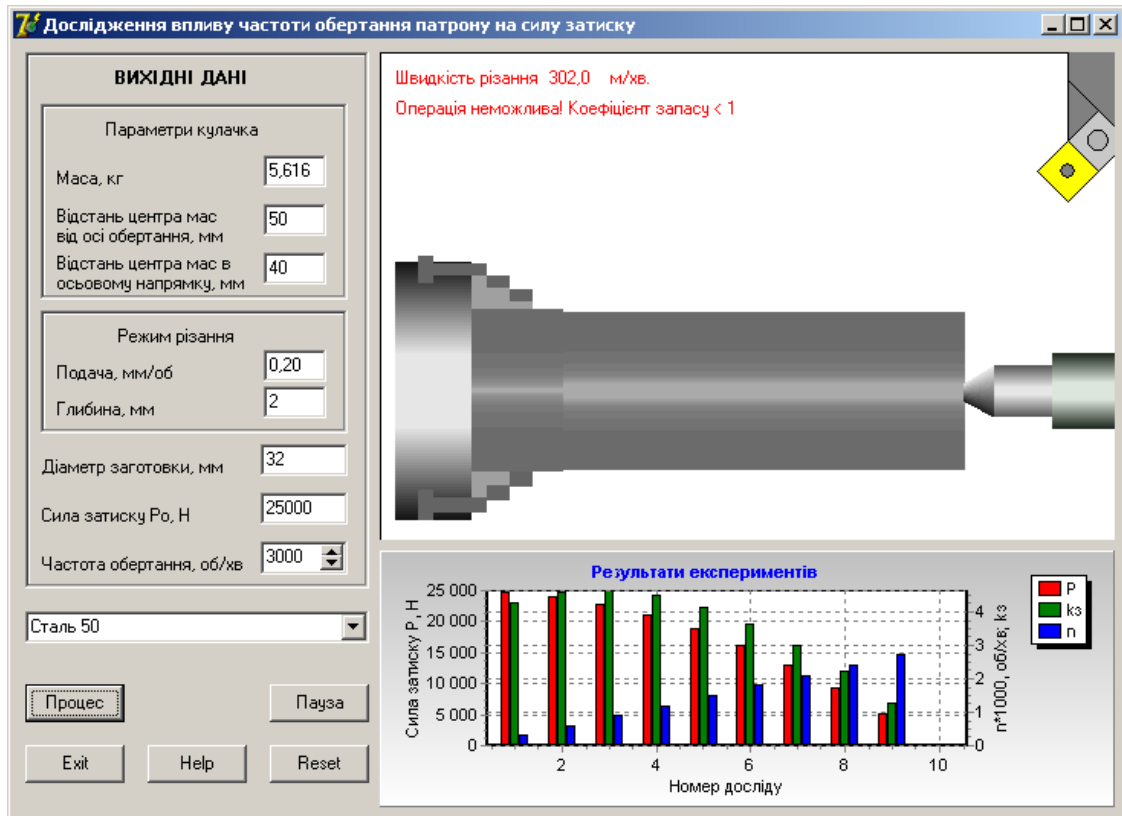


Рис. 4.8 Інтерфейс прикладної програми на закінчення експериментів

За експериментальними даними таблиці 4.2 в середовищі Excel були побудовані графіки зміни параметрів системи (рис. 4.9).

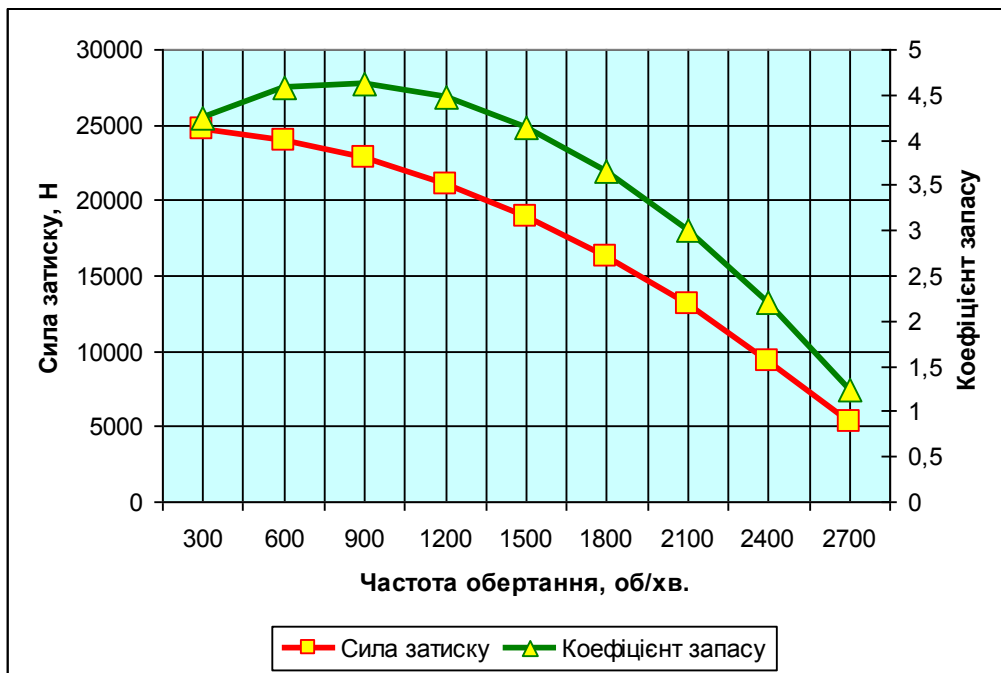


Рис. 4.9 Графіки зміни сили затиску і коефіцієнту запасу від частоти обертання шпинделя

Висновки

1. Моделювання дозволяє визначити максимально допустиму частоту обертання шпинделя токарного верстата при закріпленні заготовки в трикулачковому патроні для виконання операції точіння з заданим режимом різання. Для забезпечення коефіцієнта запасу не менше 2,5 частота обертання шпинделя не повинна перевищувати 1900 об/хв.

2. Отриманий характер зміни коефіцієнта запасу затиску заготовки має екстремум при частоті обертання шпинделя 900 об/хв., що свідчить про зворотну залежність сили різання від швидкості для точіння заданого матеріалу.

Завдання

1. За вихідними даними у відповідності до варіанту (таблиця 4.3 і таблиця 4.4) розрахувати масу і необхідні геометричні параметри кулачка патрону: відстань центра мас від осі обертання і відстань центра мас в осьовому напрямку.

2. Провести моделювання зі зміною частоти обертання шпинделя з заздалегідь обраним кроком до моменту появи повідомлення про неможливість оброблення.

3. Записати результати експериментів у таблицю і побудувати графіки залежності сили затиску і коефіцієнту запасу від частоти обертання шпинделя.

Таблиця 4.3 – Вихідні дані

Перша цифра	Режим різання		Заготовка		Друга цифра	Характеристика кулачка		
	Подача, мм/об.	Глибина, мм	Матеріал	Діаметр, мм		тип	матеріал	кількість
0	0,20	1,0	Сталь 50	30	0	А	Сталь	3
1	0,30	2,0	Сталь 25ХГГ	26	1	В	Титан	3
2	0,10	3,0	Сталь 30ХМА	24	2	С	Алюмін.	3
3	0,15	2,5	Сталь 35ХГСА	32	3	А	Титан	6
4	0,10	2,0	Чавун СЧ20	34	4	В	Алюмін.	6
5	0,23	1,7	Чавун ВЧ60	36	5	С	Сталь	6
6	0,18	2,3	Чавун КЧ60-3	38	6	А	Алюмін.	6
7	0,22	1,9	Чавун КЧ60-3	40	7	В	Сталь	3
8	0,16	2,2	Сталь 12Х18Н9Т	44	8	С	Титан	6
9	0,25	4,0	Алюміній АМГ6	48	9	А	Сталь	6

Питома вага: Сталь – 7,8г/см³, Титан – 4,5г/см³, Алюміній – 2,7г/см³.

Таблиця 4.4 – Розміри стандартних кулачків SWB 250 (Schunk)

Тип	H , мм	L , мм	B , мм	h , мм	f , мм
А	80	120	40	-	-
В	80	120	40	40	80
С	80	120	40	50	100

Зміст протоколу

У протоколі навести: завдання, розрахункову схему для визначення необхідних параметрів кулачка (у відповідності до варіанту) та розрахунки маси, відстані центру мас від осі обертання і відстані центру мас в осьовому напрямку, копію головного інтерфейсу програми моделювання при закінченні експериментів, таблицю експериментальних даних, графіки залежностей сили затиску і коефіцієнту запасу від частоти обертання, висновки.

Інструкції до роботи з програмою

Програма призначена для дослідження залежності сили затиску в патроні токарного верстата від частоти обертання.

Для роботи з програмою задати вихідні дані у відповідних вікнах інтерфейсу, вибрати матеріал заготовки з меню, що випадає і натиснути кнопку "Процес".

В графічному вікні відбувається анімація процесу точіння заготовки, з позначенням фактичної швидкості різання, а після його закінчення у вікні "Результати моделювання" у вигляді стовпців з'являються наступні характеристики процесу: червоний стовпчик - фактична сила затиску, зелений стовпчик - коефіцієнт запасу, синій стовпчик - частота обертання.

Для точного вимірювання величин у вікні "Результати моделювання" можна збільшувати масштаб зображення: підвести мишку до верхнього правого кута обраної для збільшення ділянки, натиснути ліву клавішу і "протягнути" донизу-вліво, відпустити клавішу. Таке збільшення можна виконувати декілька разів до бажаного масштабу.

Повернення до вихідного масштабу – у будь-якому місці вікна "Результати моделювання" натиснути ліву клавішу мишки, "протягнути" вправо-вгору і відпустити клавішу.

Для проведення наступного експерименту натиснути кнопку "Reset" (зображення в графічному вікні займає вихідне положення), змінити необхідний параметр процесу у вихідних даних і натиснути кнопку "Процес".

Запитання для самоконтролю

1. Принцип функціонування патрона з автоматичною компенсацією дії відцентрових сил.

2. Схема дії сил та моментів на кулачок при його обертанні в патроні.
 3. Як експериментально вимірювати силу затиску в патроні при його обертанні? Запропонуйте схеми.
 4. Яким чином отримані залежності таблиці 4.1 для розрахунку r_s a ?
 5. Чому графік залежності коефіцієнту запасу затиску заготовки має екстремум? Не має екстремуму ?
-
-



ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗАКРІПЛЕННЯ ЗАГОТОВОК В ЗАТИСКНИХ ЕЛЕМЕНТАХ ВЕРСТАТНИХ ПРИСТРОЇВ

Мета роботи: Дослідження пружних характеристик затискних пристроїв першого та другого типів.

Теоретична частина

Всі затискні верстатні пристрої в залежності від їх характеристик кінематичного ланцюга передачі зусилля на заготовку умовно розподіляються на пристрої першого і другого типів. Верстатні пристрої першого типу характеризуються наявністю самогальмівної пари в ланцюгу передачі зусилля затиску на заготовку, тоді як у верстатних пристроях другого типу така пара відсутня.

До верстатних пристроїв першого типу можна віднести всі затискні пристрої, що мають у ланцюзі передачі зусилля гвинтову пару, наприклад, тиски з ручним затиском.

На рис. 5.1 представлена конструкція сучасних лещат з ручним приводом фірми Schunk (www.schunk.com).

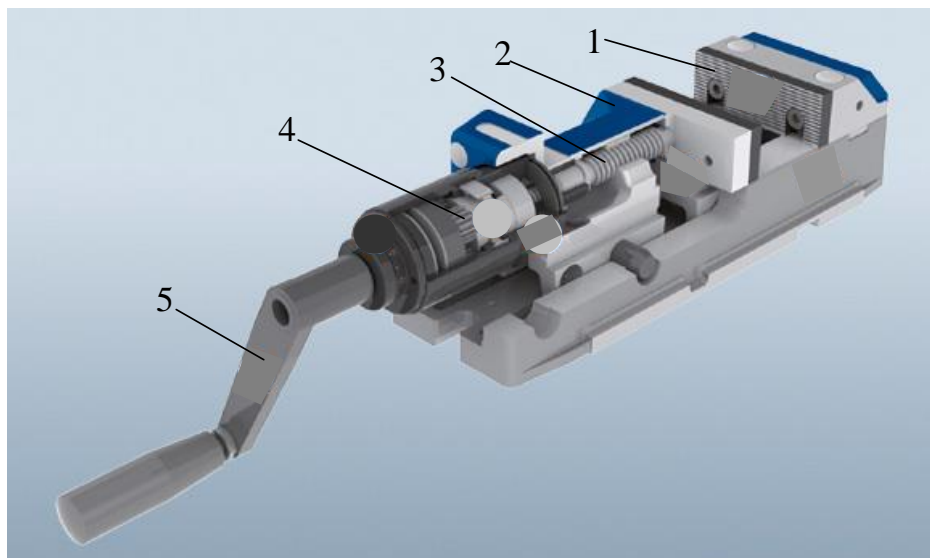


Рис. 5.1 Лещата фірми Schunk

Лещата складаються з нерухомої губки 1 і рухомої губки 2, яка переміщується гвинтовою парою 3. Обертання гвинта виконується від ручки 5 через пристрій 4, що забезпечує можливість затиску за неповні оберти рукоятки 5.

До верстатних пристроїв другого типу відносяться затискні пристрої, що оснащені гідравлічним або пневматичним приводом і мають у ланцюгу передачі зусилля важільний механізм, наприклад, тиски з пневматичним затиском (рис. 5.2). На основі 1 встановлений поворотний стіл 2, на якому закріплена нерухома губка 3, а рухома губка 4 розміщена в напрямних цього стола. Сила затиску передається від штока 5 пневмоциліндра 6 через важіль 7 на рухома губку 4 тисків.

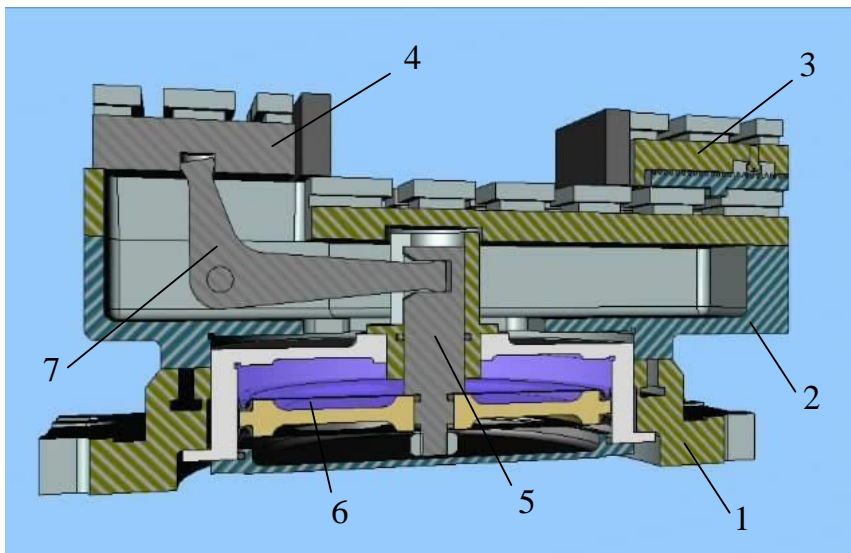


Рис. 5.2 Тиски з пневматичним затиском

Затискні верстатні пристрої призначені для утримання заготовки на верстаті під час оброблення і мають забезпечувати, крім надійного утримання заготовки, мінімальну деформацію ТОС під дією сили різання. З урахуванням різних властивостей кінематичних ланцюгів передачі зусилля затиску пристроїв першого і другого типів, їх пружні властивості можуть бути представлені різними схемами (рис. 5.3).

Для обох схем в позиції 1) заготовка знаходиться між двох губок з жорсткостями C_1 і C_2 і не затиснута, рухома губка знаходиться зліва, а нерухома – справа за рис. 5.3.

Для схеми з самогальмівною парою в ланцюгу передачі зусилля затиску (рис. 5.3,а) при затиску заготовки рухома губка деформується на величину y_1 , створюючи силу F_3 затиску, а заготовка переміщується від первинного стану на величину деформації нерухомої губки:

$$y_2 = \frac{F_3}{C_2}, \quad (5.1)$$

де F_3 – сила, що діє на заготовку від рухомої губки, яка в свою чергу обумовлюється сумарною деформацією рухомої губки:

$$F_3 = (y_1 - y_2)C_1. \quad (5.2)$$

Після підстановки (5.2) в (5.1) отримуємо формулу для визначення пружного переміщення заготовки від первинного стану:

$$y_2 = y_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2}. \quad (5.3)$$

При дії складової F сили різання – позиція 3) і позиція 4) на рис.5.3, а, переміщення заготовки від первинного стану змінюється:

$$y_2 = y_1 \frac{C_1}{C_1 + C_2} \mp \frac{F}{C_1 + C_2} = \frac{y_1 C_1 \mp F}{C_1 + C_2}, \quad (5.4)$$

де F – відповідна складова сили різання.

Таким чином, умови не розкриття зазорів з обох боків заготовки можуть бути представлені наступним чином:

$$y_1 \geq y_2 \geq 0. \quad (5.5)$$

Застосовуючи граничні значення умов не розкриття зазорів до (5.4) можна отримати величини необхідної деформації y_1 в обох випадках:

$$\begin{aligned} \text{при } y_2 \geq 0 \quad y_1 &\geq F / C_1 \\ \text{при } y_2 \leq y_1 \quad y_1 &\geq F / C_2 \end{aligned} \quad (5.6)$$

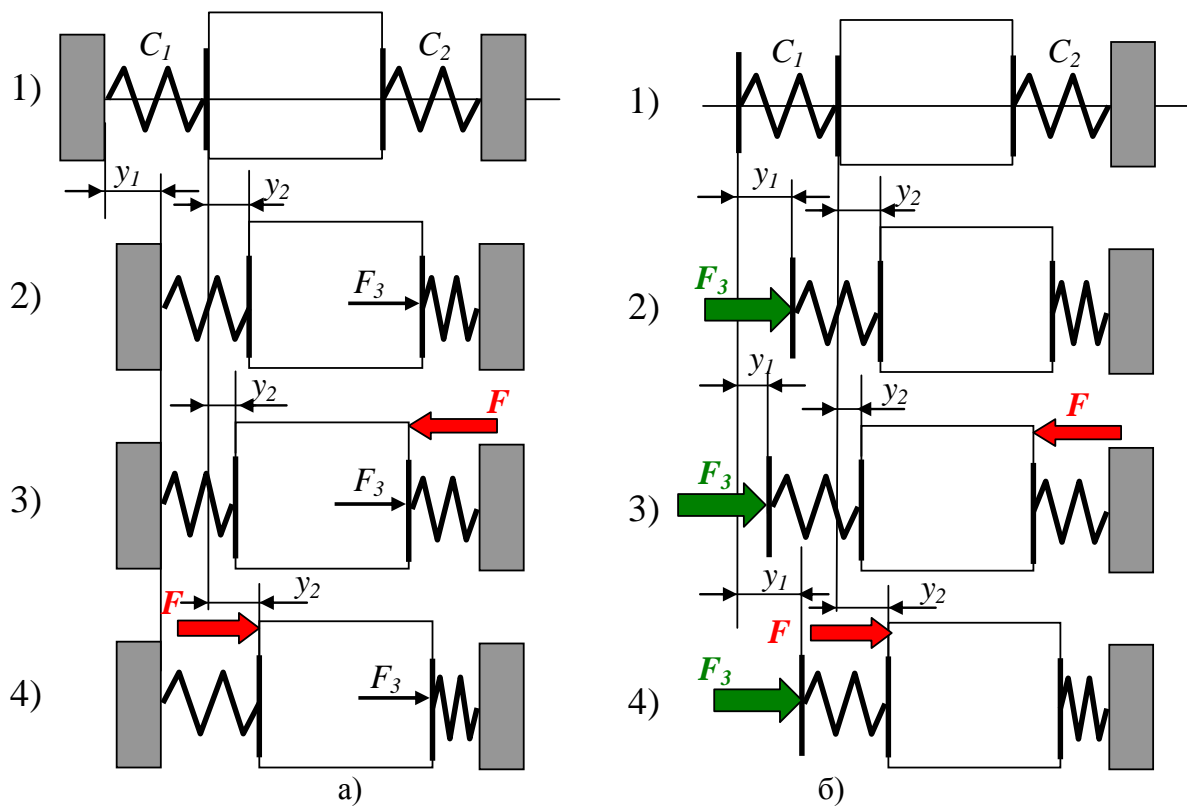


Рис. 5.3 Схеми пружних систем пристроїв першого (а)
і другого (б) типів

Для схеми з затиском силою F_3 , що створюється пневмо- або гідроциліндром (рис. 5.3,б) при затиску заготовки вся система деформується на величину:

$$y_1 = F_3 \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2}, \quad (5.7)$$

а заготовка переміщується від первинного стану на величину деформації нерухомої губки:

$$y_2 = \frac{F_3}{C_2}. \quad (5.8)$$

Таким чином, при дії складової F сили різання деформація рухомої губки залишається постійною, а деформація нерухомої губки:

$$y_2 = \frac{F_3 \mp F}{C_2}. \quad (5.9)$$

Умови закріплення заготовки мають сенс тільки при випадку 3) на рис. 5.3,б, ($y_2 \geq 0$) оскільки у випадку 4) гарантується не розкриття зазорів при будь-якій величині складової F сили різання. Для випадку 3) маємо:

$$\text{при } y_2 \geq 0 \quad F_3 \geq F. \quad (5.10)$$

Отже, при прикладанні складової F сили різання в напрямку рухомої губки додаткова деформація y_2 для пристроїв першого типу $y_2 = F/(C_1 + C_2)$, а для пристроїв другого типу $y_2 = F/C_2$ (дивись залежності (5.4) і (5.8) відповідно). Ураховуючи, що жорсткість рухомої губки завжди менша за жорсткість нерухомої губки ($C_1 = (0,4 \dots 0,6)C_2$), то складова F сили різання, що допускається для пристроїв першого типу, як мінімум на 40% більша за таку ж складову в пристроях другого типу.

Тому для однакових умов сила затиску пристроїв першого типу може бути прийнята меншою на 40% від сили затиску пристроїв другого типу, що, звичайно, зменшує металоємність пристрою.

Спираючись таку закономірність, фірма Schunk пропонує верстатний пристрій, що поєднує автоматизацію затиску за використання пневмоциліндру, з перевагами пристроїв першого типу (рис.5.4).

Головною відмінністю такої конструкції від тисків, що показані на рис. 5.2, є наявність клинового механізму 1 передачі зусилля від пневмоциліндру 2 на рухому губку 3. Клиновий механізм створює самогальмівну пару в ланцюгу передачі зусилля затиску, а наявність пневмоциліндру дає можливість автоматизації функціонування такого пристрою.

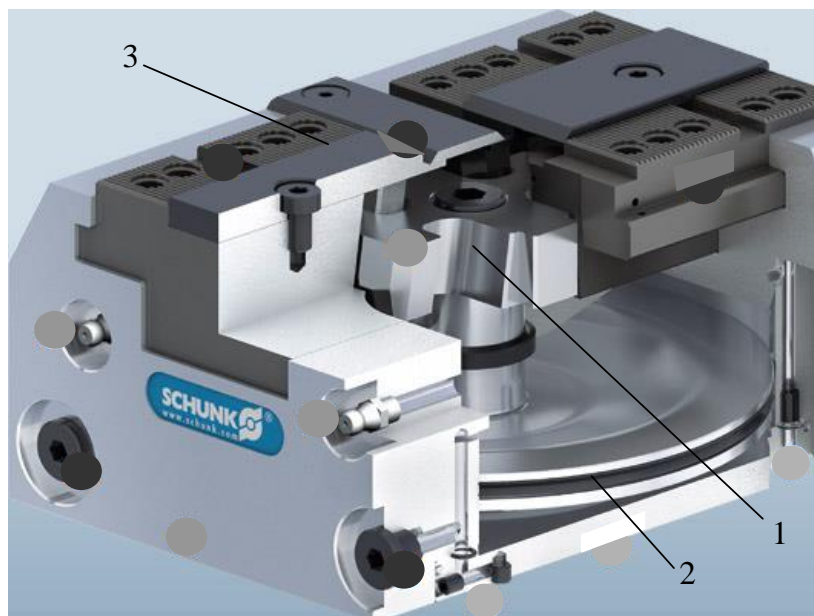


Рис. 5.4 Тиски фірми Schunk з пневматичним затиском

Практична частина

Практична частина роботи виконується за допомогою прикладної програми, що моделює процеси затиску заготовки у верстатних пристроях першого та другого типів з урахуванням їх пружних характеристик (рис. 5.5).

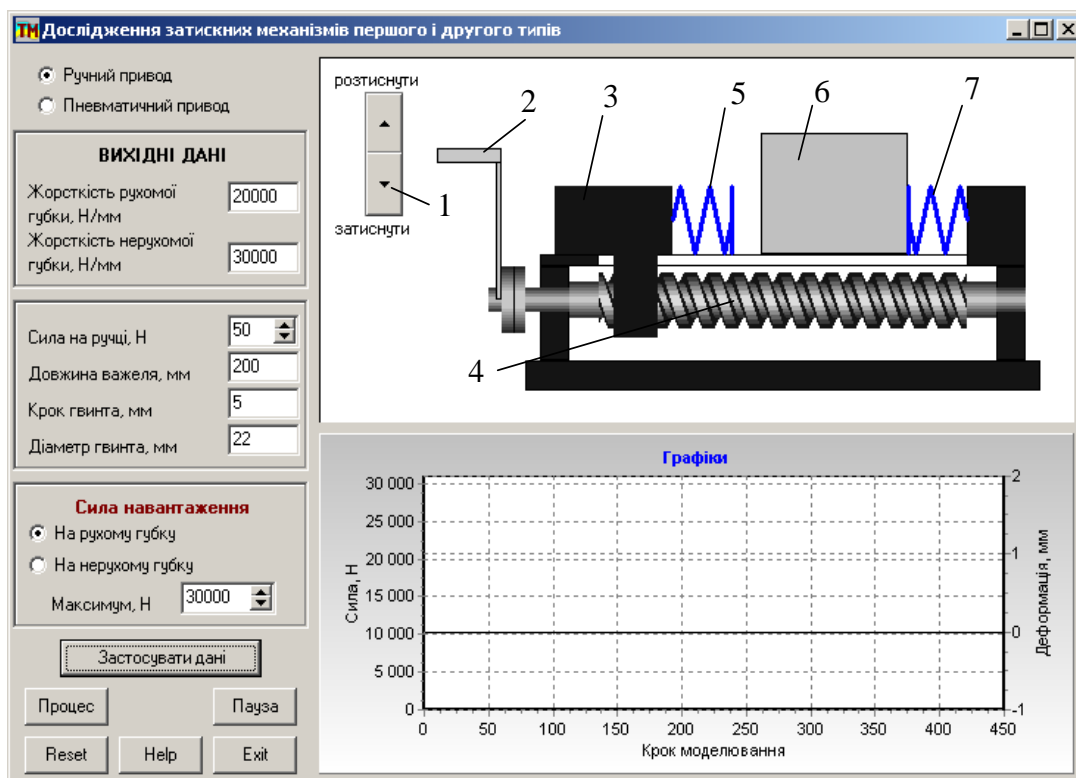


Рис. 5.5 Вихідний стан головного інтерфейсу програми моделювання верстатного затискного пристрою першого типу

Для виконання практичної частини роботи використовується прикладна програма «Затиск». Для роботи з програмою необхідно ознайомитись з інструкціями, що з'являються на додатковому інтерфейсі при натисканні кнопки «Help».

На рис. 5.5 представлений головний інтерфейс прикладної програми в початковому стані моделювання затиску заготовки у верстатних пристроях першого типу, оскільки в опціях програми на головному інтерфейсі обрано «Ручний привод».

В графічному вікні інтерфейсу показані: кнопка 1 управління процесом затиску чи розтиску, рукоятка 2 механізму ручного затиску, що через гвинт 3 переміщує рухому губку 4, пружність якої умовно представлена пружиною 5, заготовка 6 контактує з пружиною 7, яка умовно представляє пружність нерухомих губки. Таким чином, завдяки наявності в ланцюгу передачі зусилля гвинтової самогальмівної пари, такий пристрій відноситься до затискних механізмів першого типу.

Моделювання виконується після натискання кнопки «Застосувати дані». Для затиску заготовки натиснути і утримувати кнопку 1 в графічному полі інтерфейсу. Відбувається процес затиску, рукоятка 2 разом з гвинтом 4 повертається, а рухома губка 3 переміщується, затискаючи заготовку 6 (рис. 5.6).

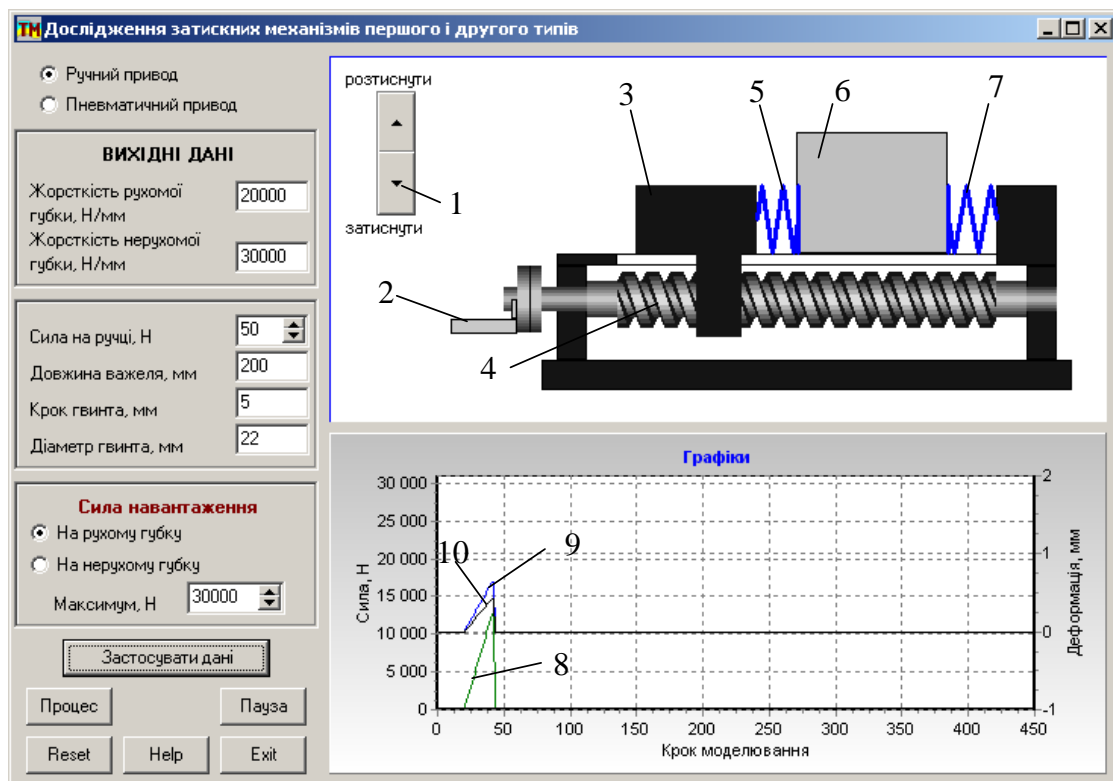


Рис. 5.6 Головний інтерфейс програми в стані «затиснуто»

Причому, пружна деформація рухомих губки відбувається після її контакту з заготовкою, а у вікні «Графіки» з'являються відповідні графіки

процесу: лінія 8 – сила затиску, лінія 9 – деформація рухомої губки, лінія 10 – деформація нерухомої губки. Силу F_3 затиску можна підрахувати за відомою формулою:

$$F_3 = \frac{2Fl}{d_2} \tan\left(\frac{h}{\pi d_2}\right), \quad (5.11)$$

де F – сила на ручці затиску, l – довжина важеля, d_2 – діаметр гвинта, h – крок гвинта.

Після закінчення процесу затиску заготовки сила, що діє на гвинті, зникає, а сила затиску підтримується завдяки створеним деформаціям пружної системи затискного пристрою.

Тепер можна проводити дослідження пружних властивостей пристрою при дії на заготовку випробувальною силою, що імітує відповідну складову сили різання. На головному інтерфейсі обирається напрям дії сили навантаження, встановлюється її максимальна величина і натискається кнопка «Процес».

В графічному полі (рис. 5.7) з'являється стрілка 1, а у вікні «Графіки» відображаються відповідні графіки зміни сили (лінія 2) і пружних деформацій (лінія 3 – деформація рухомої губки, лінія 4 – деформація нерухомої губки). При цьому моделювання відбувається в автоматичному режимі за кожним кроком з відповідною анімацією процесу в графічному вікні інтерфейсу.

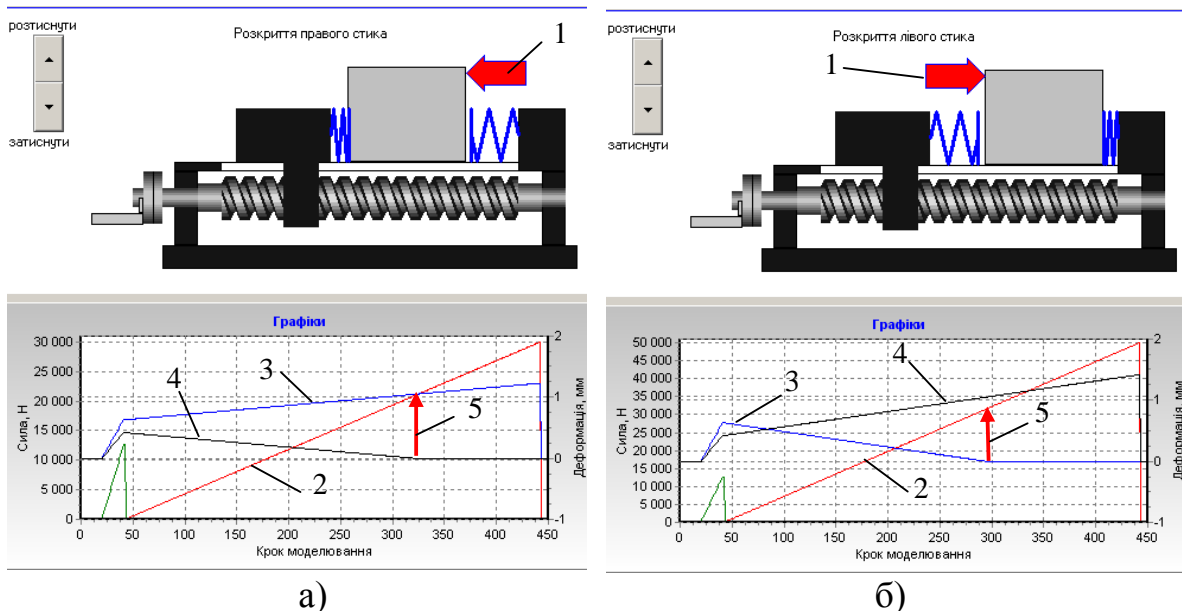


Рис. 5.7 Випробування силою в напрямку на рухому (а)
і нерухому (б) губки

Максимальну величину сили навантаження слід обрати так, щоб за цикл моделювання відбулося розкриття лівого чи правого стику заготовки з губками затискного пристрою. При настанні такої події відповідний над-

пис з'являється у графічному вікні, а величину сили, при якій відбулося розкриття стику, можна визначити за графіками, збільшуючи місце (стрілка 5 на рис. 5.7), де графік деформації відповідної губки досягає нуля.

Прикладна програма дозволяє також моделювати процеси, що відбуваються при затиску і випробуванні силою навантаження в затискних верстатних пристроях другого типу. При виборі відповідної опції на головному інтерфейсі зображення в графічному полі змінюється (рис. 5.8).

В графічному вікні інтерфейсу: кнопка 1 управління процесом затиску, що підключає порожнину 2 пневмоциліндру з поршнем 3 до мережі стиснутого повітря (площа поршня і тиск повітря задаються у відповідних вікнах інтерфейсу), шток циліндра переміщує рухому губку 4, пружність якої умовно представлена пружиною 5, заготовка 6 контактує з пружиною 7, яка умовно представляє пружність нерухої губки. Для спрощення зображення, на відміну від реальної конструкції (дивись рис. 5.2) шток пневмоциліндра напряму, а не через важільну передачу, зв'язаний з рухомою губкою. Таке спрощення не впливає на пружні властивості затискного пристрою, оскільки в ланцюгу передачі зусилля затиску все одно відсутня самогальмівна пара, отже такий затискний верстатний пристрій відноситься до затискних пристроїв другого типу.

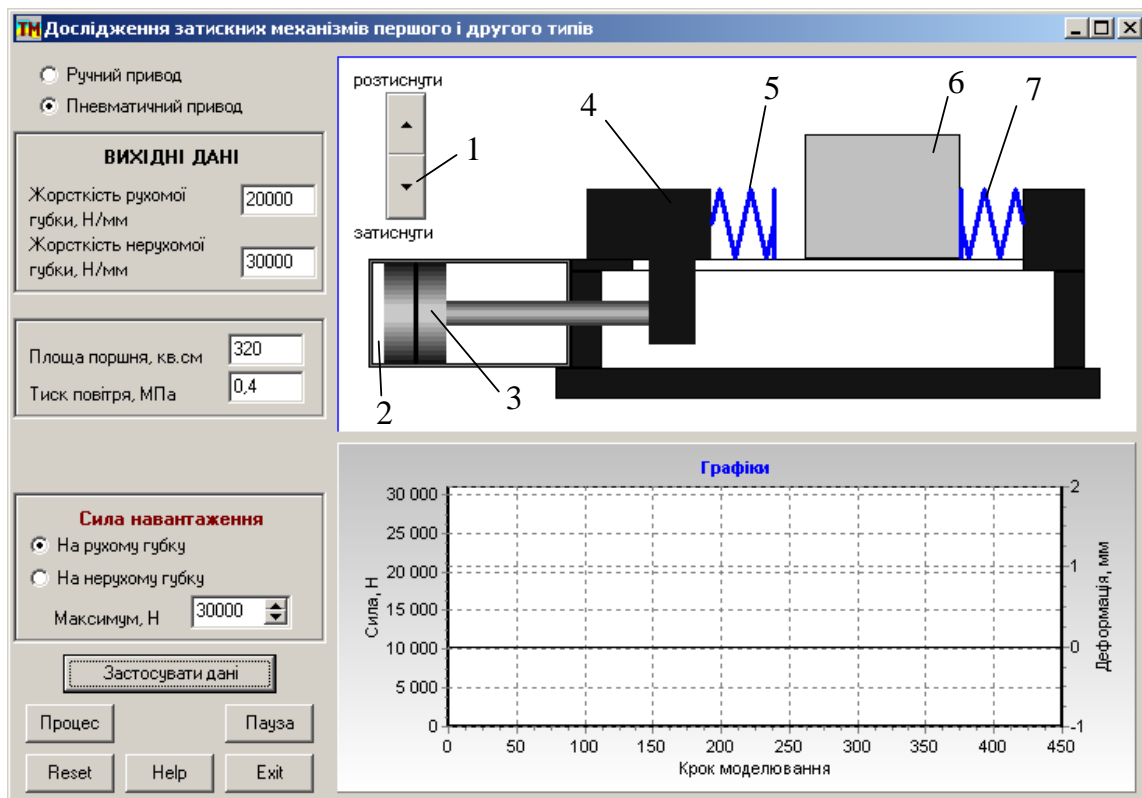


Рис. 5.8 Вихідний стан головного інтерфейсу програми моделювання верстатного затискного пристрою другого типу

Для затиску заготовки тут також треба натиснути і утримувати кнопку 1 в графічному полі інтерфейсу. Відбувається процес затиску, поршень 3 разом з рухомою губкою 4 переміщується, затискаючи заготовку 6 (рис. 5.9). Пружна деформація рухомої губки, як і для пристрою першого типу, відбувається після її контакту з заготовкою, а у вікні «Графіки» з'являються відповідні графіки процесу затиску: лінія 8 – сила затиску, лінія 9 – деформація рухомої губки, лінія 10 – деформація нерухомої губки.

Дослідження пружних властивостей пристрою при дії на заготовку випробувальною силою, що імітує відповідну складову сили різання, проводиться аналогічно, як і для затискного пристрою першого типу.

В графічному полі (рис. 5.10) з'являється стрілка 1, а у вікні «Графіки» відображаються відповідні графіки зміни сили навантаження (лінія 2) і пружних деформацій (лінія 3 – деформація рухомої губки, лінія 4 – деформація нерухомої губки). На відміну від затискного пристрою першого типу, сила затиску (лінія 5) діє на протязі всього циклу випробувань, оскільки створюється пневмоциліндр, що передає зусилля затиску без самогальмівної пари. Саме за цієї причини при напрямку дії випробувальної сили в бік нерухомої губки розкриття стиків не відбувається (рис. 5.10,б), деформація рухомої губки залишається постійною, а деформація нерухомої губки пропорційно збільшується.

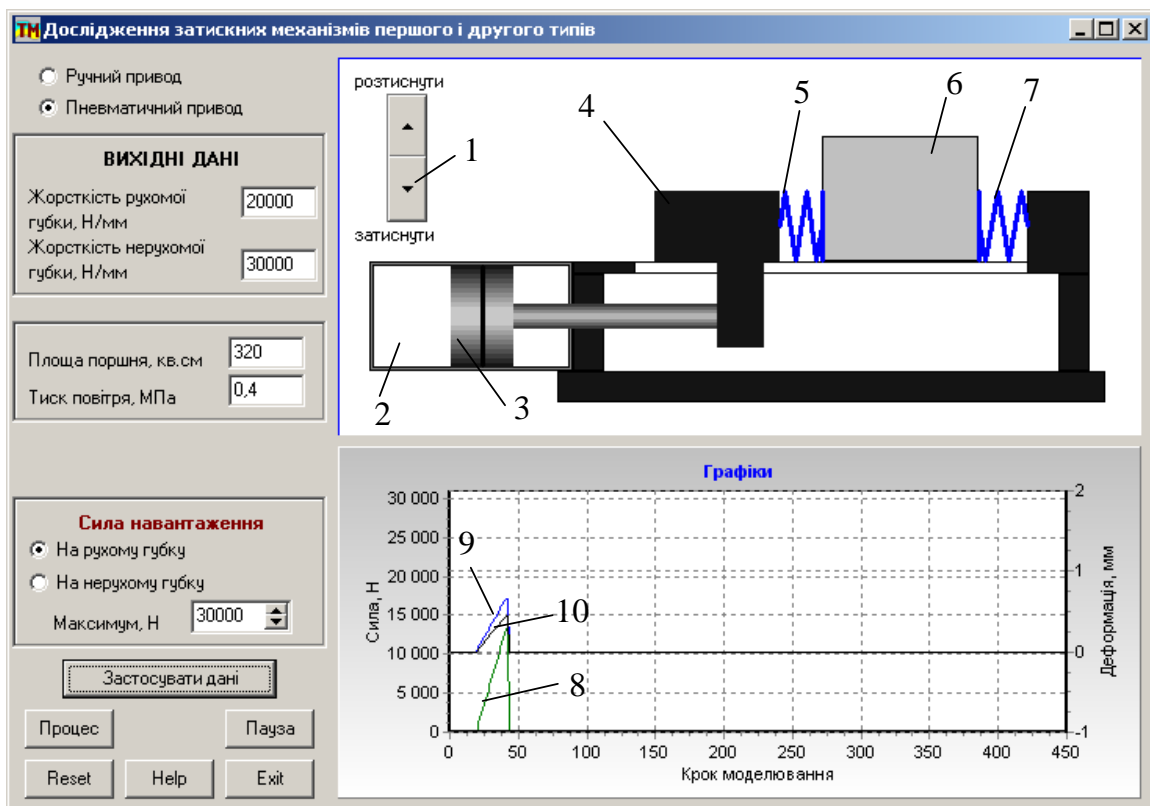


Рис. 5.9 Головний інтерфейс програми в стані «затиснуто»

При зміні напрямку випробувальної сили в бік рухомої губки (рис. 5.10,а) в момент перевищення випробувальною силою величини сили зати-

ску відбувається розкриття лівого стику і рух поршня пневмоциліндру разом з рухомою губкою у вихідний стан. При цьому заготовка рухається разом з рухомою губкою. Деформація рухомої губки в цей момент дещо збільшується. Величина сили, при якій відбулося розкриття стику, також визначається за графіками, при збільшенні відповідного місця у вікні «Графіки» (стрілка 6 на рис. 5.10,а).

Таким чином, отримані результати вказують на доцільність дослідження пружних властивостей затискних пристроїв другого типу. Дослідження виконуються з метою отримання залежностей величини випробувальної сили, що приводить до розкриття стиків від жорсткостей рухомої і нерухомої губок затискного пристрою.

Для виконання досліджень, після завдання всіх необхідних параметрів, у відповідності до варіанту, натиснути кнопку «Застосувати дані» і затиснути заготовку – кнопка «затиснути» у графічному полі інтерфейсу. При постійному значенні жорсткості нерухомої губки, змінюючи в заданому діапазоні величину жорсткості нерухомої губки з обраним кроком, виконати експерименти при певному напрямку дії випробувальної сили.

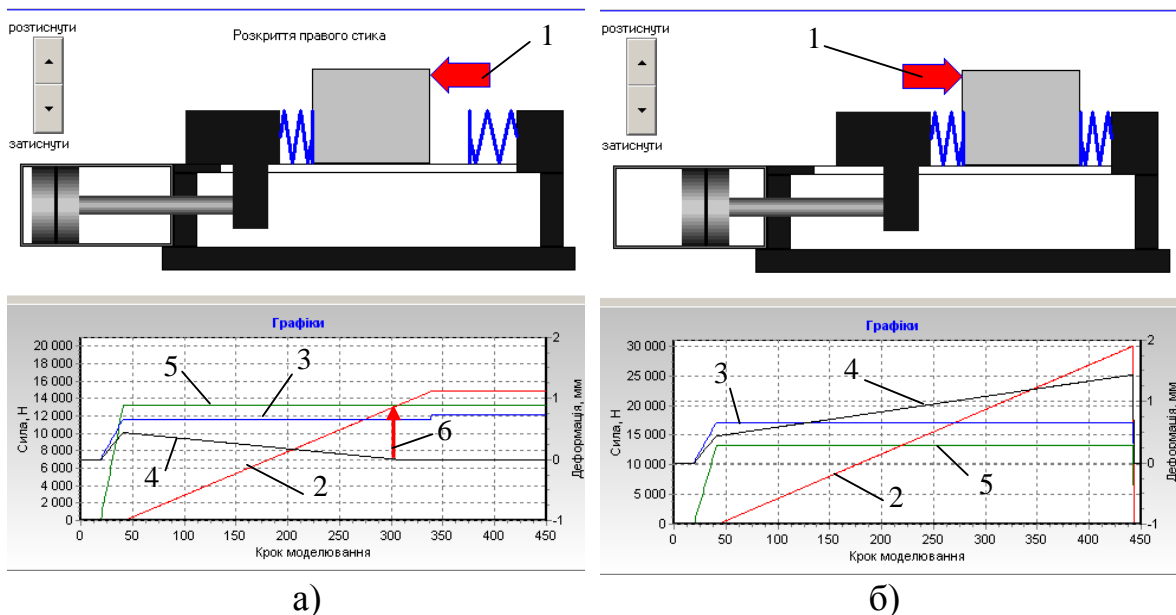


Рис. 5.10 Випробування силою в напрямку на рухому (а) і нерухому (б) губки

При зміні жорсткості для виконання наступного експерименту натиснути кнопку «Reset», «Застосувати дані», затиснути заготовку, обрати напрям дії і максимальну величину випробувальної сили навантаження, а потім натиснути кнопку «Процес». Результати експериментів при зміні жорсткості рухомої губки з постійною жорсткістю 30000 Н/мм нерухомої губки представлені в таблиці 5.1, а при зміні жорсткості нерухомої губки при постійному значенні 20000 Н/мм рухомої губки – в таблиці 5.2. Решта вихідних даних відповідає величинам у вікнах інтерфейсу на рис. 5.5.

Таблиця 5.1 – результати експериментів

№	Жорсткість рухомої губки, Н/мм	Сила розкриття стику, кН	
		на рухому губку	на нерухому губку
1	10000	17,00	51,10
2	15000	19,50	38,85
3	20000	21,10	31,60
4	25000	23,89	28,65
5	30000	25,51	25,51

Таблиця 5.2 – результати експериментів

№	Жорсткість нерухомої губки, Н/мм	Сила розкриття стику, кН	
		на рухому губку	на нерухому губку
1	20000	26,00	26,00
2	25000	23,00	28,80
3	30000	21,00	31,5
4	35000	19,85	34,85
5	40000	19,00	38,00

Результати експериментів в графічній формі представлені на рис. 5.11.

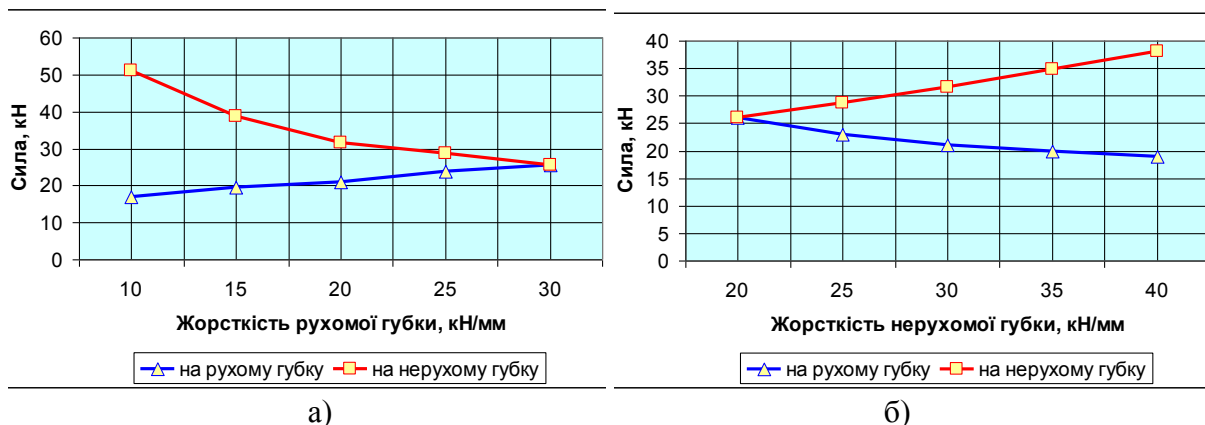


Рис. 5.11 Графіки залежностей випробувальної сили розкриття стиків від жорсткості рухомої (а) та нерухомої (б) губки і напрямку дії

Висновки

1. Верстатні затискні пристрої першого і другого типу суттєво відрізняються за своїми пружними характеристиками як в напрямку на рухому так і на нерухому губки.

2. Для верстатних пристроїв першого типу співвідношення між силою розкриття стику в напрямку нерухомої і рухомої губки залежить від співвідношення їх жорсткостей. Оскільки на практиці жорсткість нерухомої губки нижча за жорсткість нерухомої, то орієнтувати заготовку на верстаті необхідно так, щоб складова від сили різання діяла саме в напрямку на нерухому губку.

3. При збільшенні жорсткості рухомої губки сила розкриття стику в напрямку рухомої губки збільшується, а в напрямку нерухомої губки зменшується. Таким чином, збільшення жорсткості рухомої губки приводить до зменшення жорсткості в напрямку на нерухому губку.

4. При збільшенні жорсткості нерухомої губки сила розкриття стику в напрямку рухомої губки зменшується, а в напрямку на нерухому губку збільшується.

5. Для затискних пристроїв першого типу сила розкриття стиків в обох напрямках значно вища за силу, що створюється при затиску. Наприклад, за результатами експериментів, при жорсткості рухомої губки 20кН/мм і нерухомої губки 30кН/мм і силі при затиску 13кН сила розкриття стику в напрямку рухомої губки складає 21,12кН, а в напрямку нерухомої губки 31,6кН.

6. Для затискних верстатних пристроїв другого типу сила розкриття стику в напрямку рухомої губки дорівнює силі, що створюється пневмоциліндром (або гідроциліндром) на цій губці при затиску, а в напрямку нерухомої губки розкриття стику не відбувається.

7. Оскільки при обробленні сила різання завжди змінюється у часі, причому такі зміни, як правило, є швидкими, з частотою, що може порівнюватись з частотою власних коливань затиснутої заготовки, то остаточний розрахунок верстатних затискних пристроїв має проводитись з урахуванням динамічних процесів, а режим різання відповідно обиратися.

Завдання

1. За вихідними даними у відповідності до варіанту (таблиця 5.3) за допомогою прикладної програми провести експерименти з визначення залежності сили розкриття стиків в обох напрямках дії випробувальної сили від жорсткості рухомої і нерухомої губок.

2. При проведенні експериментів змінювати жорсткість рухомої і нерухомої губок з наперед обраним кроком не виходячи за наступний діапазон: 8000Н/мм...40000Н/мм. При призначенні діапазонів (для адекватності з практикою) урахувати, що жорсткість нерухомої губки у всіх випадках не має бути нижчою за жорсткість рухомої губки.

3. Записати результати експериментів у таблицю і побудувати графіки залежності сили розкриття стиків від жорсткостей рухомої і нерухомої губок для обох напрямків дії сили навантаження.

4. Розрахувати діаметр поршня пневмоциліндра для затискного пристрою другого типу так, щоб сила на штоку, дорівнювала силі, яка утворюється при затиску в пристрої першого типу за даними варіанту.

5. Провести експерименти з визначення сили розкриття стиків для затискного пристрою другого типу для будь-яких сполучень значень жорсткостей експериментів, що виконувались для пристрою першого типу.

Таблиця 5.3 – Вихідні дані

Перша цифра	Сила на ручці, Н	Довжина важеля, мм	Жорсткість рухомої губки, Н/мм	Друга цифра	Крок гвинта, мм	Діаметр гвинта, мм	Жорсткість рухомої губки, Н/мм
0	50	200	21	0	5	24	30
1	45	180	25	1	6	26	32
2	40	170	10	2	7	28	34
3	35	210	12	3	8	30	36
4	30	220	14	4	5	32	38
5	25	230	16	5	6	24	40
6	20	250	18	6	7	26	31
7	30	190	20	7	8	28	33
8	35	240	22	8	5	30	35
9	40	260	15	9	6	32	37

Зміст протоколу

У протоколі навести: завдання, дві копії головного інтерфейсу програми моделювання для будь-якого сполучення жорсткостей рухомої і нерухомої губки (у відповідності до таблиці експериментальних даних) при розкритті стику в напрямку дії випробувальної сили в бік рухомої і нерухомої губок, розрахунки з визначення площі поршня пневмоциліндра, дві копії інтерфейсів з моделювання затискного пристрою другого типу при аналогічних випробуваннях, пояснення отриманих результатів та висновки.

Інструкції до роботи з програмою

Програма призначена для моделювання процесів, що відбуваються в затискних верстатних пристроях першого і другого типів. Для роботи з програмою спочатку обирають тип затискного механізму у відповідності з надписами, які знаходяться вгорі справа інтерфейсу.

Після завдання параметрів механізму у відповідних вікнах, натиснути кнопку "Застосувати дані", а потім натиснути та утримувати кнопку "затиснути", що розташована в графічному полі інтерфейсу. Виконується затиск і у вікні "Графіки" з'являються графіки характеристик механізму: зелена лінія - сила затиску, синя лінія - деформація рухомої губки, чорна лінія - деформація нерухомої губки.

Після закінчення затиску (анімація зупиняється, не дивлячись на натиснуту кнопку "затиснути") обрати режим випробувань складовою сили різання: задати максимальну величину и вибрати напрям дії. Натиснути кнопку "Процес". Відбувається поступове збільшення складової сили рі-

зання до заданої величини, а у вікні "Графіки" відображаються зміни характеристик системи.

Програма дозволяє виконувати затиск і розтиск механізму за допомогою маніпулювання відповідними кнопками в графічному полі інтерфейсу.

Процес моделювання можна призупинити - кнопка "Пауза" і відновити з того ж місця - кнопка "Процес".

Для повернення у вихідний стан - натиснути кнопку "Reset".

Для точного вимірювання величин у вікні "Графіки" можна збільшувати масштаб зображення: підвести мишку до верхнього правого кута обраної для збільшення ділянки, натиснути ліву клавішу і "протягнути" вниз-вліво, відпустити клавішу. Таке збільшення можна виконувати декілька разів до бажаного масштабу.

Повернення до висхідного масштабу - в будь-якому місці вікна "Графіки" натиснути ліву клавішу мишки, "протягнути" вправо-вгору і відпустити клавішу.

Запитання для самоконтролю

1. Принцип функціонування затискного пристрою фірми Schunk (рис.5.4), які переваги (чи недоліки) у порівнянні з конструкцією затискного пристрою за рис. 5.3?
 2. В якому напрямку треба розташовувати затискний пристрій по відношенню до відповідної складової сили різання на верстаті?
 3. Яким чином слід обирати співвідношення жорсткостей рухомої і нерухомої губок при проектуванні затискних пристроїв?
 4. Чому не відбувається розкриття стиків в затискному пристрої другого типу при дії випробувальної сили в напрямку нерухомої губки?
-
-



ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗАКРІПЛЕННЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ РОЗТОЧУВАННІ ОТВОРІВ

Мета роботи: Визначити залежності необхідної сили затиску від режиму різання при розточуванні отвору в заготовці, що базується на площину і два пальця.

Теоретична частина

Розрахунок сил затиску заготовки при виконанні механічної операції виконують як при конструюванні нових верстатних пристроїв, так і при використанні наявних універсальних пристроїв. Оскільки всі верстатні пристрої використовуються в умовах дії сили різання, яка весь час змінюється, причому ці зміни можуть бути досить швидкими і залежать від обраного режиму різання, то розрахунок сили затиску треба виконувати з урахуванням динамічних явищ, що мають місце на практиці.

Найбільш розповсюджена схема установки корпусних деталей при виконанні операцій механічної обробки – на площину і циліндричний та зрізаний палець. Сила затиску має бути достатньою для усунування зсуву у будь яку сторону заготовки, причому з умов точності обробки та захисту пальців, що базують, сила різання має сприйматися тільки силою тертя, тобто пальці мають бути повністю розвантажені. Таким чином, зсув заготовки попереджається тільки силами тертя, що виникають в місцях контакту заготовки з опорами і затискними елементами.

На рис.6.1 показана схема дії сил при розточуванні отвору в заготовці 1, що встановлена на опори 2 і базується на циліндричний і зрізаний палець (на схемі не показані). Заготовка утримується силами затиску F_3 , що діють за осьовими лініями опор. Умови закріплення заготовки будуть визначатися чотирма рівняннями, що представлятимуть рівновагу сил за віссю Z , віссю Y , за сумою моментів навколо опори A і за сумою моментів навколо опори B . Причому рівняння мають описувати поведінку системи у динаміці, тобто бути диференціальними.

Зі схеми рис.6.1 складова від сили різання в напрямку вісі Z :

$$F_{yz} = F_y \cos \varphi - F_z \sin \varphi, \quad (6.1)$$

а складова від сили різання в напрямку вісі Y :

$$F_{zy} = F_y \sin \varphi - F_z \cos \varphi, \quad (6.2)$$

де F_y, F_z – складові сили різання, φ - кутова координата вершини різця.

Зі схеми рис. 6.1 момент від сили різання навколо опори A :

$$(M_p)_A = F_{z\bar{z}}AD - F_{y\bar{z}}AE, \quad (6.3)$$

де $AD = AO_1 + r\cos\varphi$, $AE = OO_1 + r\sin\varphi$, а момент від сили різання навколо опори B :

$$(M_p)_B = F_{z\bar{z}}BD - F_{y\bar{z}}BF, \quad (6.4)$$

де $BD = O_1B - r\cos\varphi$, $BF = OO_1 + r\sin\varphi$.

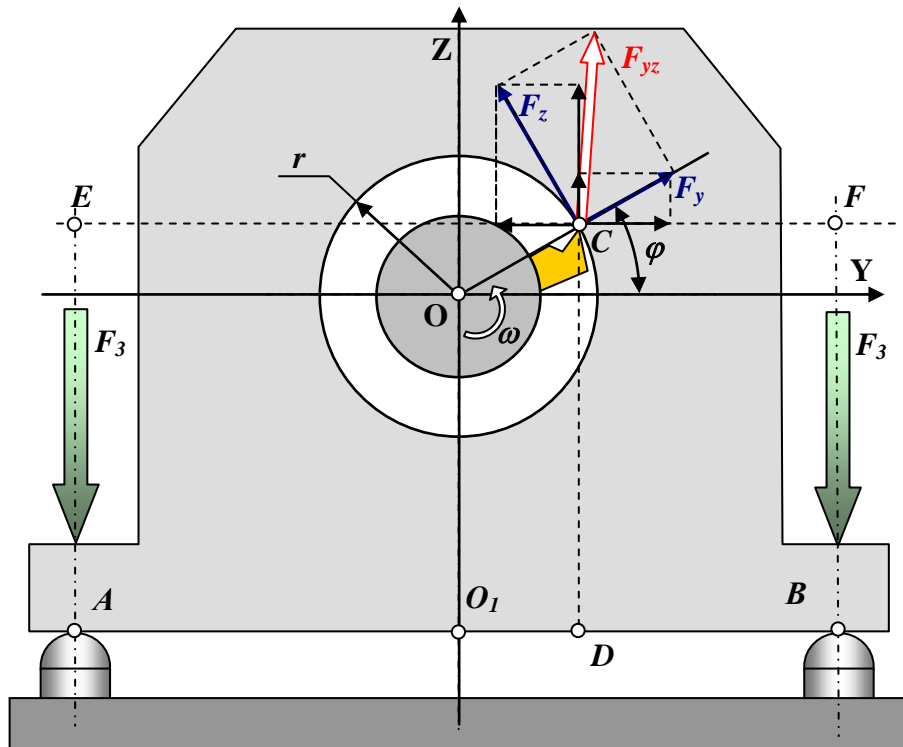


Рис. 6.1 Розрахункова схема

Тепер можна визначити умови закріплення заготовки.

Умова закріплення заготовки від зсуву в напрямку вісі Y виглядає наступним чином:

$$[2F_3 - (F_Z)_P]f_{mp} \geq \sqrt{(F_Y)_P^2 + F_X^2}, \quad (6.5)$$

де F_3 – сила затиску, f_{mp} – коефіцієнт тертя між опорою і заготовкою, $(F_Z)_P$, $(F_Y)_P$ – сили від відповідних складових $F_{z\bar{z}}$ та $F_{y\bar{z}}$ сили різання, що діють в контактi з опорами, F_X – складова сили різання в напрямку вісі X (перпендикулярно до площини рис.6.1).

Умови закріплення за моментами від відриву заготовки від опор:

$$F_3AB \geq (M_p)_A, \quad F_3AB \geq (M_p)_B. \quad (6.6)$$

Оскільки при розточуванні вектор сили різання весь час змінює напрям дії, причому швидкість зміни залежить від режиму різання:

$$\varphi = t\omega, \quad (6.7)$$

де ω - кутова швидкість борштанги з різцем, t – час, то для визначення умов закріплення заготовки обов'язково треба урахувати динамічні явища, що відбуваються в пружній системі заготовка – пристрій.

Контакт заготовки з опорами можна представити у вигляді пружної схеми рис. 6.2. До моменту зсуву опора 1 контактує з заготовкою 2 і забезпечує пружне з'єднання з контактною жорсткістю C_k як за віссю Z так і за віссю Y [3]. Крім того, такий зв'язок має демпфірування з коефіцієнтом λ , яке забезпечує внутрішнє тертя в контакті.

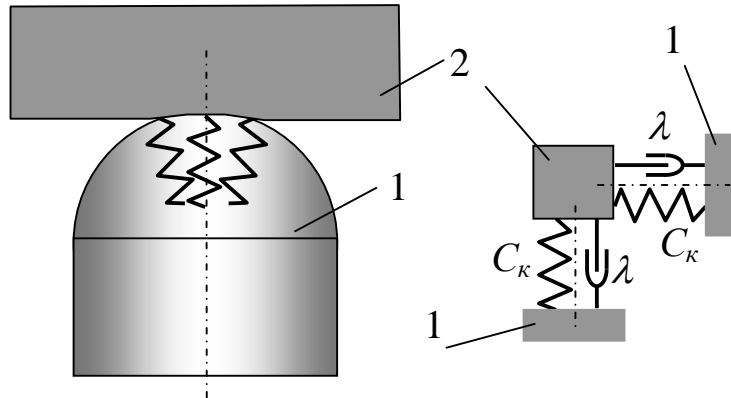


Рис. 6.2 Схема контактної взаємодії

Ураховуючи умови закріплення заготовки, динамічні моделі пристрою разом із заготовкою в напрямку осей Z і Y відрізняються (рис.6.3).

В напрямку вісі Z складова $F_{Z\Sigma}$, що визначається за формулою (6.2), діє на заготовку масою m , тоді як сила $(F_Z)_p$, що діє на опору в цьому напрямку, є реакцією зв'язку заготовки з опорою і може бути визначена з рівняння руху:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + \lambda \frac{dz}{dt} + C_k z = F_{Z\Sigma}, \quad (6.8)$$

тоді

$$-\lambda \frac{dz}{dt} - C_k z = (F_Z)_p. \quad (6.9)$$

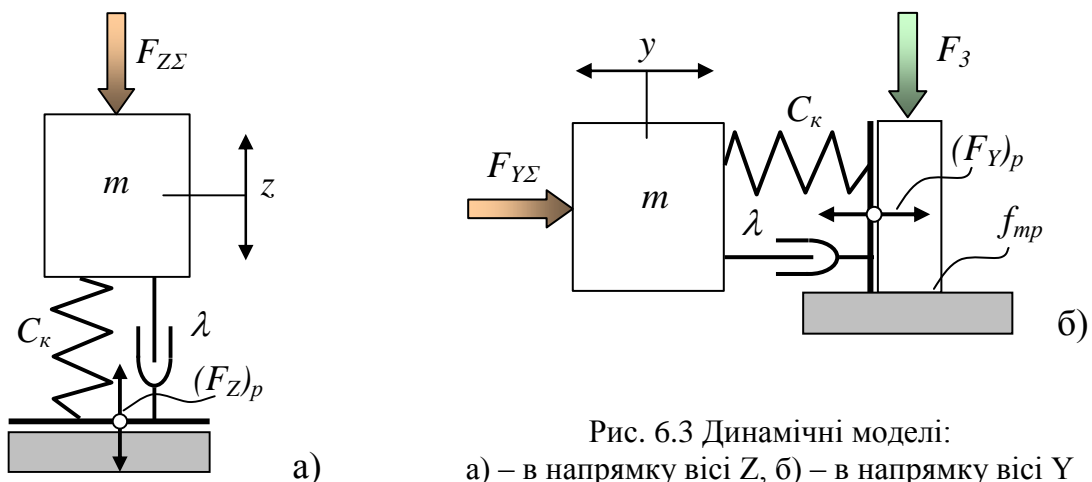


Рис. 6.3 Динамічні моделі:
а) – в напрямку вісі Z , б) – в напрямку вісі Y

Аналогічно, в напрямку вісі Y складова $F_{Y\Sigma}$, що визначається за формулою (6.1), також діє на заготовку масою m і відповідно:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + \lambda \frac{dy}{dt} + C_\kappa y = F_{Y\Sigma}, \quad (6.10)$$

тоді

$$-\lambda \frac{dy}{dt} - C_\kappa y = (F_Y)_P. \quad (6.11)$$

Таким чином, визначені з рівнянь руху заготовки у пружній системі сили $(F_Z)_P$, $(F_Y)_P$ і мають бути використані для визначення умови закріплення за (6.5).

Слід зауважити, що під час розточування отвору сила зсуву змінює свій напрям, в наслідок зміни напрямку складової $(F_Y)_P$. Проте нерівність (6.5) на відображає такої зміни, оскільки перед коренем в лівій частині завжди стоїть знак «+». Таке представлення є правомочним, оскільки залежність (6.5) має характеризувати умови зсуву у будь-який бік за горизонтальною площиною*.

Тепер треба урахувати динамічні явища, що виникають в пружній системі під дією для крутних моментів (рис. 6.4).

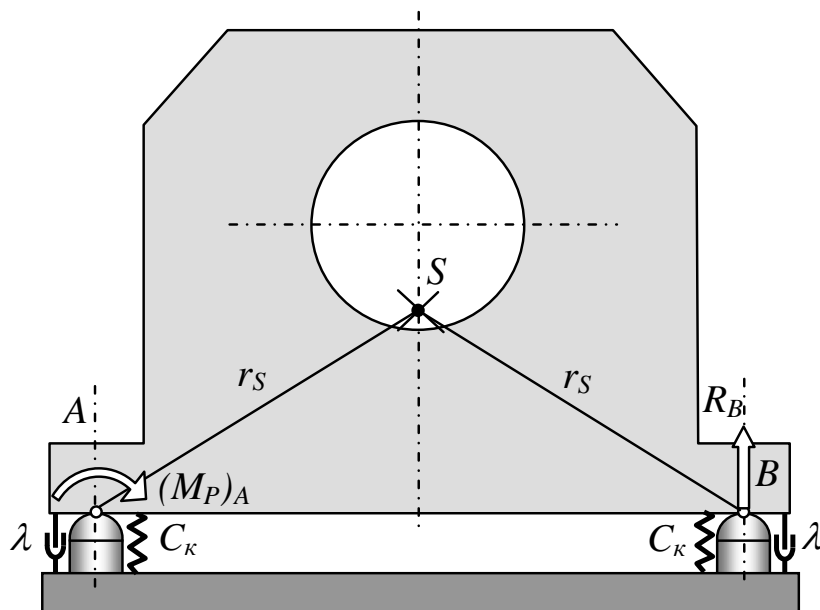


Рис. 6.4 Динамічна модель за кутовою координатою

Крутний момент $(M_P)_A$ від сили різання навколо опори A урівноважується реакцією R_B опори B :

$$(M_P)_A = R_B AB. \quad (6.12)$$

В свою чергу реакція R_B опори B знаходиться з рівняння руху заготовки навколо опори A :

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \lambda(AB)^2 \frac{d\alpha}{dt} + C_{\kappa}(AB)^2 \alpha = (M_p)_A, \quad (6.13)$$

тоді, з урахуванням (6.12):

$$-\lambda \frac{d\alpha}{dt}(AB) - C_{\kappa} \alpha(AB) = R_B, \quad (6.14)$$

де J – момент інерції заготовки навколо опори A , $J = mr_s^2$, де r_s – відстань від центра ваги S заготовки до опори, α – кут повороту.

Аналогічно реакція R_A опори A знаходиться з рівняння руху заготовки навколо опори B :

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + \lambda(AB)^2 \frac{d\alpha}{dt} + C_{\epsilon}(AB)^2 \alpha = (M_p)_B, \quad (6.15)$$

тоді:

$$-\lambda \frac{d\alpha}{dt}(AB) - C_{\kappa} \alpha(AB) = R_A, \quad (6.16)$$

а крутний момент $(M_p)_B$ від сили різання навколо опори B урівноважується реакцією R_A опори A :

$$(M_p)_B = R_A AB. \quad (6.17)$$

Отримана математична модель показує, що, навіть при використанні розточувальної борштанги з двома опозитно розташованими різцями, коли сили різання на обох різцях врівноважують одна одну, динамічні явища від крутних моментів все ж таки будуть мати місце.

Таким чином, проектування затискного пристрою передбачає розв'язання диференціальних рівнянь руху за обома осями координат (разом восьмий порядок) і апіорі вимагає застосування чисельних методів на комп'ютері. Зрозуміло, що оскільки такі динамічні системи мають резонанс і зсув за фазою реакцій в опорах відносно діючих складових від сили різання, аналітичний розрахунок необхідної сили затиску практично неможливий. Необхідну силу затиску слід обирати при моделювання на комп'ютері за всіма умовами (6.17), (6.6) з урахуванням режиму різання, чи діапазону режимів різання, на яких буде використаний такий пристрій.

Наприкінці слід зауважити, що урахування динамічних явищ, які обов'язково притаманні будь-якому процесу різання, значно підвищує адекватність математичної моделі і дозволяє набагато точніше розраховувати верстатні пристрої і аргументувати необхідний вибір коефіцієнту запасу.

Практична частина

Практична частина роботи виконується за допомогою прикладної програми, головний інтерфейс якої представлений на рис. 6.5. Математичне ядро програми складає математична модель, що була розроблена в теоретичній частині, а експеримент виконується з метою визначення залежності необхідної сили затиску від режиму різання, а саме, від швидкості різання. Швидкість різання визначає частоту обертання борштанги, що, в свою чергу визначає частоту зміни сили різання у просторі і викликає реакцію пружної системи відповідно до її динамічних характеристик.

На головному інтерфейсі (рис. 6.5) у віконця зліва інтерфейсу вводяться вихідні дані системи, геометричні параметри заготовки, режим різання тощо. Потім обирається матеріал заготовки зі списку, що випадає, і натискається кнопка «Процес». У графічному полі, де зображена заготовка 1, відбувається анімація процесу розточування отвору різцем 2 борштанги. В полі осцилографа представляються основні характеристики процесу: лінія 3 – момент $(M_p)_A$ від сили різання навколо опори A , лінія 4 - момент $(M_p)_B$ від сили різання навколо опори B , лінія 5 – сила тертя, лінія 6 – сила зсуву. За умови закріплення заготовки сила тертя має весь час перевищувати силу зсуву, а моменти мають бути позитивними, тобто не відривати заготовку від опор.

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗАКРІПЛЕННЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ РОЗТОЧУВАННІ ОТВОРІВ

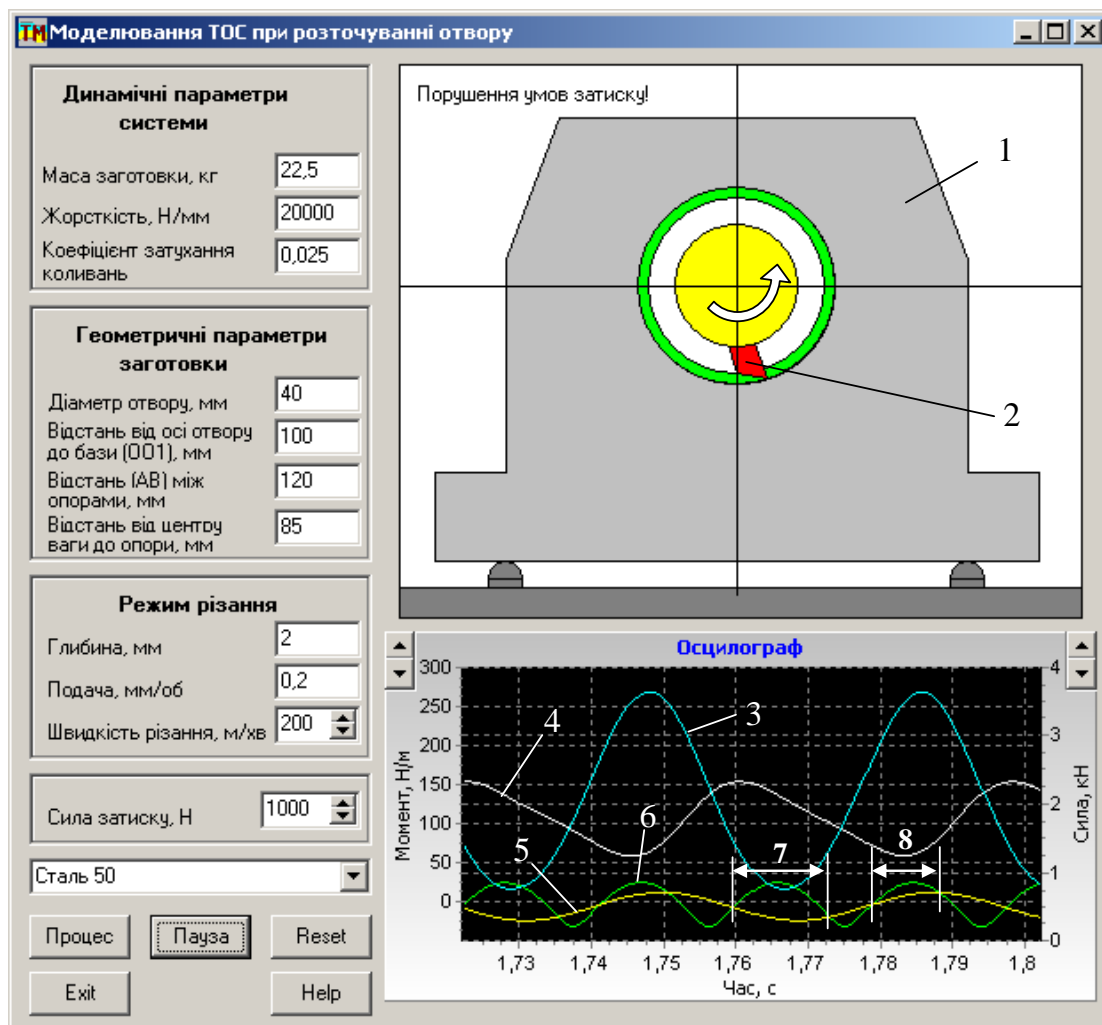


Рис. 6.5 Головний інтерфейс прикладної програми

Після закінчення перехідного процесу, який триває певний час, можна зробити висновок про достатність зазначеної сили затиску. Осцилограми всіх моментів розташовані в позитивній області, що свідчить про задоволення умовам затиску, проте, осцилограма сили зсуву на певних проміжках часу (дивись ділянки 7 і 8 на рис. 6.5) перевищує осцилограму сили тертя. Таким чином, умови закріплення заготовки порушуються, про що свідчить відповідний запис у верхньому куті графічного вікна, який з'являється саме в моменти порушення умов закріплення.

Для забезпечення умов затиску заготовки необхідно підвищити силу затиску – відповідне віконце на головному інтерфейсі. Підвищувати слід до величини, при якій на протязі певного часу, після закінчення перехідного процесу не буде з'являтися надпис «Порушення умов затиску!». Результат слід занести в заздалегідь підготовлену таблицю експериментальних даних.

Після зміни швидкості різання за обраним кроком знову слід дочекатися закінчення перехідного процесу (рис. 6.6, а) і, маніпулюючи з кноп-

ками на головному інтерфейсі, підвищувати силу затиску до рівня, що забезпечує виконання умов.

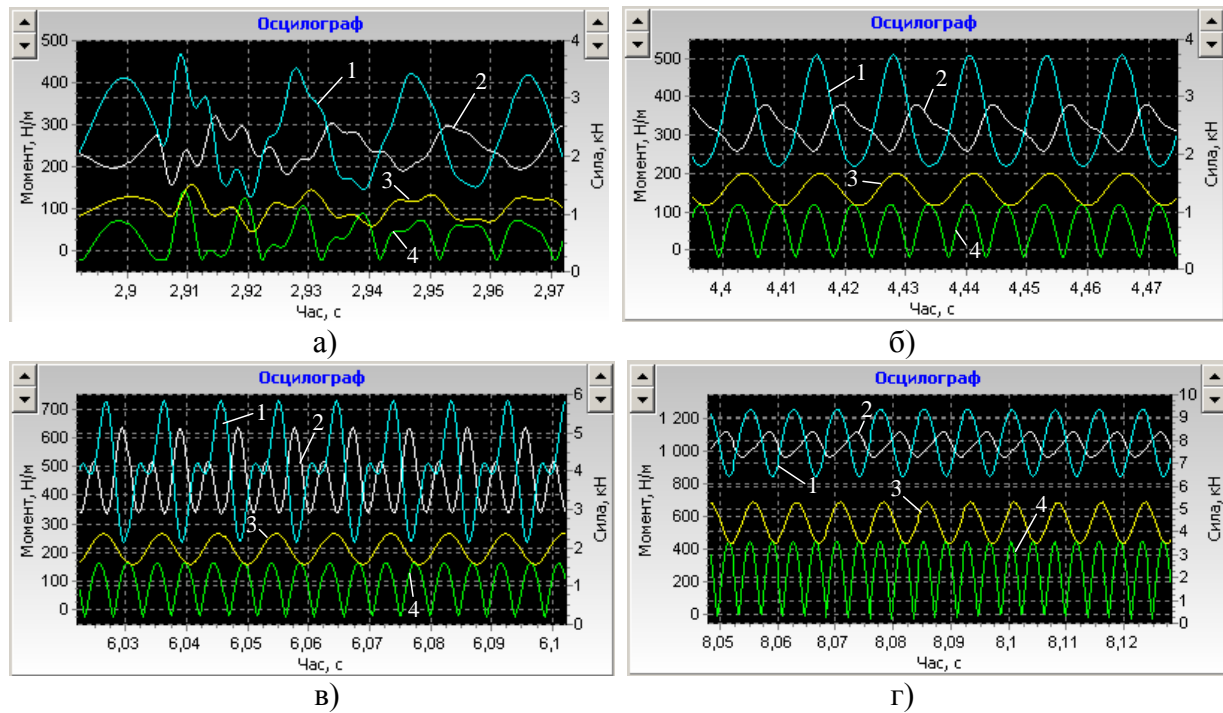


Рис. 6.6 Осцилограми процесу моделювання:

а) – перехідний процес, б) – швидкість різання 600 м/хв., сила затиску 2770Н, в) – швидкість різання 800 м/хв., сила затиску 3940Н, г) – швидкість різання 1000 м/хв., сила затиску 8800Н

На рис. 6.6 лінією 1 позначений момент навколо опори A , лінією 2 – момент навколо опори B , лінією 3 – сила тертя, лінією 4 – сила зсуву. При моделюванні анімація в графічному полі і графіки осцилограм синхронізовані, тобто положення різця відповідає величинам осцилограм за моментом появи на осцилографі.

Аналіз отриманих результатів показує, що зміна сили тертя і сили зсуву в режимі роботи, що встановився, відповідають гармонічним законам, проте зміна моментів відрізняються від них. Крім того, графік зміни сили зсуву, як зазначалось раніше (дивись абзац, помічений зірочкою) має частоту зміни в два рази більшу, ніж частота зміни сили тертя. Амплітуди всіх осцилограм процесу змінюються в залежності від швидкості різання: при швидкості різання 600м/хв. амплітуда зміни моменту $(M_P)_A$ складає 290Нм, моменту $(M_P)_B$ – 125Нм, сили тертя – 0,8кН, сили зсуву – 0,95кН; при швидкості різання 1000м/хв. амплітуда зміни моменту $(M_P)_A$ складає 400Нм, моменту $(M_P)_B$ – 250Нм, сили тертя – 1,9кН, сили зсуву – 2,35кН.

Таблиця 6.1 – Результати експериментів

№	Швидкість різання, м/хв.	Необхідна сила затиску, Н	Частота обертання, об/хв.
1	100	2030	796

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗАКРІПЛЕННЯ ЗАГОТОВКИ
ПРИ РОЗТОЧУВАННІ ОТВОРІВ

2	200	2080	1592
3	300	2160	2387
4	400	2290	3183
5	500	2480	3979
6	600	2770	4775
7	700	3210	5570
8	800	3940	6366
9	900	5330	7162
10	1000	8800	7958

За результатами експериментів побудований графік залежності необхідної сили затиску від швидкості різання (рис. 6.7). По-суті графік відображає реакцію динамічної системи на зміну частоти сил, що збуджують, і має характер амплітудно-частотної характеристики, точніше її до резонансної частини. При заданому діаметрі отвору, що розточується, для збільшення частоти сил, що збуджують, необхідно підвищувати швидкість різання за межу 1000м/хв., що буде перевищувати режим різання, який відповідає сучасним інструментальним матеріалам. Тому для адекватності моделювання було впроваджене таке обмеження, хоча, очевидно, що при подальшому збільшенні швидкості різання буде спостерігатися весь діапазон амплітудно-частотної характеристики. До таких же результатів приведе зменшення жорсткості або збільшення маси заготовки, оскільки частота власних коливань такої пружної системи (без урахування деякої нелінійності системи і процесу різання) $\omega_0 = \sqrt{C/m}$.

Під час проведення експериментів порушення умов затиску весь час відбувалося за рахунок перевищення сили зсуву сили тертя. Проте, при відповідній зміні вихідних даних, наприклад, збільшення висоти розташування отвору, що розточується, над опорною поверхнею і відповідно відстані від центру ваги заготовки до опори, ситуація змінюється. На рис. 6.8 показаний випадок, коли при силі затиску 2200Н за співвідношенням сили тертя (лінія 5) і сили зсуву (лінія 6) немає порушення умов затиску, але момент $(M_P)_A$ навколо опори А (лінія 3) в деякий час має негативний напрям, що свідчить про порушення умов затиску заготовки з такої причини.

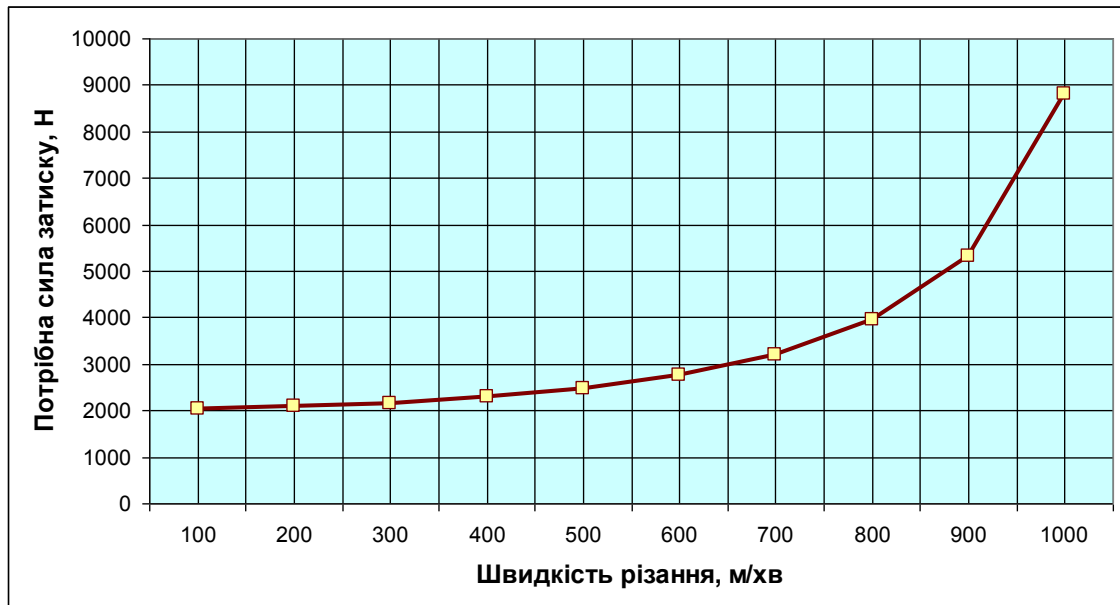


Рис. 6.7 Графік залежності сили затиску від швидкості різання

Слід зауважити, що оскільки момент $(M_p)_A$ фізично не може бути негативним, тому що при цьому відбуватиметься відрив заготовки від опори B , то на осцилограмі такий стан відповідає нулю моменту – ділянка 7 на рис. 6.9.

Висновки

1. Моделювання переконливо доводить, що необхідна сила затиску для закріплення заготовки в пристрої залежить від швидкості різання, а точніше від частоти зміни збуджуючої сили різання. При збільшенні швидкості різання від 100м/хв. до 1000м/хв. при інших незмінних складових процесу різання необхідна сила затиску збільшується від 2030Н до 8800Н тобто у 4,3 рази. Тому не випадково для таких пристроїв у довідникової літературі рекомендується застосовувати коефіцієнт запасу, збільшений до 5...6.

2. В залежності від геометричних параметрів заготовки випадок порушення умов затиску може відбуватися або при зменшенні сили тертя у порівнянні з силою зсуву (зсув заготовки за опорами) або при зміні знаку моменту від сил навколо опори (відрив від опори).

3. Отриманий характер зміни залежності необхідної сили затиску від швидкості різання співпадає з амплітудно-частотною характеристикою пружної динамічної системи заготовка-пристрій.

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗАКРІПЛЕННЯ ЗАГОТОВКИ ПРИБРОЗТОЧУВАННІ ОТВОРІВ

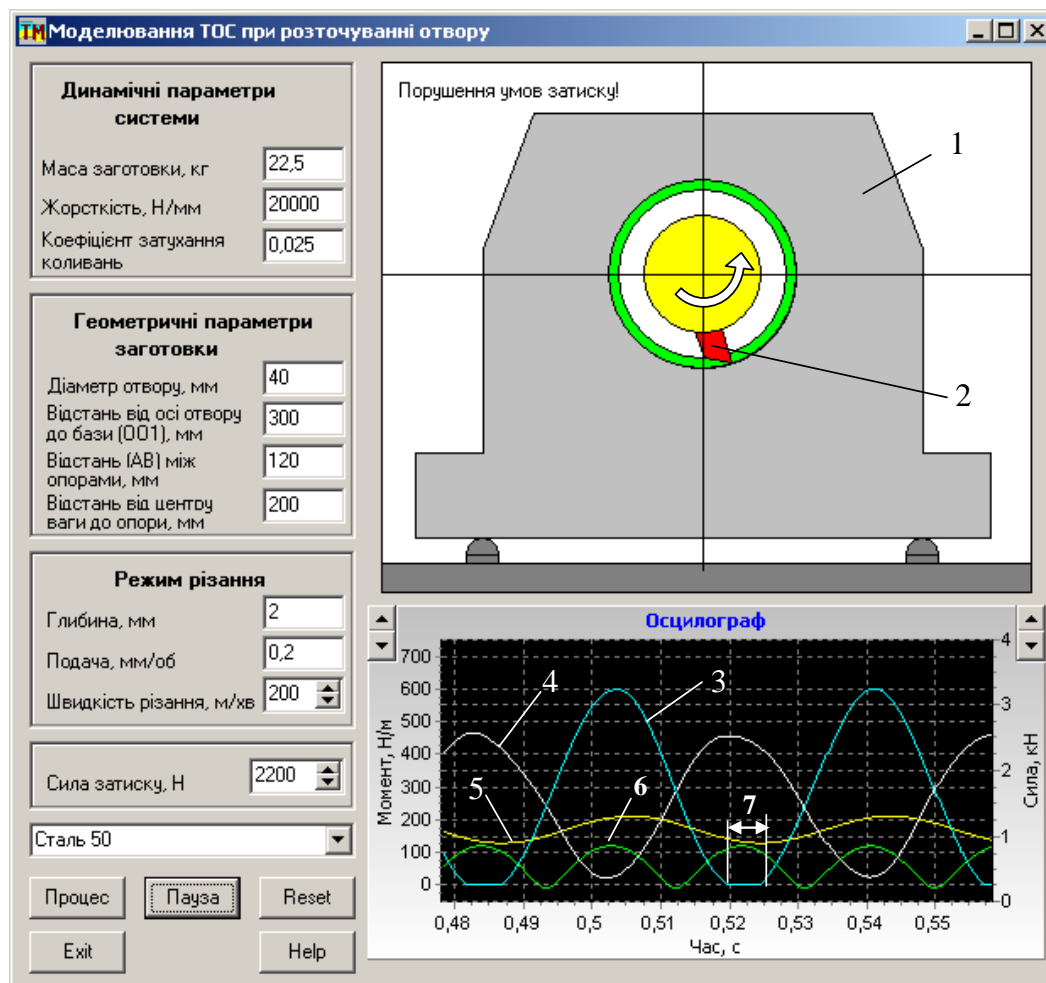


Рис. 6.8 Головний інтерфейс прикладної програми при зміні вихідних даних

Завдання

1. За вихідними даними у відповідності до варіанту (таблиця 6.2) провести експерименти з визначення необхідної сили затиску при зміні швидкості різання з обраним кроком. Програма «Розточування» знаходиться на диску в кінці книги.

2. При проведенні експериментів для кожного нового значення швидкості різання після закінчення перехідних процесів змінювати силу затиску до моменту зникнення надпису «Порушення умов затиску» в графічному вікні інтерфейсу.

3. Записати результати експериментів у таблицю і побудувати графіки залежності необхідної сили затиску від швидкості різання.

Таблиця 6.2 – Вихідні дані

Перша цифра	Маса, кг	Жорсткість, Н/мм	Діаметр отвору, мм	Друга цифра	Матеріал заготовки	Відстань OO_1 , мм	Відстань AB , мм	Відстань від центру мас, мм
0	12	14000	28	0	Сталь 50	70	70	45
1	14	16000	40	1	Сталь	80	70	40

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗАКРІПЛЕННЯ ЗАГОТОВКИ
ПРИ РОЗТОЧУВАННІ ОТВОРІВ

					25ХГГ			
2	16	16000	32	2	Сталь 30ХМА	90	80	50
3	18	20000	30	3	Сталь 35ХГСА	120	120	85
4	20	22000	34	4	Чавун СЧ20	100	110	75
5	22	24000	36	5	Чавун ВЧ60	300	100	200
6	24	21000	38	6	Чавун КЧ60-3	270	110	195
7	26	25000	40	7	Чавун КЧ60-3	330	130	250
8	21	18000	42	8	Сталь 12Х18Н9Т	130	140	60
9	27	23000	44	9	Алюміній АМГ6	150	90	70

Примітка: Для всіх варіантів прийняти:

- ✓ коефіцієнт затухання коливань 0,025;
- ✓ глибину різання 2мм;
- ✓ подачу 0,2мм/об.

Зміст протоколу

У протоколі навести: завдання, копію головного інтерфейсу програми моделювання для будь-якого значення швидкості різання, таблицю експериментальних даних, графік залежності необхідної сили затиску від швидкості різання, пояснення та висновки.

Інструкції до роботи з програмою

Програма призначена для моделювання технологічної обробляючої системи при розточуванні отвору.

Для моделювання на головному інтерфейсі програми треба задати динамічні параметри системи, геометричні параметри заготовки, режим різання, силу затиску. Після вибрати матеріал заготовки, що обробляється, та натиснути кнопку "Процес".

Виконується процес моделювання, в графічному вікні відбувається анімація процесу, а на осцилографі з'являються осцилограми характеристик: сили тертя – жовта лінія, сили зсуву – зелена лінія, моменту сил навколо опори А – біла лінія, моменту сил навколо опори В – голуба лінія. За умови закріплення заготовки сила тертя має весь час перевищувати силу зсуву, а моменти мають бути позитивні, тобто не відривати заготовку від опор.

При моделюванні можна змінювати швидкість різання і силу затиску. В режимі моделювання зміна всіх інших параметрів не ураховується програмою.

Для зміни вихідних даних натиснути кнопку "Reset" - програма переходить у вихідний стан.

При потребі, під час моделювання за допомогою кнопок, що розташовані на зображенні осцилографа можна змінювати масштаб зображення осцилограм за цією школою осцилографу.

Для точного вимірювання величин у вікні "Графіки" можна збільшувати масштаб зображення: підвести мишку до верхнього правого кута обраної для збільшення ділянки, натиснути ліву клавішу і "протягнути" вниз-вліво, відпустити клавішу. Таке збільшення можна виконувати декілька разів до бажаного масштабу.

Повернення до висхідного масштабу – в будь-якому місці вікна "Графіки" натиснути ліву клавішу мишки, "протягнути" вправо-вгору і відпустити клавішу.

Процес моделювання можна у будь-який момент призупинити – кнопка "Пауза", продовження – кнопка "Процес".

Вихід з програми – кнопка "Exit".

Запитання для самоконтролю

1. Чому відбувається порушення умов затиску заготовки при моделюванні? З якої причини?
 2. Як змінюватимуться причини порушення умов затиску заготовки при зміні її розмірів: збільшенні відстані OO_1 і відстані від центру мас? відстані АВ між опорами? Переконайтеся у правильності відповіді з моделювання в прикладній програмі.
 3. Як змінюватиметься графік залежності необхідної сили затиску від швидкості різання при подальшому збільшенні швидкості різання? Чому? Чи буде екстремум на такому графіку?
 4. Як розрахувати швидкість різання, при якій (для вихідних даних варіанту завдання) потрібна максимальна сила затиску заготовки?
 5. Як змінюватимуться умови закріплення заготовки при розточуванні отвору борштангою з двома, опозитно розташованими різцями?
-
-

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗАТИСКУ В ПРИСТРОЯХ ПЕРШОГО І ДРУГОГО ТИПУ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

Мета роботи: Визначення залежностей максимально допустимої глибини різання від заданих параметрів технологічної обробляючої системи при торцевому фрезеруванні заготовки, що затиснута в пристроях першого і другого типу.

Теоретична частина

Як вже зазначалось (дивись лабораторну роботу №6), всі верстатні пристрої використовуються в умовах дії сили різання, яка весь час змінюється, причому ці зміни можуть бути досить швидкими і залежать від обраного режиму різання, отже, при розрахунку сили затиску треба урахувати динамічні явища, що мають місце на практиці.

Одною з найбільш нестаціонарних операцій оброблення різанням є операція торцевого фрезерування, коли спостерігається суттєва нерівномірність зміни сили різання, яка визначається за геометричними співвідношеннями параметрів фрези і ширини фрезерування [5].

При фрезеруванні, на кожному зубі, що ріже, виникає сила різання, яка може бути розкладена на складові за визначеною системою координат. На рис. 7.1 показана фреза радіусом R_ϕ , що має 8 зубців, яка обробляє заготовку шириною B при повздовжній подачі S . Приблизно можна вважати, що різання здійснюється за дугою AC , яка, при симетричному фрезеруванні, визначається кутом φ_p . Таким чином схема є спрощеною, тому що насправді кожний зуб фрези, при безперервній подачі S , рухається за циклоїдою.

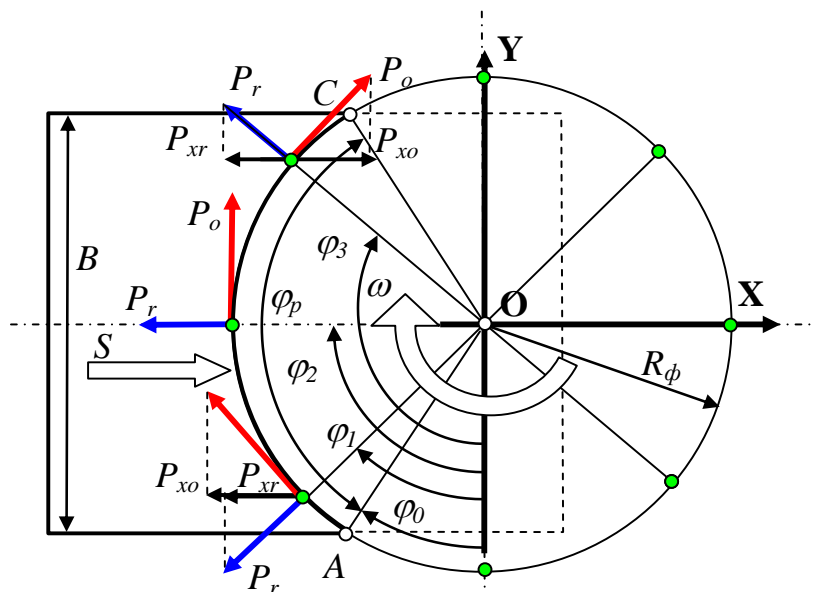


Рис. 7.1 Схема розкладу сили різання в горизонтальній площині

В горизонтальній площині складова сили різання на кожному зубі розкладається на окружну складову P_o , та радіальну P_r . Окружна складова сили різання на одному зубі може бути визначена за формулою [5]:

$$P_o = C_p (S_z)_\phi^{1-k} (H)_\phi^{1-\mu} \sin^{1-k} \varphi, \quad (7.1)$$

де C_p , k і μ – коефіцієнт і показники степеня, що залежать від механічних властивостей оброблюваного матеріалу, $(S_z)_\phi$ – фактична подача на зуб, $(H)_\phi$ – фактична глибина різання, φ – кутова координата розташування зуба фрези.

Ураховуючи, що радіальна складова $P_r \approx 0,6P_o$, складова сили різання, що діє за напрямком вісі X, маємо:

$$P_x = P_{xr} + P_{xo} = P_o (\cos \varphi + 0,6 \sin \varphi). \quad (7.2)$$

В залежності від співвідношення діаметру фрези, кількості зубців та ширини фрезерування в різанні може приймати участь декілька зубців одночасно, причому кількість зубців фрези, що знаходяться у роботі постійно змінюється від максимальної $n_{\max} = 1 + \varphi_p z / 2\pi$ до мінімальної $n_{\min} = \varphi_p z / 2\pi$. Таким чином, при визначенні діючої сили різання за формулами (7.1) і (7.2) треба ураховувати таку особливість процесу фрезерування.

В першому наближенні, з урахуванням процесу різання, як такого, що відбувається в замкненій пружній системі, в напрямку координати X, він може бути представлений за функціональною схемою рис.7.2.

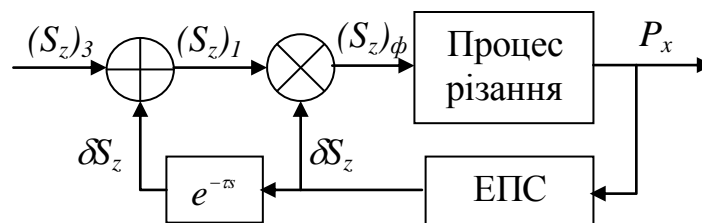


Рис. 7.2 Функціональна схема процесу різання

На функціональній схемі процес різання представлений блоком, на вході якого діє фактична подача на зуб $(S_z)_\phi$, а на виході – горизонтальна складова P_x сили різання за віссю X. Складова P_x діє на еквівалентну пружну систему (ЕПС) і викликає її пружну деформацію δS_z , яка, в наслідок замкненості ТОС [6], провокує зміну фактичної подачі на зуб фрези: $(S_z)_\phi = (S_z)_1 - \delta S_z$.

Крім того треба ураховувати оброблення за слідом, тобто коли кожний наступний зуб фрези зрізує шар припуску, який викривлений попереднім зубом в наслідок коливань динамічної системи. На рис. 7.3 пояснюється оброблення за слідом, де наслідки коливань системи показані у збільшеному масштабі: поверхня 1 заготовки, що утворена попереднім зубом

фрези обробляється наступним зубом 2, який в свою чергу утворює поверхню 3, що буде оброблятися другим наступним зубом і т. д. Такий феномен представлений на функціональній схемі за допомогою запізнюючого елемента з передатною функцією e^{-ts} , де τ – час проходження кута між двома сусідніми зубцями, s – оператор Лапласа.

Таким чином, фактична подача на зуб:

$$(S_z)_\phi = (S_z)_3 - \delta S_z(1 - e^{-ts}), \quad (7.3)$$

де $(S_z)_3$ – задана подача на зуб фрези.

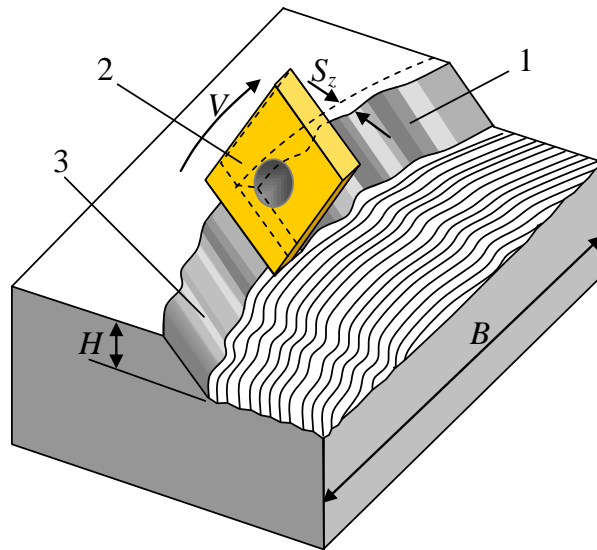


Рис. 7.3 Оброблення за слідом

Еквівалентна пружна система, обмежуючись заготовкою і затискним пристроєм, може бути представлена двома моделями: при використанні затискного пристрою першого типу – за схемою рис. 7.4,а, при використанні затискного пристрою другого типу – за схемою рис. 7.4,б. Для обох схем заготовка 1 затиснута між рухомою 2 і нерухоною 3 губками затискного пристрою і обробляється фрезою 4, яка створює вплив збурення у вигляді складової P_x сили різання.

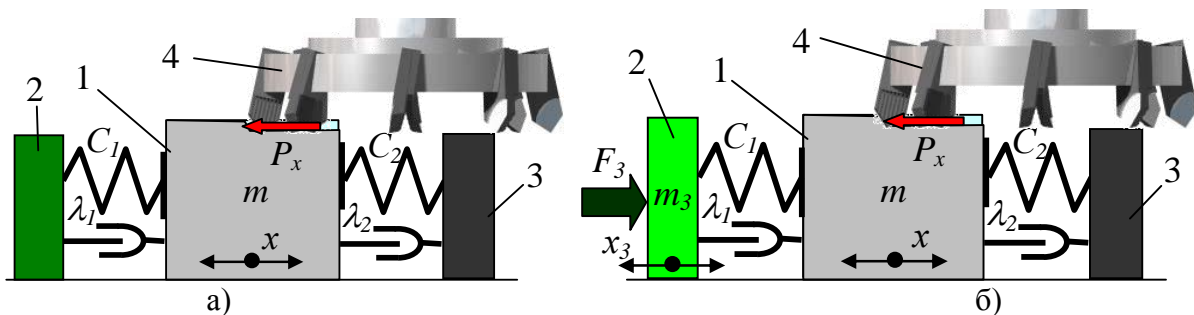


Рис. 7.4 Моделі динамічних систем

Математична модель руху системи за рис. 7.4,а, що представляє затискний пристрій першого типу, є нелінійна і може бути представлена у вигляді диференціального рівняння руху другого порядку:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \lambda \frac{dx}{dt} + Cx = P_x, \quad (7.4)$$

де m – маса заготовки, P_x – складова сили різання, жорсткість зв'язку $C=C_1+C_2$, в'язке тертя $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$,

Нелінійність системи полягає не тільки в нелінійній залежності складової P_x сили різання від глибини і кута розташування зуба фрези, що ріже (дивись формули (7.1) і (7.2)), а й в зміні жорсткості і в'язкого тертя при розкритті стиків. Так, при розкритті лівого стику $C=C_2$, $\lambda = \lambda_2$, при розкритті правого стику $C=C_1$, $\lambda = \lambda_1$.

На відміну від розглянутої схеми, динамічна модель за рис. 7.4,б є двохмасовою, до того ж рухома губка весь час знаходиться під дією сили пневоциліндра. Таким чином, математична модель руху системи, що представляє затискний пристрій другого типу, може бути представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} + \lambda_2 \frac{dx}{dt} + C_2 x + \lambda_1 \left(\frac{dx}{dt} - \frac{dx_3}{dt} \right) + C_1 (x - x_3) = P_x \\ m_3 \frac{d^2 x_3}{dt^2} + \lambda_1 \left(\frac{dx_3}{dt} - \frac{dx}{dt} \right) + C_1 (x_3 - x) = -F_3 \end{cases}, \quad (7.5)$$

де m_3 – маса затискної губки, F_3 – сила затиску від пневмоциліндра.

Оскільки обидві моделі є нелінійними, розв'язання їх рівнянь руху можливе тільки чисельними методами, наприклад, методом Рунге-Кутта четвертого порядку [6].

Розроблена математична модель ураховує динамічні явища, що відбуваються в пружній технологічній системі, яка представлена заготовкою і затискним пристроєм і дозволяє досліджувати процес торцевого фрезерування в напрямку однієї координати (за рухом повздовжньої подачі) і визначати максимально допустимий режим різання за критерієм втрати сталості.

Практична частина

Для виконання практичної частини роботи використовується прикладна програма, інтерфейс якої показаний на рис. 7.5.

Програма призначена для моделювання динамічних процесів, що відбуваються в затискних верстатних пристроях першого і другого типів при торцевому фрезеруванні. Програма дозволяє досліджувати умови затиску

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗАТИСКУ В ПРИСТРОЯХ ПЕРШОГО І ДРУГОГО ТИПУ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

заготовки від режиму різання та динамічних властивостей затискного пристрою.

Для роботи з програмою спочатку обирають тип затискного механізму за надписами, що знаходяться вгорі справа інтерфейсу: «Ручний затиск» або «Пневматичний затиск».

Після завдання вихідних даних у відповідних віконцях і вибору матеріалу інструменту і заготовки в меню, що випадає, натиснути кнопку «Застосувати дані». Після цього можна змінювати силу на ручці при ручному затиску, або площу поршня при пневматичному затиску, а також задану глибину різання. Натиснути кнопку «Затиснути» – в графічному анімаційному вікні відбувається затиск заготовки.

Увага! Для моделювання фрезерування в напрямку рухомої губки подача задається позитивною, а для фрезерування в напрямку нерухомої губки – негативною!

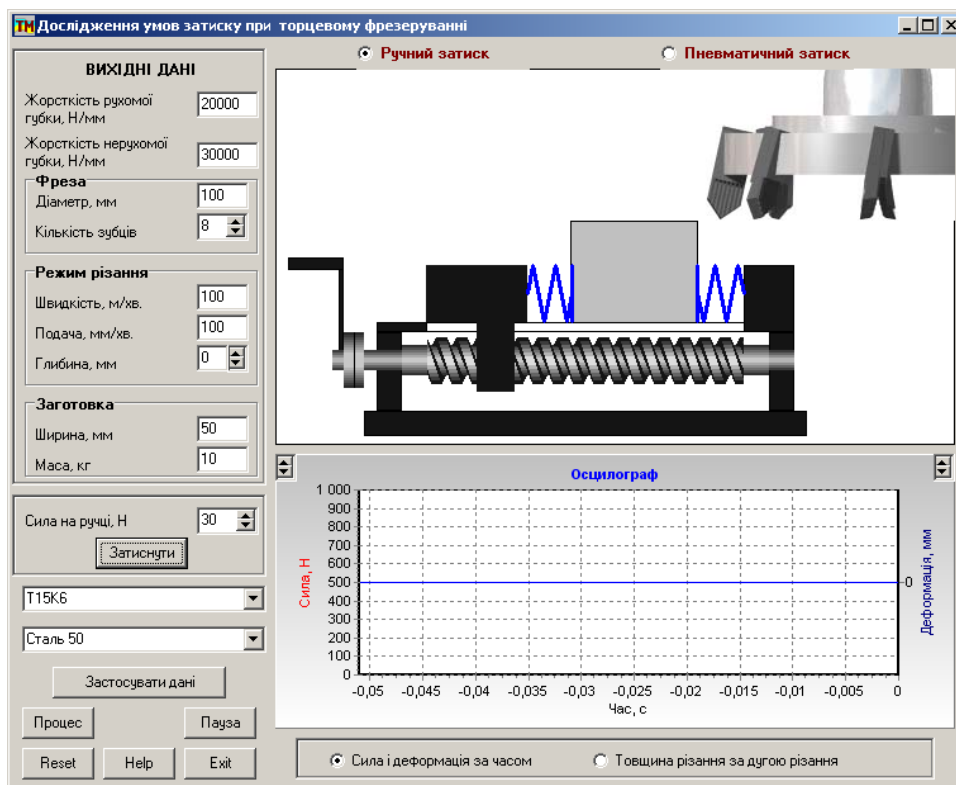


Рис. 7.5 Інтерфейс програми моделювання

Після закінчення затиску для моделювання натиснути кнопку «Процес». Відбувається анімація процесу фрезерування з появою характеристик на екрані віртуального осцилографа. Можна обирати осцилограми – «Сила і деформація за часом» або «Товщина різання за дугою різання».

Увага! Процес анімації в графічному вікні і поява осцилограм на віртуальному осцилографі не синхронізовані за кутом обертання фрези, проте синхронізовані за подачею.

Процес моделювання можна призупинити – кнопка «Пауза» і відновити знову – кнопка «Процес». Для повернення у вихідний стан – натиснути кнопку «Reset».

Метою досліджень є визначення залежності максимально допустимої глибини різання від заданих параметрів технологічної обробляючої системи (ТОС). При цьому дослідженню підлягають ТОС з затискними пристроями першого і другого типу з напрямом подачі фрезерування на рухому і нерухому губки окремо. Максимально допустима глибина різання визначається за амплітудою деформації ТОС, яка викликає розкриття стику, лівого або правого, або обох по черзі. Такий стан афішується появою в графічному полі анімації відповідного надпису.

Перша серія експериментів проводиться для визначення залежності максимально допустимої глибини різання при ручному затиску заготовки і напрямку подачі на рухому губку тисків. До проведення експериментів визначити крок зміни глибини різання і підготувати відповідну таблицю для фіксації експериментальних даних.

Визначати амплітуду деформації ТОС необхідно при досягненні процесу, що встановився. Такий стан відповідає сталому повторенню всіх осцилограм: сили, деформації та товщини різання. При досягненні такого стану натиснути кнопку «Пауза», виміряти, шляхом збільшення осцилограми деформації (дивись інструкцію до роботи з програмою) амплітуду коливань, записати в таблицю. Змінити глибину різання за наступним значенням і натиснути кнопку «Процес». Знову дочекатися режиму, що встановився та провести вимірювання амплітуди коливань і так до появи надпису в анімаційному полі про розкриття стику.

Слід зауважити, що при моделюванні коливання ТОС відображаються у збільшеному масштабі в полі анімації як деформації пружних елементів, які символізують жорсткості рухомої та нерухомої губок тисків. На рис. 7.6 показаний стан інтерфейсу при досягненні режиму, що встановився, для глибини різання 3мм.

В цей час фрезерування відбувається за всією шириною (50мм) заготовки, що обробляється. В полі осцилографа показані: лінія 1 – зміна складової P_x сили різання в напрямку подачі, лінія 2 – деформація пружної системи. Характер зміни складової P_x сили різання пояснюється залежністю від кутової координати розташування зуба фрези, що ріже (дивись формулу (7.2)).

При обранні опції «Товщина різання за дугою різання» з'являється осцилограма зміни товщини різання, яка представляється за розгорткою дуги різання – лінія 3. За цією осцилограмою можна спостерігати утворення хвилястості обробленої поверхні кожним зубом фрези. Видно, що, за умовами експерименту, ріже один або два зуби.

Оскільки для вихідних даних процесу різання за всією шириною відбувається одним або двома зубцями фрези [5], то складова P_x сили різання

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗАТИСКУ В ПРИСТРОЯХ ПЕРШОГО І ДРУГОГО ТИПУ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

змінюється від 150Н до 500Н, що викликає відповідну реакцію пружної ТОС, яка провокує виникнення коливань як сили різання, так і пружної деформації. Максимальна амплітуда коливань, виміряна за осцилограмою, складає 0,014мм.

Розрахункове значення подачі на зуб фрези може бути визначене за відомою формулою:

$$S_z = \frac{S\pi D_\phi}{1000V_z}, \quad (7.6)$$

де S – подача (мм/хв.), D_ϕ – діаметр фрези (мм), V – швидкість різання (м/хв.), z – кількість зубців.

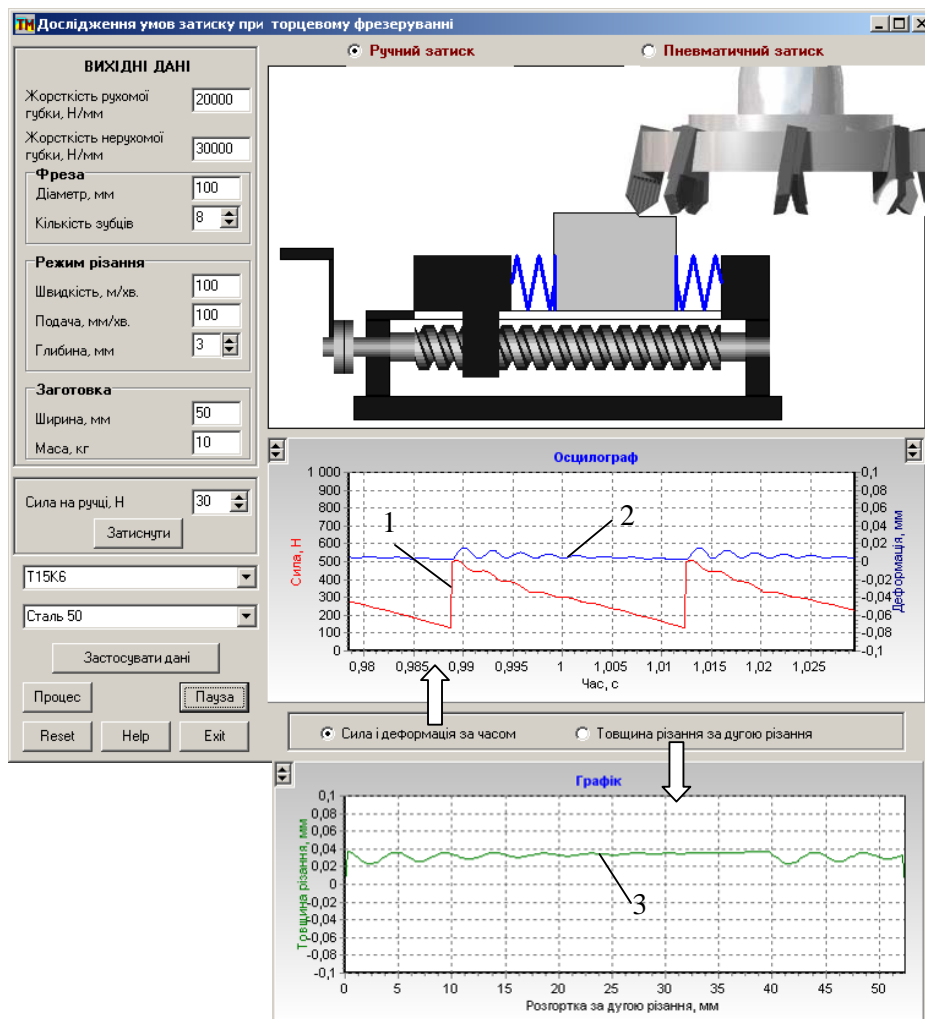


Рис. 7.6 Інтерфейс програми при моделюванні фрезерування з глибиною різання 3мм

Для умов експерименту за вихідними даними маємо $S_z=0,039$ мм, проте, з графіку зміни товщини різання (лінія 3 на рис. 7.6) ця величина змінюється від 0,039мм до 0,025мм, причому характер зміни коливальний, повністю відповідає коливанням пружної ТОС – лінія 2 на рис. 7.6. На

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗАТИСКУ В ПРИСТРОЯХ ПЕРШОГО І ДРУГОГО ТИПУ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

графіку зміни товщини різання за дугою різання можна виділити дві ділянки, що відповідають різанню двома зубцями фрези одночасно.

Результати моделювання при різних глибинах різання для фрез з різною кількістю зубців представлені у таблиці 7.1.

При збільшенні глибини різання амплітуда коливань ТОС збільшується і характер різання суттєво змінюється. На рис. 7.7 представлений стан інтерфейсу при досягненні процесу, що встановився, для заданої глибини різання 4,5мм.

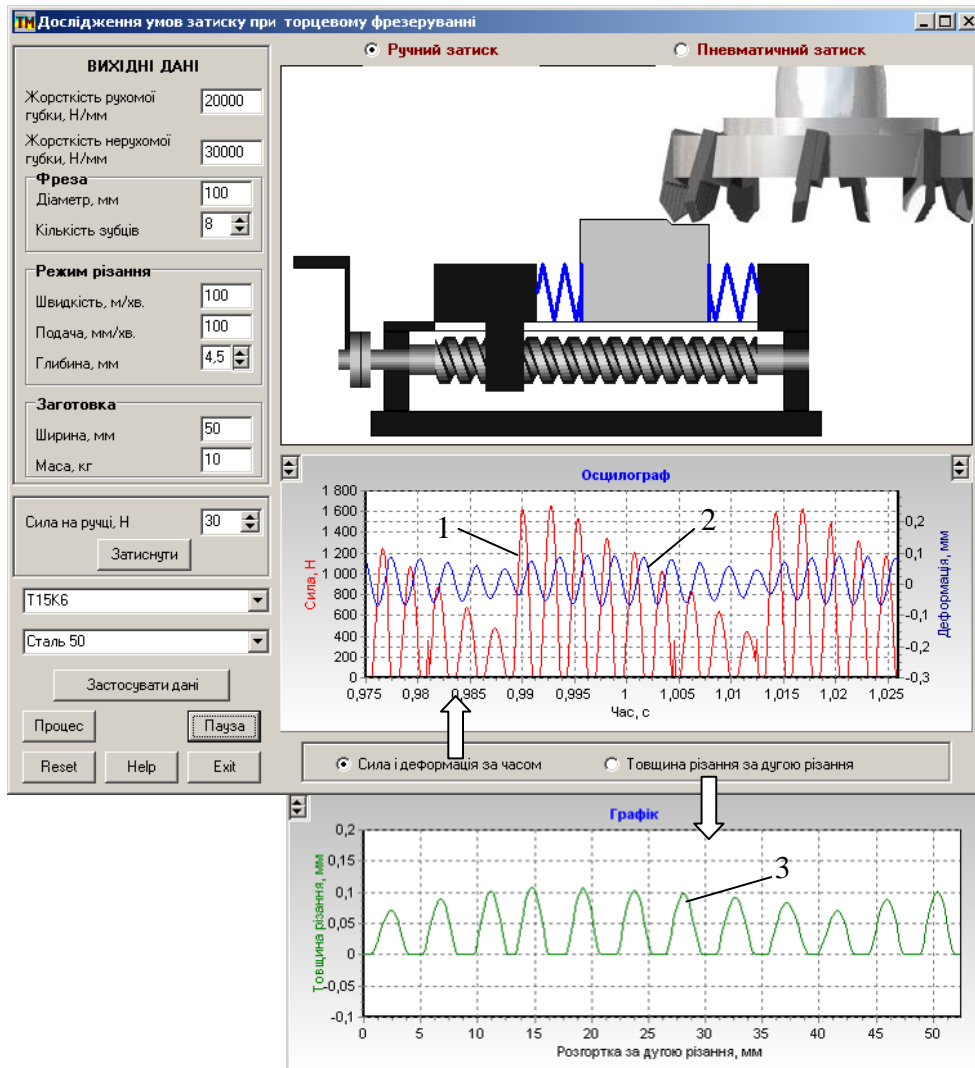


Рис. 7.7 Інтерфейс програми при моделюванні фрезерування з глибиною різання 4,5мм

Амплітуда пружних деформацій збільшується до 0,16мм, що значно перевищує розрахункову подачу на зуб фрези, причому частина траєкторії знаходиться у негативній області. Такий характер коливань викликає зміну характеру товщини різання (лінія 3 на рис. 7.7), на частині траєкторії, що відповідає негативним значенням деформації, різання не відбувається, а максимальна товщина різання досягає 0,12мм. Очевидно, що за такої глибини різання процес не є придатним для реалізації, хоча стики між загото-

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗАТИСКУ В ПРИСТРОЯХ ПЕРШОГО І ДРУГОГО ТИПУ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

вкою і губками тисків не розкриваються і заготовка залишається затиснутою.

Таблиця 7.1 – Результати експериментів

№	Глибина різання, мм	Амплітуда коливань, мм		
		Z=8	Z=12	Z=16
1	1	0,006	0,004	0,003
2	1,5	0,007	0,006	0,005
3	2	0,009	0,008	0,054
4	2,5	0,011	0,083	0,091
5	3	0,014	0,115	0,144
6	3,5	0,02	0,148	0,23
7	4	0,121	0,193	р.п.с.
8	4,5	0,16	0,229	
9	5	0,195	р.п.с.	
10	5,5	0,224		
11	6	0,268		
12	6,5	р.п.с.		

Примітка: р.п.с. – розкриття правого стику.

При збільшенні глибини різання до 6,5мм настає розкриття правого стику в певні моменти часу (рис. 7.8). Моделювання закінчується і визначається максимально допустима глибина різання 6мм (дивись табл. 7.1).

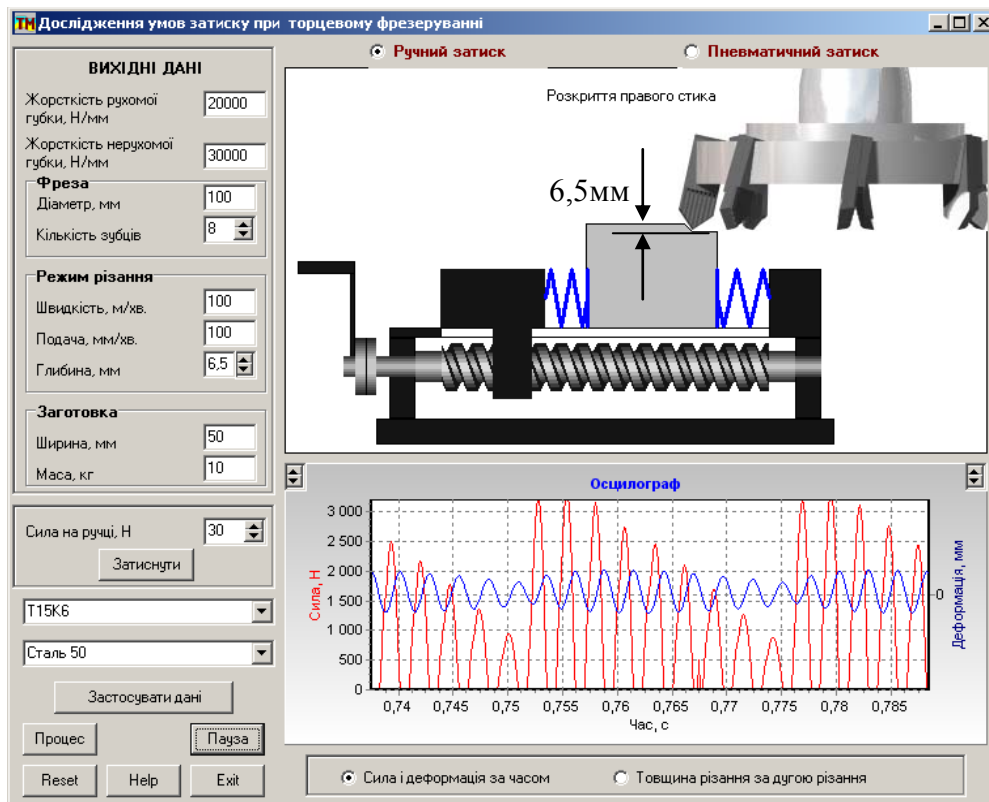


Рис. 7.8 Інтерфейс програми при моделюванні фрезерування при розкритті правого стику

Наступні експерименти проводяться при зміні кількості зубців фрези аналогічним чином, а результати заносяться в таблицю 7.1. За результатами побудовані графіки (рис. 7.9).

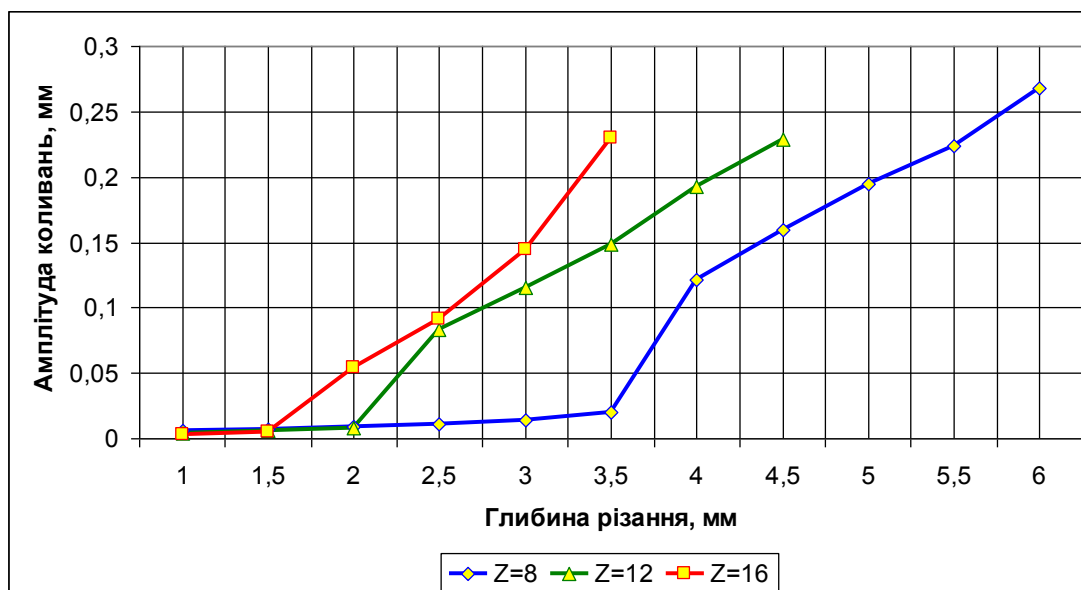


Рис. 7.9 Графіки залежності амплітуди коливань від глибини різання при напрямку подачі на рухому губку тисків з ручним затиском

Для проведення експериментів з напрямом подачі на нерухому губку тисків треба змінити знак величини подачі у відповідному віконці інтерфейсу. Експерименти також проводяться при зміні кількості зубців фрези, а результати заносяться в таблицю 7.2.

Таблиця 7.2 – Результати експериментів

№	Глибина різання, мм	Амплітуда коливань, мм		
		Z=8	Z=12	Z=16
1	1	0,004	0,004	0,003
2	1,5	0,007	0,006	0,005
3	2	0,009	0,008	0,055
4	2,5	0,01	0,083	0,087
5	3	0,014	0,117	0,141
6	3,5	0,02	0,148	0,214
7	4	0,121	0,188	0,35
8	4,5	0,16	0,229	р.л.с.
9	5	0,192	0,297	
10	5,5	0,224	0,347	
11	6	0,268	р.л.с.	
12	6,5	0,324		
13	7	0,365		
14	7,5	р.л.с.		

Примітка: р.л.с. – розкриття лівого стику.

За результатами виконаних експериментів побудовані відповідні графіки (рис. 7.10).

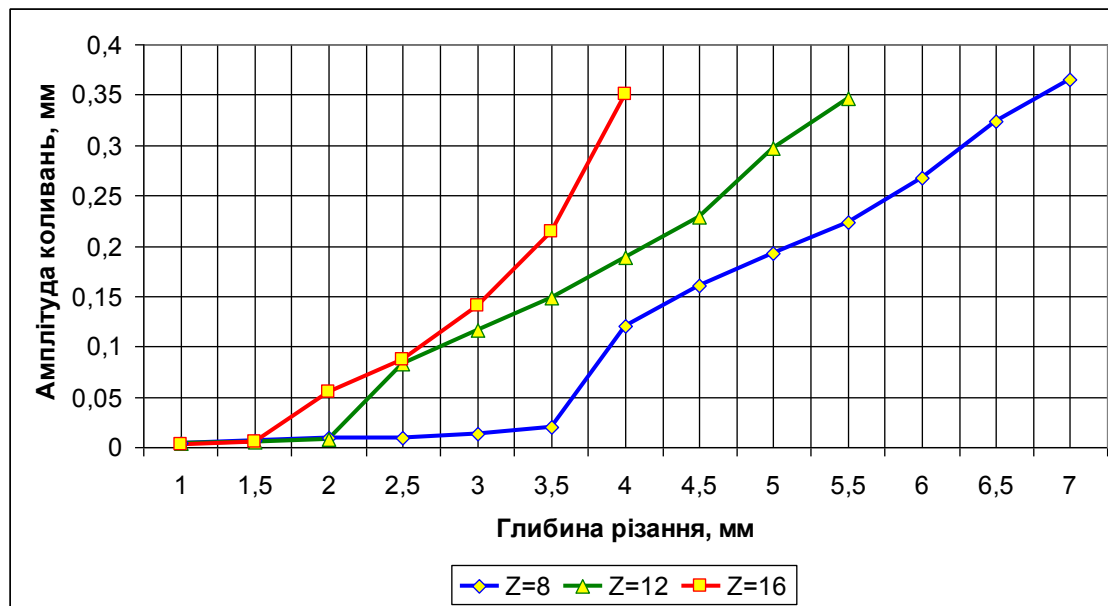


Рис. 7.10 Графіки залежності амплітуди коливань від глибини різання при напрямку подачі на нерухому губку тисків з ручним затиском

При досягненні критичної глибини різання, відбувається розкриття лівого стику (рис. 7.11). Розкриття лівого стику відбувається при глибині різання, більшій, ніж при напрямку подачі на рухому губку тисків. Відповідно значно збільшується і величина складової сили різання: в цьому випадку вона перевищує 6000Н (порівняйте з рис. 7.8). Отриманий результат повністю підтверджує відомі практичні рекомендації з вибору напрямку подачі на нерухому губку [4, 8].

З аналізу графіків за рис. 7.9 і рис. 7.10 можна зробити висновок про приблизно однакові величини амплітуди коливань пружної системи при зміні кількості зубців фрези, коли відбувається розкриття стику. Для фрезерування з напрямком подачі на рухому губку тисків ця величина амплітуди коливань складає 0,25мм, для фрезерування в напрямку на нерухому губку – 0,35мм.

В обох випадках збільшення кількості зубців фрези приводить до зменшення допустимої глибини різання. Такий результат пояснюється тим, що при однакових параметрах режиму різання, а саме, швидкості різання (100 м/хв.) збільшення кількості зубців приводить до збільшення частоти коливань збурення, в якості якого виступає складова P_x сили різання. З іншого боку збільшення кількості зубців фрези при однакових величинах хвилинної подачі викликає зменшення сили різання на одному зубці фрези. Проте, вплив збільшення частоти, що наближає систему до резонансу, виявляється набагато сильнішим, за зменшення величини збурення і амплітуди коливань збільшується.

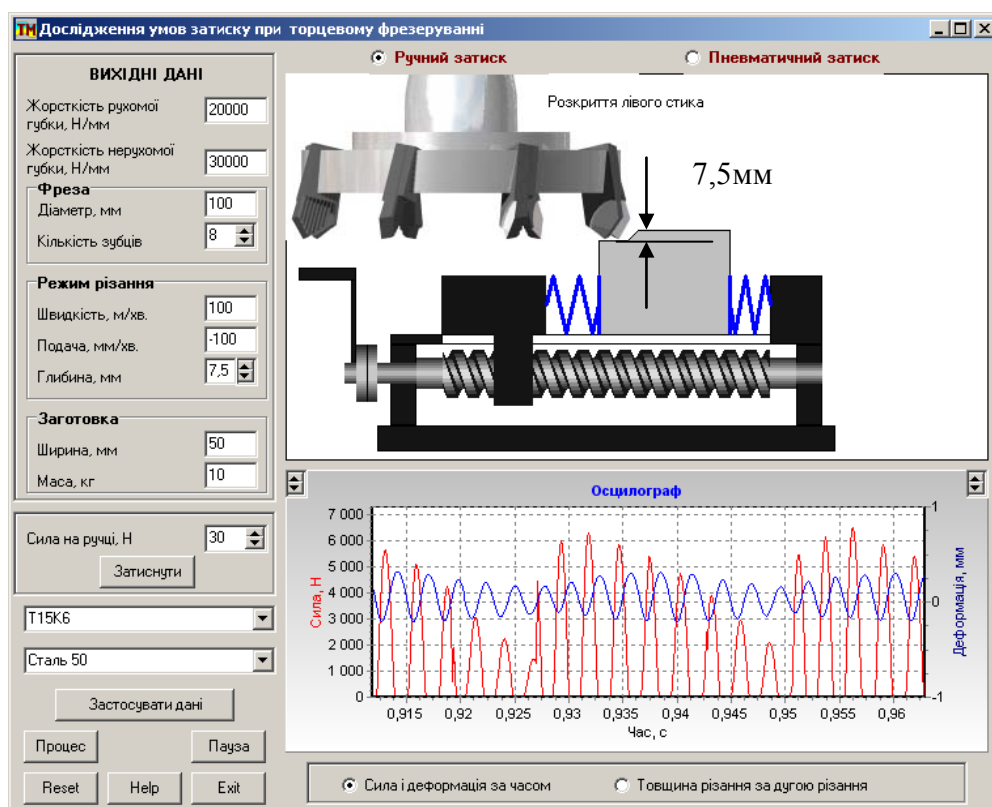


Рис. 7.11 Інтерфейс програми при моделюванні фрезерування при розкритті лівого стику

Прикладна програма дозволяє провести експерименти і для тисків з пневматичним затиском заготовки. На рис. 7.12 показаний стан інтерфейсу під час моделювання процесу фрезерування в тисках з пневматичним затиском при глибині різання 3мм.

Оскільки такий пристрій відноситься до затискних пристроїв другого типу, тобто в ланцюгу передачі зусилля відсутня самогальмівна кінематична пара, то характер процесу фрезерування значно змінюється при тих же вихідних даних ТОС і процесу різання. Хоча коливання в системі все ж таки відбуваються приблизно з тою ж амплітудою (на рис. 7.12: лінія 1 – складова P_x сили різання, лінія 2 – пружні деформації ТОС), їх частота змінилася, що пояснюється демпфіруючими властивостями затискного пристрою і наявністю двохмасової системи, де, при певному співвідношенні параметрів обох мас, може відбуватися автоматичне гасіння коливань [6].

Для умов експерименту за вихідними даними також, як і в попередніх дослідженнях, маємо $S_z=0,039$ мм, а з графіку зміни товщини різання (лінія 3 на рис. 7.12) ця величина змінюється від 0,037мм до 0,018мм. Тут на графіку зміни товщини різання за дугою різання також можна виділити дві ділянки, що відповідають різанню двома зубцями фрези $z=8$ при різанні за всією шириною заготовки.

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗАТИСКУ В ПРИСТРОЯХ ПЕРШОГО І ДРУГОГО ТИПУ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

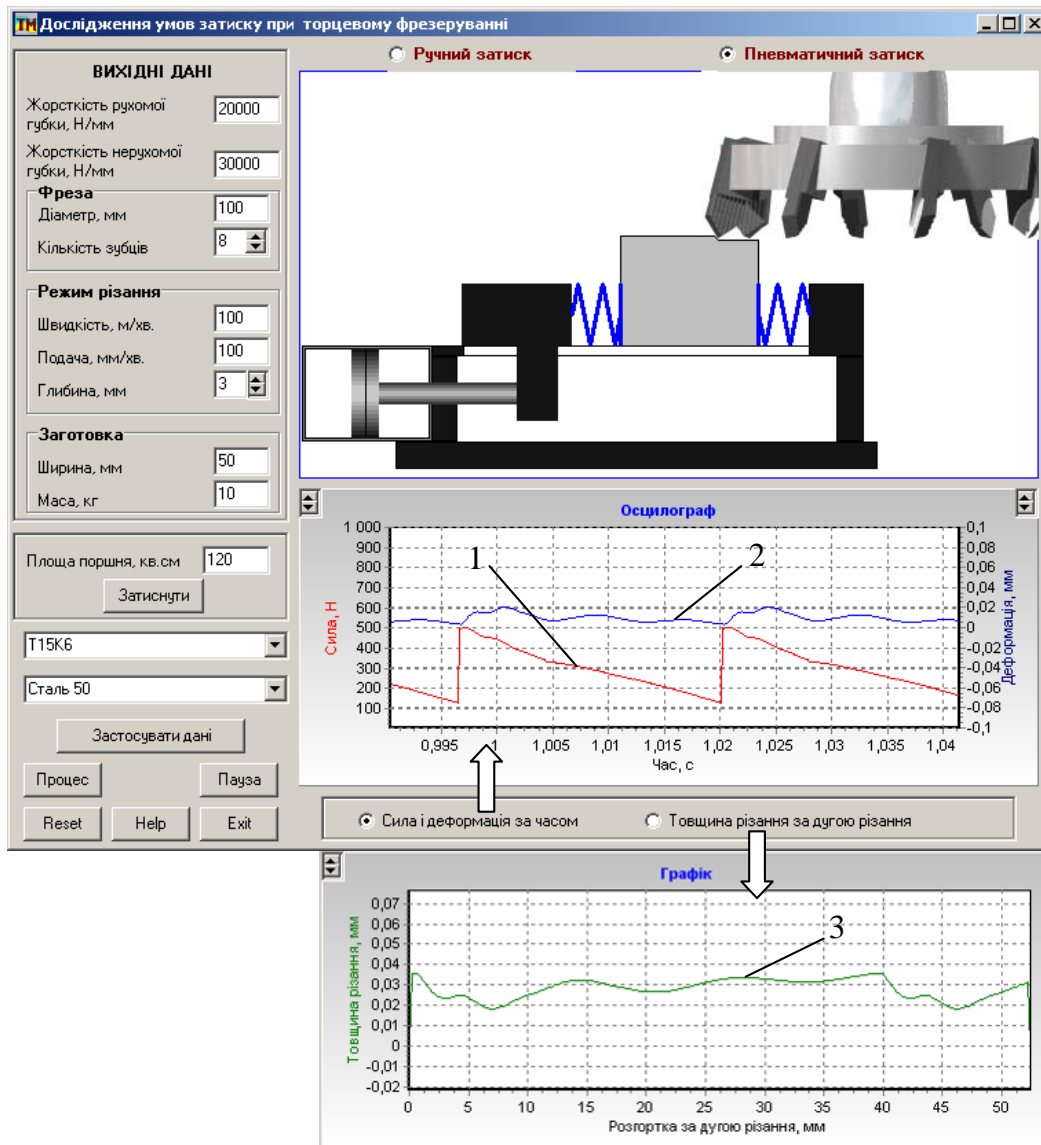


Рис. 7.12 Інтерфейс програми при моделюванні фрезерування з глибиною різання 3мм

Експерименти проводились з кроком зміни глибини різання 1мм при різних кількостях зубців фрези, а результати занесені до таблиці 7.3. За експериментальними даними побудовані графіки, що представлені на рис. 7.13.

При збільшенні глибини різання характер коливань змінюється, наближаючись до того, що був зафіксований при дослідженні тисків першого типу, тобто із ручним затиском.

При кількості зубців фрези $z=8$ на всьому діапазоні зміни глибини різання, що дозволяє програма – до 10мм включно, не було виявлено розкриття стиків. Для фрез з кількістю зубців 12 і 16 при глибині різання 9мм і 7мм відповідно відбувалося розкриття правого стику (рис. 7.14).

Проведення експериментів для тисків з пневматичним затиском, тобто затискних пристроїв другого типу, при напрямку подачі на нерухому

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗАТИСКУ В ПРИСТРОЯХ ПЕРШОГО І ДРУГОГО ТИПУ ПРИ ТОРЦЕВОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

губку показало такі ж результати, що і при напрямку подачі на рухому губку – експериментальні дані співпадають з даними таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Результати експериментів

№	Глибина різання, мм	Амплітуда коливань, мм		
		Z=8	Z=12	Z=16
1	1	0,006	0,005	0,002
2	2	0,012	0,01	0,005
3	3	0,017	0,015	0,007
4	4	0,026	0,021	0,061
5	5	0,03	0,06	0,1
6	6	0,035	0,089	0,158
7	7	0,041	0,117	р.п.с.
8	8	0,051	0,16	
9	9	0,132	р.п.с.	
10	10	0,169		

Примітка: р.п.с. – розкриття правого стику.

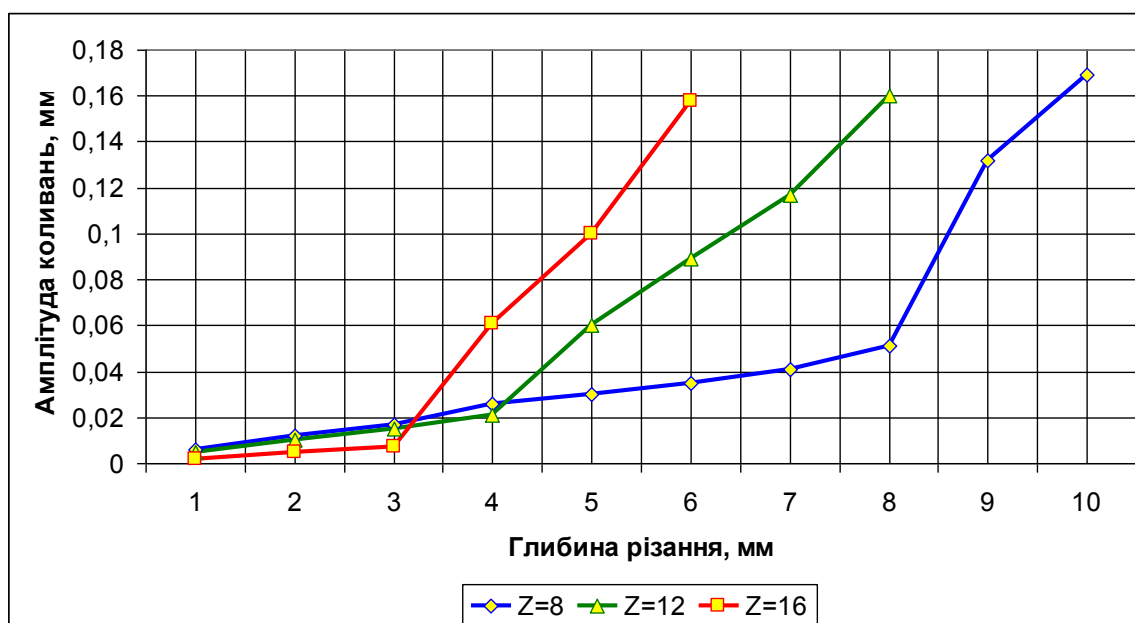


Рис. 7.13 Графіки залежності амплітуди коливань від глибини різання для тисків з пневматичним затиском

При проведенні експериментів для тисків з пневматичним затиском на всьому діапазоні зміни глибини різання і кількості зубців фрези не відбувалося розкриття лівого стику.

Така поведінка ТОС також пояснюється відсутністю само гальмівної кінематичної пари в ланцюгу передачі зусилля затиску і пружним зв'язком з другою масою (дивись модель (7.5)).

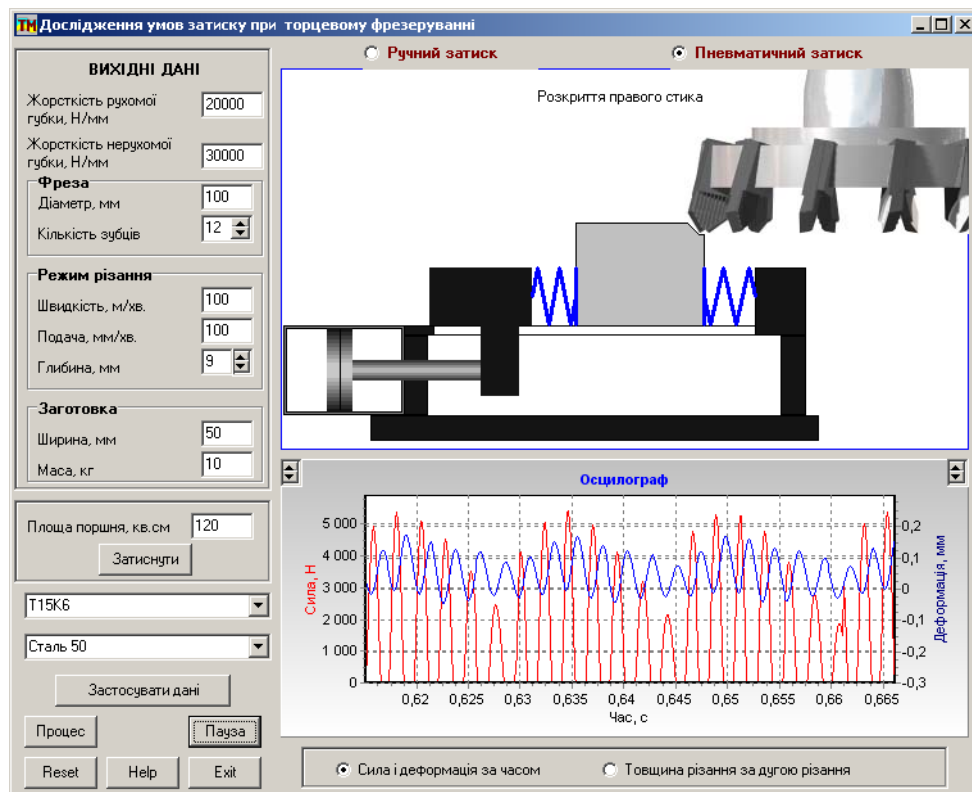


Рис. 7.14 Інтерфейс програми при моделюванні фрезерування з глибиною різання 9мм для фрези $z=12$

Висновки

1. Сила різання (її складова P_x) при урахуванні пружної ТОС, яка представлена затискним пристроєм, суттєво залежить від коливань ТОС і при певному режимі не може бути визначена за відомими з теорії різання залежностями, що не ураховують динамічні явища при різанні. Наприклад, при глибині різання 3мм (коли коливання пружної ТОС незначні) максимальна величина складової P_x сили різання за залежностями (7.1) і (7.2) складає 500Н, така ж максимальна величина цієї складової і на осцилограмі при моделюванні (дивись рис. 7.6). При збільшенні глибини різання до 4,5мм складова сили різання за згаданими вище залежностями дорівнює 750Н, тоді як за осцилограмами при моделюванні вона дорівнює 1650Н, тобто майже в 2,2 рази більша.

2. Для затискних пристроїв першого типу максимально допустима глибина різання (фрезерування без розкриття стиків) більше при напрямку подачі на нерухому губку, хоча при застосуванні критерію відсутності коливань, амплітуда яких перевищує подачу на зуб фрези глибина різання однакова і суттєво залежить тільки від кількості зубців фрези (порівняйте рис. 7.10 і рис. 7.13: для фрези $z = 8 - 3,5$ мм, для фрези $z = 12 - 2$ мм, для фрези $z = 8 - 1,5$ мм).

Завдання

1. За вихідними даними у відповідності до варіанту (таблиця 7.4, таблиця 7.5) провести експерименти з визначення залежності максимально допустимої глибини різання від заданих параметрів технологічної обробляючої системи (ТОС). Програма «Фрезерування» знаходиться на диску в кінці книги.

2. Експерименти проводити послідовно для тисків з механічним затиском при напрямку подачі на нерухому і рухому губки і для тисків з пневматичним затиском при напрямку подачі на рухому губку. Підготувати відповідні таблиці (дивись таблиці 7.1 - 7.3) для реєстрації зміни амплітуди від глибини різання при $z=8$, $z=12$, $z=16$ зубців фрези. Експерименти проводити до розкриття одного зі стиків (або обох відразу).

3. Записати результати експериментів у таблицю і побудувати графіки залежності амплітуди коливань від глибини різання.

Таблиця 7.4 – Вихідні дані

Перша цифра	Жорсткість, Н/мм		Діаметр фрези, мм	Заготовка	
	Рухома губка	Нерухома губка		Ширина, мм	Маса, кг
0	12000	14000	100	50	16
1	14000	18000	80	60	14
2	16000	20000	80	70	12
3	18000	24000	120	80	8
4	20000	28000	80	65	10
5	22000	24000	100	55	14
6	24000	30000	80	75	18
7	26000	32000	120	85	16
8	28000	34000	80	50	6
9	30000	40000	60	45	8

Таблиця 7.5 – Вихідні дані

Друга цифра	Матеріал заготовки	Матеріал інструменту	Режим різання	
			Швидкість, м/хв.	Подача, мм/хв.
0	Чавун СЧ20	ВК8	100	100
1	Чавун ВЧ60	ВК6	80	120
2	Сталь 35	T15K6	120	140
3	Сталь 50	T14K8	130	160
4	Сталь 20	T15K6	90	210
5	Чавун КЧ60-3	ВК8	160	100
6	Алюміній АМГ6	P6M5	200	300
7	Сталь 30ХМА	T14K8	150	180
8	Сталь 40	T14K8	110	200
9	Сталь 12ХНТ	T15K6	70	80

Зміст протоколу

У протоколі навести: завдання, копію головного інтерфейсу програми моделювання для будь-якого значення глибини різання при досліджен-

ні тисків з механічним затиском і пневматичним затиском, таблиці експериментальних даних, графіки залежності амплітуди коливань від глибини різання при $z=8$, $z=12$, $z=16$, пояснення та висновки.

Інструкції до роботи з програмою

Програма призначена для моделювання динамічних процесів, що відбуваються в затискних верстатних пристроях першого і другого типів при торцевому фрезеруванні. Програма дозволяє досліджувати умови затиску заготовки від режиму різання, та динамічних властивостей затискного пристрою.

Для роботи з програмою спочатку обирають тип затискного механізму за надписами, що знаходяться вгорі справа інтерфейсу: "Ручний затиск" або "Пневматичний затиск".

Після завдання вихідних даних у відповідних віконцях і вибору матеріалу інструменту і заготовки в меню, що випадає, натиснути кнопку "Застосувати дані". Після цього можна змінювати силу на ручці при ручному затиску, або площу поршня при пневматичному затиску, а також задану глибину різання.

Натиснути кнопку "Затиснути" – в графічному анімаційному вікні – відбувається затиск заготовки.

Увага! Для фрезерування в напрямку рухомої губки подача задається позитивною, а для фрезерування в напрямку нерухомої губки – негативною!

Після закінчення затиску для моделювання натиснути кнопку "Процес". Відбувається анімація процесу фрезерування з появою його характеристик на екрані віртуального осцилографа. Можна обирати наступні опції для демонстрації осцилограм: "Сила і деформація за часом" або "Товщина різання за дугою різання".

Увага! Процес анімації в графічному вікні і поява осцилограм на віртуальному осцилографі на синхронізовані за кутом обертання фрези, проте синхронізовані за подачею.

Для точного вимірювання величин у вікні "Графіки" можна збільшувати масштаб зображення: підвести мишку до верхнього правого кута обраної для збільшення ділянки, натиснути ліву клавішу і "протягнути" вниз-вліво, відпустити клавішу. Таке збільшення можна виконувати декілька разів до бажаного масштабу.

Повернення до висхідного масштабу – в будь-якому місці вікна "Графіки" натиснути ліву клавішу мишки, "протягнути" вправо-вгору і відпустити клавішу.

Процес моделювання можна призупинити – кнопка "Пауза" і відновити знову – кнопка "Процес".

Для повернення у вихідний стан – натиснути кнопку "Reset".

Запитання для самоконтролю

6. За рахунок чого заготовка залишається закріпленою в тисках з ручним затиском після затиску, тобто коли сила на ручці дорівнює нулю?
 7. Чому графік зміни сили різання при відносно малих глибинах різання (<3мм) має пилоподібний характер? Чому при збільшенні глибини різання такий характер змінюється? З якої причини?
 8. Чому розкриття стиків відбувається при меншій глибині різання для фрези з більшою кількістю зубців при незмінних інших умовах процесу?
 9. Чим відрізняються математичні моделі затискних пристроїв з механічним і пневматичним затиском? До якого типу вони відносяться? Чому?
 10. Чому сила різання при певному режимі (якому?) не співпадає з розрахунковим значенням, визначеним за відомими з теорії різання залежностями, а значно перевищує такі величини?
-

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ РОЗТОЧУВАННЯ ТОНКОСТІННИХ КІЛЕЦЬ ПРИ ЗАТИСКУ В ПАТРОНІ

Мета роботи: Оцінка точності розточування тонких кілець на токарному верстаті в залежності від затискного патрону і режиму різання.

Теоретична частина

Закріплення заготовок у вигляді тонких кілець в патроні застосовується при розточуванні, точінні, шліфуванні та інших операціях механічної обробки. Пружні деформації тонкостінних кілець (відношення товщини стінки до середнього радіусу $\leq 0,2$) при закріпленні у патронах значно знижують точність оброблення. Як показує практика [7] під дією сили затиску поперечні перетини закріпленого кільця отримують радіальні та кутові переміщення, які можуть викликати відхилення розмірів та форми, що підпадають під 1 – 4 квалітет точності.

Розроблені різні методики [7] розрахунку деформації тонкостінних кілець, закріплених у патроні, причому їх застосування залежить від конкретних умов затиску, що визначаються довжиною l_1 , l_2 ділянок кільця, які виступають за кулачки патрону (рис. 8.1):

$$l_{1,2} \leq 1,3m^{-1} \sqrt{r / [(n^2 - 1)h]}, \quad (8.1)$$

де r – середній радіус кільця, h – товщина стінки, n – кількість кулачків.

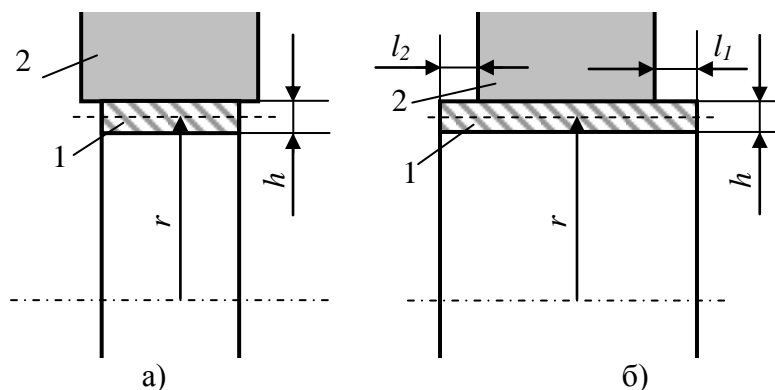


Рис. 8.1 Розташування кільця в кулачках патрону:

а) – кільце повністю перекрите кулачками, б) – кільце виступає за кулачки

Для зменшення деформації тонкостінних кілець при закріпленні в патроні рекомендується застосовувати різні технологічні прийоми та пристрої [7]. Найбільш розповсюджені є розрізні втулки (рис. 8.2,а) або широкі кулачки (рис.8.2, б). При використанні широких кулачків їх радіус R_x розточування має задовольняти умові $R_x \geq R_c$ при закріпленні заготовки за

внутрішню поверхню, і $R_e < R_c$ при закріпленні за зовнішню поверхню (R_z – радіус поверхні заготовки). Величина деформації кільця суттєво залежить від кута охоплення заготовки кулачком.

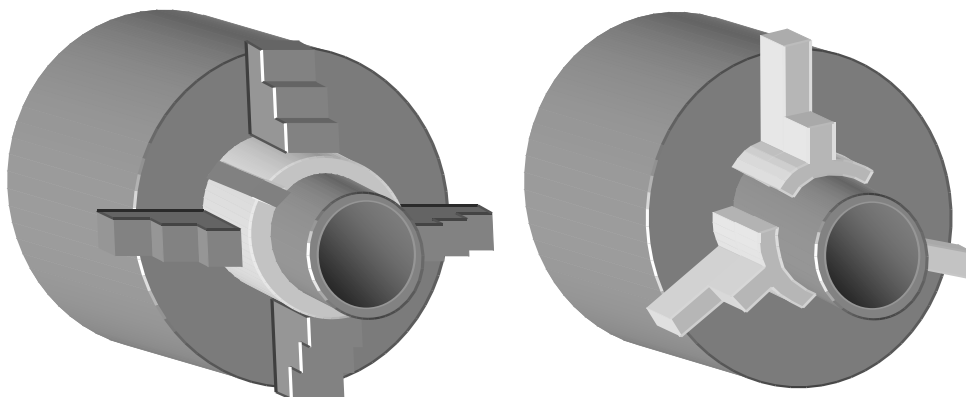


Рис. 8.2 Налаштування кулачків для зменшення деформацій тонкостінних заготовок

В загальному випадку під впливом затискного зусилля тонкостінна заготовка деформується, що суттєво впливає на точність оброблення, а саме, відхилення від круглості. Причому встановлено, що деформація значно зменшується, при інших однакових умовах, при застосуванні 6-ти кулачкових патронів замість 3-х кулачкових. Саме тому фірма Schunk пропонує для виконання таких операцій 6-ти кулачковий патрон ROTA NCR з компенсацією послаблення затискного зусилля під дією відцентрових сил (дивись рис. 4.5, лабораторна робота №4).

Проведені фірмою експерименти підтверджують ефективність запропонованих рішень. Так на рис. 8.3 представлені круглограми двох оброблених деталей зі сталі з розмірами внутрішнього діаметру 114мм і товщиною 6мм при однакових режимах різання: подача 0,15мм/об частота обертання 720 об/хв.

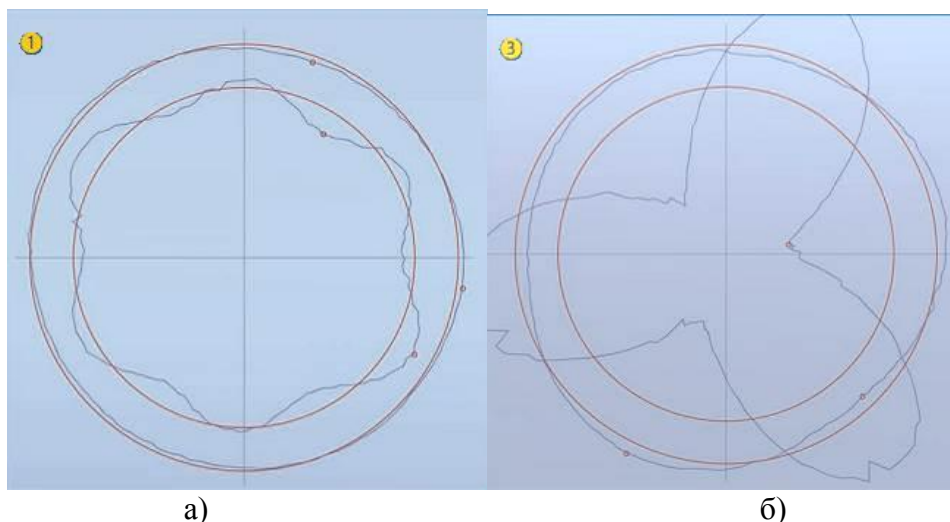


Рис. 8.3 – Круглограми оброблених деталей:
а) 6-ти кулачковий патрон ROTA NCR 165, б) стандартний патрон 165

Заготовки були попередньо прошліфовані, так, що їх відхилення від круглості складало менше 0,005мм. В обох експериментах заготовка була затиснута однаковою силою затиску.

В результаті деталь, оброблена в 6-ти кулачковому патроні мала відхилення від круглості 0,034мм, а деталь, оброблена в стандартному три кулачковому патроні – 0,365мм. Таким чином забезпечується підвищення точності оброблення не менш ніж в 10 разів.

Для вивчення закономірностей процесу розточування тонкостінних заготовок на токарному верстаті необхідно скласти його математичну модель, що ураховує як статичну деформацію заготовки під дією сили затиску, так і викликану нею нерівномірність припуску і її вплив на динамічні характеристики процесу різання у пружній ТОС. Нерівномірність припуску обов'язково буде викликати нерівномірність сили різання, яка, в свою чергу, провокує виникнення похибки форми від реакції пружної ТОС, причому збільшення швидкості різання наближає систему до виникнення резонансних явищ, що значно збільшує амплітуду вимушених коливань і похибку оброблення у порівнянні зі статичним навантаженням силою затиску [6].

Математична модель, що визначає деформацію заготовки під дією затискних зусиль в залежності від геометричних розмірів заготовки і кількості затискних кулачків патрону була розроблена проф. Корсаковим В.С. [3]. Шляхом інтегрування диференціального рівняння пружної лінії статично невизначеної конструкції, якою є кільце навантажене затискними силами від кулачків патрону, вдалося знайти залежності для розрахунку деформацій.

Для затиску в трикулачковому патроні визначені деформації кільця під дією трьох радіальних сил. В напрямку внутрішнього прогину:

$$\delta_1 = k_1 \frac{PR^3}{EJ}, \quad (8.2)$$

в напрямку зовнішнього прогину:

$$\delta_2 = k_2 \frac{PR^3}{EJ}, \quad (8.3)$$

де P – сила затиску (Н), R – радіус середньої лінії (мм), E – модуль пружності (МПа) (для сталі 200000МПа), J – момент інерції перетину кільця.

Момент інерції перетину кільця визначається за відомою залежністю, як для прямокутного перетину:

$$J = \frac{lb^3}{12}, \quad (8.4)$$

де l – довжина кільця (мм), b – товщина кільця (мм).

Аналогічні формули отримані і для визначення деформації при закріпленні заготовки в шестикулачковому патроні. Коефіцієнти в формулах (8.2) і (8.3) для трикулачкового патрона $k_1 = 0.016$, $k_2 = -0.014$ (рис.8.4,а), а для шестикулачкового патрона $k_1 = 0.0017$, $k_2 = -0.0016$ (рис.8.4, б). Знак «мінус» вказує на деформацію в бік вигину кільця. При розрахунках за формулами (8.2), (8.3) з застосуванням вказаних розмірностей величин, розмірність прогину – мм.

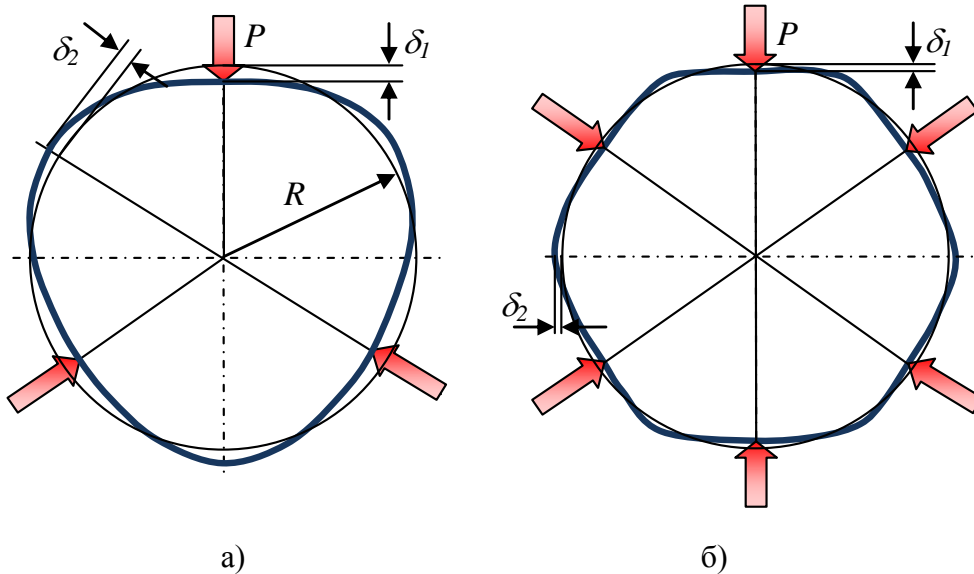


Рис. 8.4 – Деформації кільця при затиску:

а) – в трикулачковому патроні, б) – в шестикулачковому патроні

Для визначення пружної лінії деформованого кільця можна скористатися сплайном [6], який гарантовано проходить через реперні точки максимальних величин деформації, розрахованих за формулами (8.2) і (8.3).

Таким чином, при розточуванні заготовки глибина різання буде змінюватись, що провокує періодичні збурення на динамічну систему верстака (розточувальної оправки). Точність оброблення залежатиме від реакції ТОС, яка може бути визначена за її математичною моделлю. Для складання математичної моделі можна скористатися схемою за рис. 8.5, що, в першому наближенні, представляє ТОС як одномасову систему, рух якої розкладається за двома координатами.

Під дією сили різання, яка представлена двома складовими P_z і P_y розточувальний різець з оправкою масою m переміщується, змінюючи задану глибину H_3 різання:

$$H_\phi = H_3 - \delta_y + \sqrt{\delta_z^2 + R^2} - R, \quad (8.5)$$

де δ_z , δ_y – деформації пружної ТОС під дією відповідних складових сили різання, R – радіус розточування.

Рух оправки за двома координатами описується системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 \delta_y}{dt^2} + \lambda \frac{d\delta_y}{dt} + C\delta_y = P_y \\ m \frac{d^2 \delta_z}{dt^2} + \lambda \frac{d\delta_z}{dt} + C\delta_z = P_z \end{cases}, \quad (8.6)$$

де m – маса, C – жорсткість, λ – коефіцієнт в'язкого тертя ТОС.

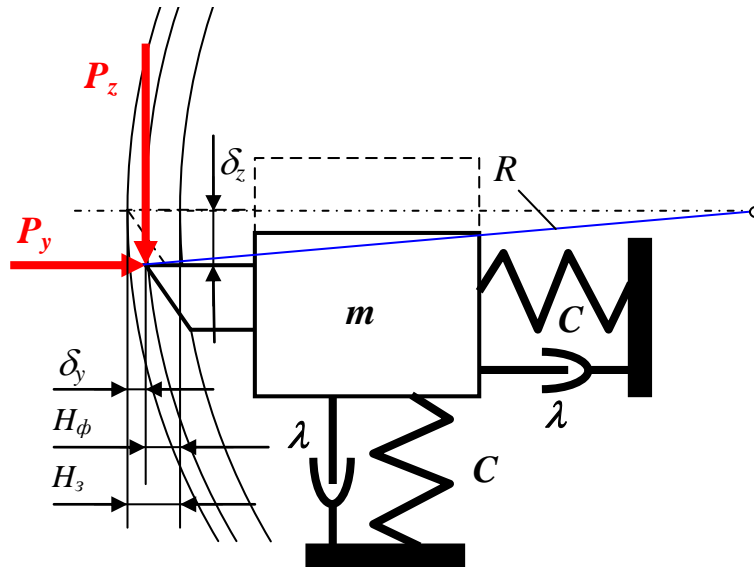


Рис. 8.5 Модель ТОС при розточуванні

Складові сили різання можуть бути визначені за відомими з теорії різання залежностями:

$$P_z = C_{Pz} H_{\phi}^{x_p} S^{y_p} V^{n_p} k, \quad (8.7)$$

де C_{Pz} , k , x_p , y_p , n_p – емпіричні коефіцієнти та показники ступеня, $P_y = 0.66P_z$.

Отримані рівняння (8.5) – (8.7) складають математичну модель процесу різання з урахуванням замкненості ТОС. При моделюванні такої системи задана глибина різання H_3 буде змінюватись у відповідності до деформації заготовки під дією сили затиску.

Необхідну силу затиску можна розрахувати за умовою рівноваги моменту різання і моменту від сили затиску з певним коефіцієнтом запасу:

$$P_3 = \frac{P_z R}{(R + B)k_{mp}} k_3, \quad (8.8)$$

де B – товщина кільця, k_{mp} – коефіцієнт тертя (звичайно 0,25), k_3 – коефіцієнт запасу.

Практична частина

Для виконання практичної частини роботи використовується прикладна програма, інтерфейс якої показаний на рис. 8.6.

Програма призначена для моделювання динамічних процесів, що відбуваються при розточуванні отворів в заготовках з тонких кілець на токарному верстаті. Заготовка затискається в патроні і деформується під дією сили затиску, що змінює глибину різання при розточуванні. Програма дозволяє досліджувати точність розточування тонких кілець, а саме, відхилення від круглості, в залежності від геометричних параметрів заготовки, режиму різання, затискного патрону, і сили затиску заготовки.

Для виконання досліджень у відповідності до заданого варіанту спочатку треба розрахувати необхідну силу затиску. Для цього за умовами експерименту розрахувати за формулою (8.7) складову P_z сили різання, а потім за формулою (8.8) необхідну силу затиску. Для виконання таких розрахунків доцільно користуватися даними таблиці 8.1, а показники ступеня в формулі (8.7) для всіх варіантів приймати однаковими: $x_p = 0.95$; $y_p = 0.75$.

Таблиця 8.1 – Дані для розрахунку складової P_z

Матеріал заготовки	C_{pz}	n_p
Сталь 50	3669	-0,1
Сталь 40Х	2623	-0,1
Сталь 25ХГГ	4466	-0,1
Сталь 30ХМА	3531	-0,1
Сталь 35ХГСА	5340	-0,1
Чавун СЧ20	1012	-0,02
Чавун ВЧ60	1070	-0,02
Чавун КЧ60-3	1023	-0,02
Сталь 12Х18Н9Т	2040	-0,02
Алюміній АМГ6	400	-0,02

Нехай необхідно визначити залежність точності розточування отвору від швидкості різання в заготовці з зовнішнім діаметром 60мм, товщиною стінки 4мм і шириною 20мм, виготовленої зі Сталі 50 при затиску в трикулачковому і шестикулачковому патроні з наступним режимом різання: глибина 0,5мм, подача 0,15 мм/об. Точність оцінюється за відхиленням від круглості, а швидкість різання змінюється з обраним кроком у певному діапазоні (до 1000 м/хв.).

Складову P_z сили різання при заданому режимі (приймаємо швидкість різання 100 м/хв.):

$$P_z = C_{Pz} H_{\phi}^{xp} S^{yp} V^{np} k = 3669 \cdot 0,5^{0,95} \cdot 0,15^{0,75} \cdot 100^{-0,1} \approx 267 \text{ Н} .$$

При цьому необхідна сила затиску при коефіцієнті запасу $k_3=2$ за формулою (8.7):

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ РОЗТОЧУВАННЯ ТОНКОСТІННИХ КІЛЕЦЬ ПРИ ЗАТИСКУ В ПАТРОНІ

$$P_3 = \frac{P_z R}{(R + B)k_{mp}} k_3 = \frac{267 \cdot 56}{60 \cdot 0,25} 2 \approx 2200 \text{ Н}.$$

Тепер можна приступити до виконання експериментів за допомогою прикладної програми, інтерфейс якої на початку процесу моделювання показаний на рис. 8.6. Динамічна система представлена у відповідних вікнах інтерфейсу наступними параметрами: маса 1 кг, жорсткість 2000 Н/мм, коефіцієнт затухання коливань 0,05. Інші дані у вікнах інтерфейсу відповідають заданим.

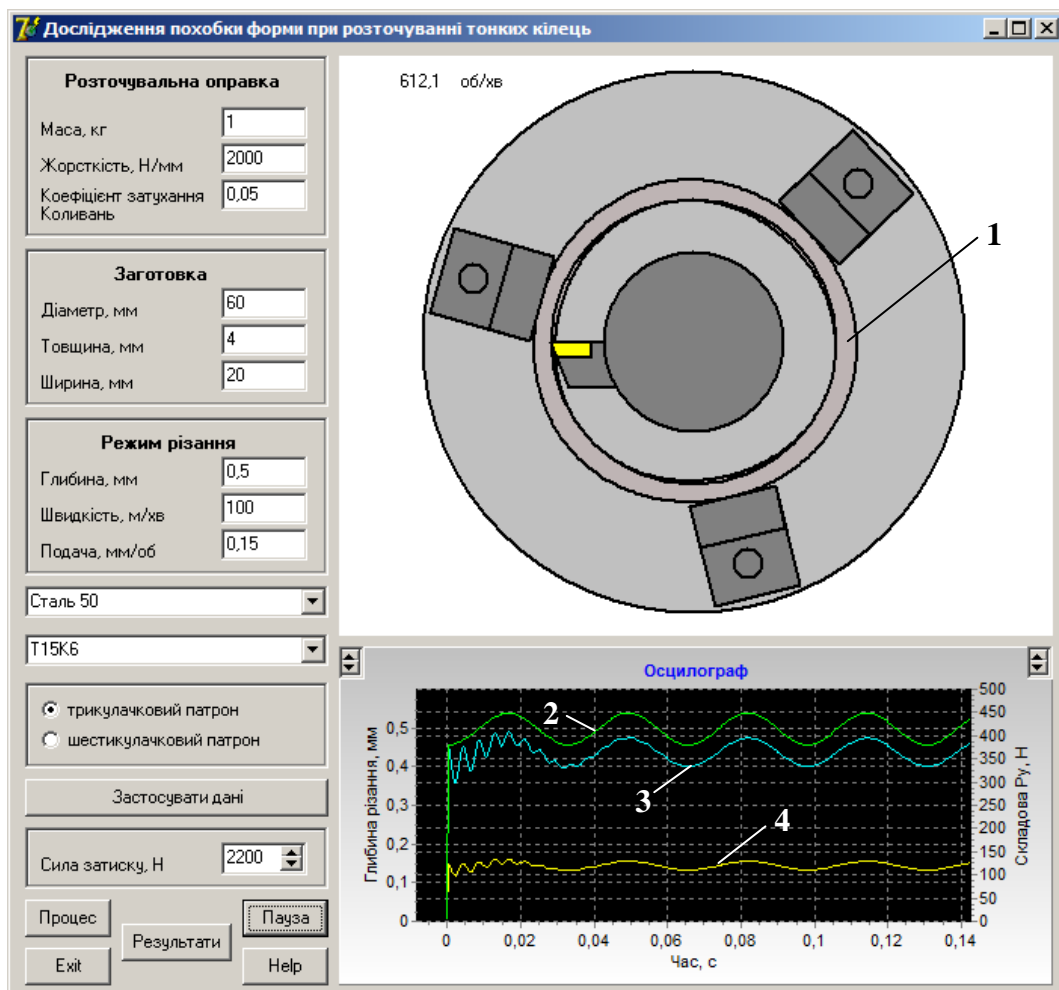


Рис. 8.6 Інтерфейс програми моделювання на початку експерименту

Першу серію експериментів провести для встановлення залежності точності розточування від швидкості різання при закріпленні заготовки в трикулачковому патроні. Для цього на інтерфейсі (рис. 8.6) ввести вихідні дані, обрати відповідну опцію «трикулачковий патрон», натиснути кнопку «Застосувати дані» і встановити розраховану раніше необхідну силу затиску. При встановленні сили затиску у графічному вікні інтерфейсу відбуваються відповідні зміни: кільце заготовки 1 деформується, приймаючи фо-

рму, подібну до зображення на рис. 8.4,а. Для наочності в графічному вікні інтерфейсу деформація заготовки значно збільшена у порівнянні з масштабом зображення.

Проведення експерименту виконується на всьому діапазоні зміни швидкості різання (не зважаючи на попередження про занадто високу швидкість різання, що з'являються на екрані) з кроком зміни 100 м/хв. Результати фіксуються у таблиці експериментальних даних (таблиця 8.2).

При натисканні кнопки «Процес» відбувається моделювання процесу розточування з відповідною анімацією зображення у графічному вікні і відображенням результатів у вікні осцилографа. Лінія 2 представляє зміну заданої глибини різання, лінія 3 – зміна фактичної глибини різання, лінія 4 – зміна складової P_y сили різання. Крім того, в лівому верхньому куті графічного вікна з'являється величина частоти обертання шпинделя, що відповідає заданій швидкості різання.

Зміна заданої глибини різання відповідає деформації заготовки під дією сил затиску, а коливання фактичної глибини різання і складової сили різання на початку процесу відбуваються в наслідок перехідного процесу пружної ТОС. Далі процес відбувається з усталеними коливаннями як збурення, так і реакції системи у вигляді фактичної глибини і сили різання.

Для оцінки точності розточування після досягнення усталеного процесу різання, коли за часом амплітуда коливань фактичної глибини і сили різання не змінюється, треба натиснути кнопку «Результати». З'являється додатковий інтерфейс (рис. 8.7), на якому у збільшеному масштабі показані круглограми форми деформованої заготовки (лінія 1), контуру заданого отвору (лінія 2 – коло), обробленого отвору (лінія 3) і вписаного в оброблений отвір кола (лінія 4) для оцінки відхилення від круглості. Слід зауважити, що на круглограмі зображується форма розточеного отвору після зняття деталі з верстата.

Крім візуалізації результатів програма автоматично визначає відхилення від круглості, яке складає 0,074мм. За допомогою візуалізації можна оцінити фазовий кут зсуву похибки форми отвору від форми деформованої заготовки. В даному експерименті він становить 60^0 , тобто технологічна спадковість форми повністю співпадає зі зміною глибини різання за кутом, а форму перетину розточеного кільця можна умовно уявити як полощу між лініями 2 і 3.

Для виконання експерименту з наступною величиною швидкості різання необхідно закрити додатковий інтерфейс, ввести у відповідне вікно на головному інтерфейсі нове значення швидкості різання, натиснути кнопку «Застосувати дані» і «Процес». Моделювання буде відбуватися вже з новою швидкістю різання. Відповідно змінюється масштаб шкали часу у віртуальному осцилографі. Дочекавшись усталеного процесу натиснути кнопку «Результати» і записати дані в таблицю 8.2. Процес повторювати на всьому діапазоні зміни швидкості різання.

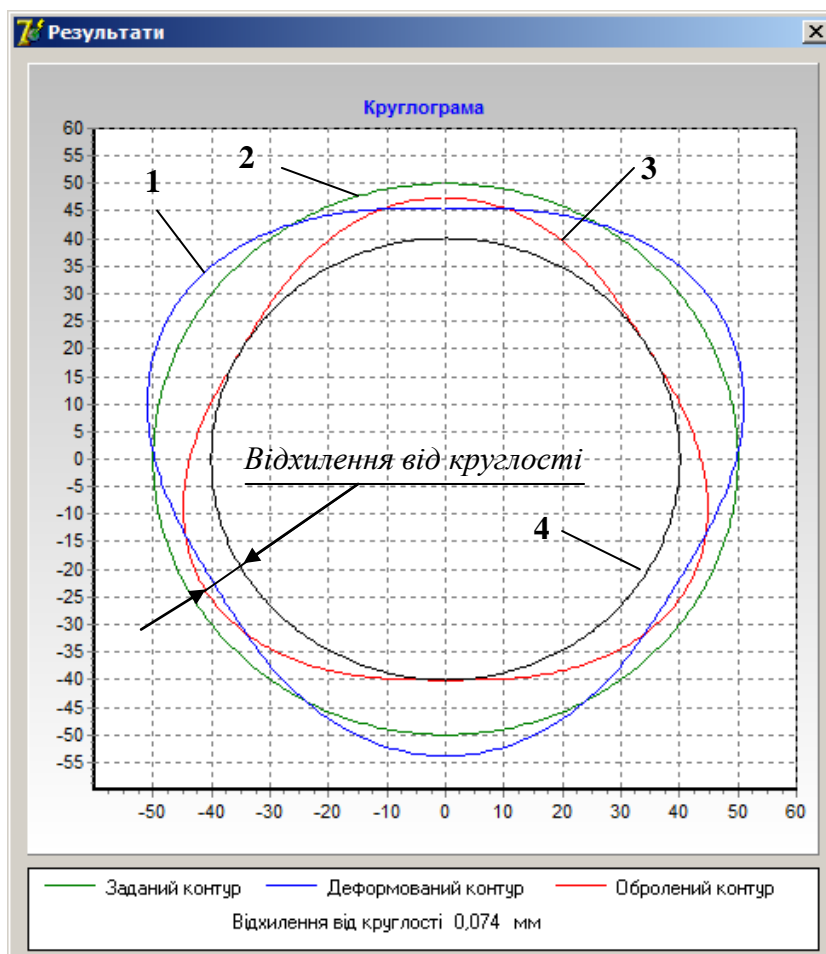


Рис. 8.7 Круглограми для оцінки точності розточування (100 м/хв.)

Таблиця 8.2 – Експериментальні дані

V, м/хв.	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
δ , мм	0,074	0,074	0,074	0,072	0,070	0,064	0,050	0,131	0,103	0,094

При виконанні експериментів можна помітити, що при незмінних вихідних даних форма отвору, що розточується, а також величина відхилення від круглості змінюється. Такий феномен пояснюється декількома причинами. По-перше, ТОС, в якій виконується оброблення, є нелінійною і замкненою, по-друге, вона є динамічною, тобто, їй притаманні всі характеристики, які відображають реакцію на періодичне збурення динамічних систем – як перехідні, так і частотні [6].

Так, при збільшенні швидкості різання до 700 м/хв. відхилення від круглості зменшується, що можна пояснити превалюючим зменшенням сили різання при збільшенні швидкості різання (дивись формулу (8.7) – для Сталі 50 $n_p < 0$) над збільшенням амплітуди при наближенні до резонансної частоти. Далі, при швидкості різання 800 м/хв. настає перевага резонансних явищ, що викликає суттєве збільшення реакції системи у вигляді наслідків – відхилення від круглості сягає 0,131мм.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ РОЗТОЧУВАННЯ ТОНКОСТІННИХ КІЛЕЦЬ ПРИ ЗАТИСКУ В ПАТРОНІ

Достатньо виконати прості наближені розрахунки, щоб переконатися у наявності наслідків резонансу в цьому випадку. Власна частота динамічної системи приблизно складає:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{m}} = \sqrt{\frac{2000000}{1}} = 1414 \text{ рад/с.}$$

Частота головної гармоніки збурення (саме головної гармоніки, бо збурення не є гармонічним, а представлено у вигляді сплайну) може бути визначена наступним чином за частотою $n_{ш}$ обертання шпинделя, що афішована у графічному вікні інтерфейсу при трикулачковому патроні ($k=3$):

$$\omega_3 = \frac{n_{ш} 2\pi}{60k} = \frac{4897 \cdot 2\pi}{60 \cdot 3} = 1538 \text{ рад/с.}$$

Таким чином, визначена власна частота динамічної системи майже співпадає з частотою збурення при швидкості різання 800 м/хв., що і викликає резонанс.

На рис. 8.8 показаний інтерфейс програми при моделюванні процесу розточування того ж самого отвору, але зі швидкістю різання 800 м/хв.

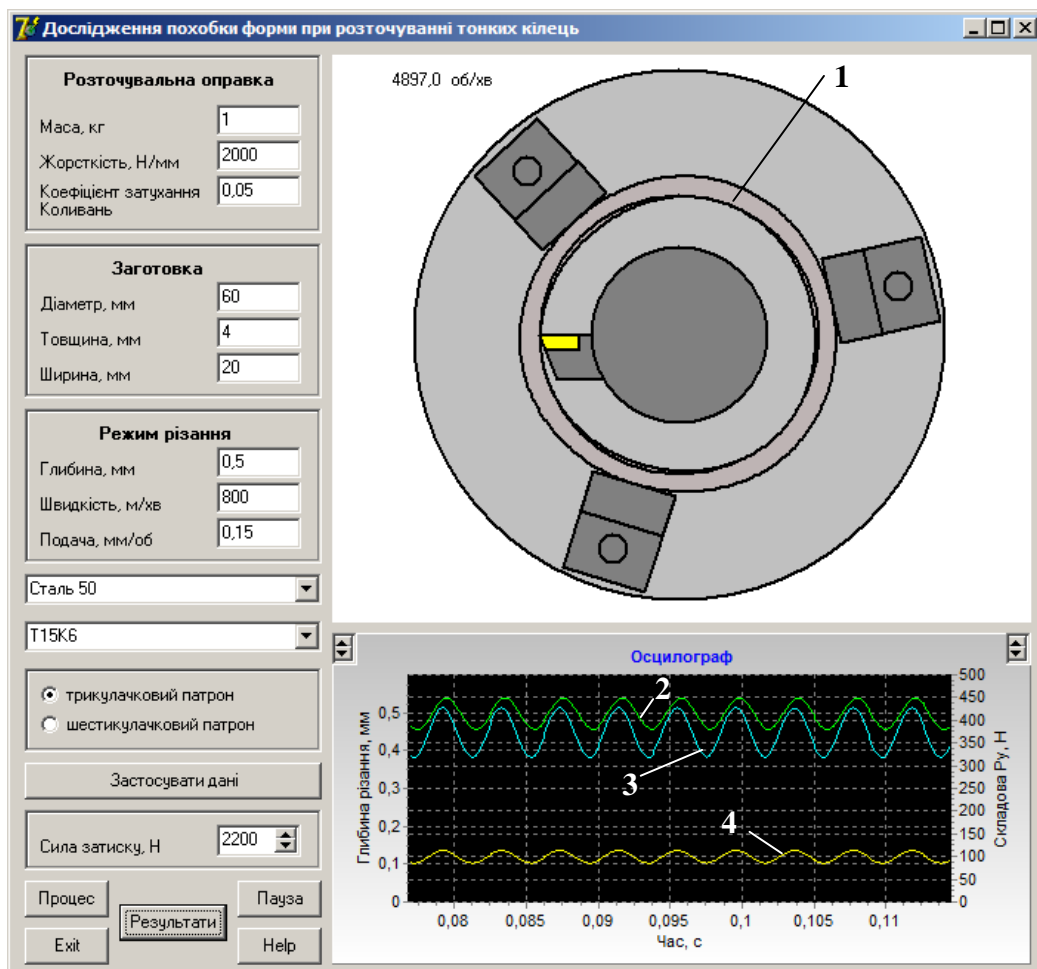


Рис. 8.8 Інтерфейс програми моделювання

Лінія 2, що показує зміну заданої глибини різання у часі має ту ж саму амплітуду, що і на рис. 8.4 при швидкості різання 100 м/хв., проте фактична глибина різання має значно більшу амплітуду і до того ж можна помітити певний фазовий зсув між цими параметрами (порівняйте рис. 8.8 і рис. 8.6).

Крім того, з порівняння осцилограм рис.8.6 і рис.8.8 можна помітити вплив швидкості різання на середню величину складової P_y сили різання. Так при швидкості різання 100 м/хв. середня величина складової сили різання 125Н, а при швидкості різання 800 м/хв. вона зменшується до 100Н.

Наслідки розточування при швидкості різання 800 м/хв. представлені на рис. 8.9, де прийняті ті ж самі позначення, що і на рис. 8.7. Відхилення від круглості значно збільшилося у порівнянні з отвором, що був розточений при швидкості різання 100 м/хв. і становить 0,131мм. Крім того, можна помітити деякий фазовий зсув між формою отвору і формою затиснутої заготовки, який вже відрізняється від того, що був при швидкості різання 100 м/хв. (порівняйте з рис. 8.7).

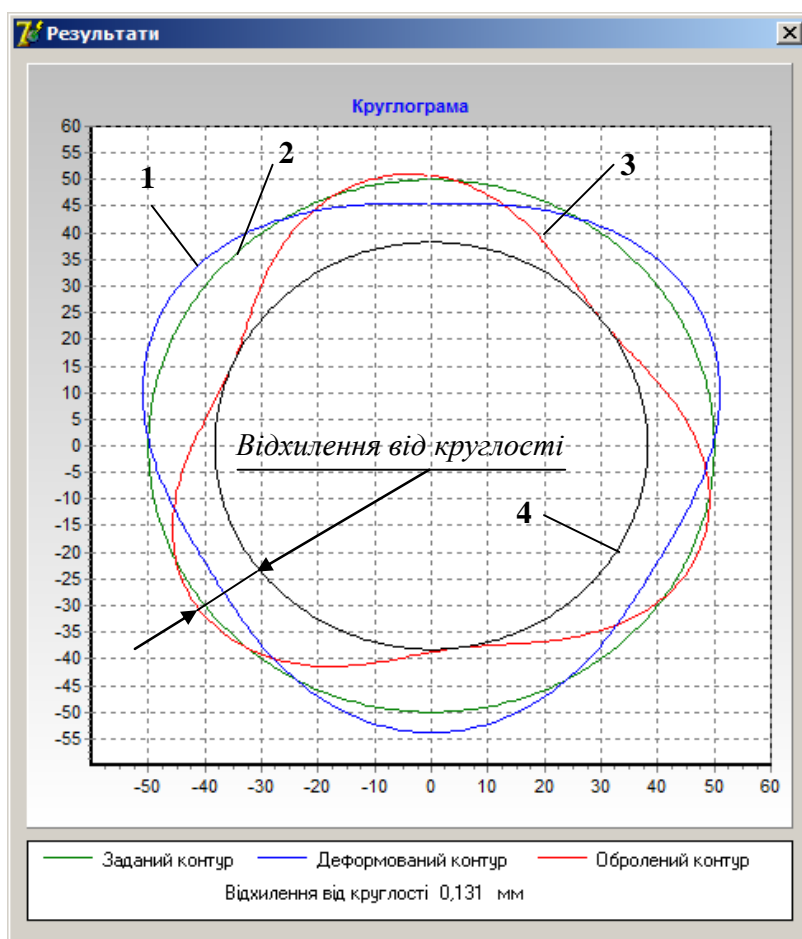


Рис. 8.9 Круглограми для оцінки точності розточування при швидкості різання 800 м/хв.

Наступна серія експериментів поводитьсь при тих самих вихідних даних, але для затиску заготовки в шестикулачковому патроні.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ РОЗТОЧУВАННЯ ТОНКОСТІННИХ КІЛЕЦЬ ПРИ ЗАТИСКУ В ПАТРОНІ

Моделювання розточування при швидкості різання 100 м/хв. (рис. 8.10) показує, що також, як і для трикулачкового патрону, на початку відбуваються коливання динамічної ТОС, які характеризують перехідний процес, проте деформація кільця 1 значно зменшилась (лінія 2). Амплітуди коливань фактичної глибини різання (лінія 3) і складової сили різання (лінія 4) також зменшились. Однак частота дії збурення у вигляді зміни припуску збільшилась у 2 рази, що цілком природно для шестикулачкового патрону (порівняйте з рис. 8.6) і звичайно це матиме свої наслідки у впливі швидкості різання на відхилення від круглості.

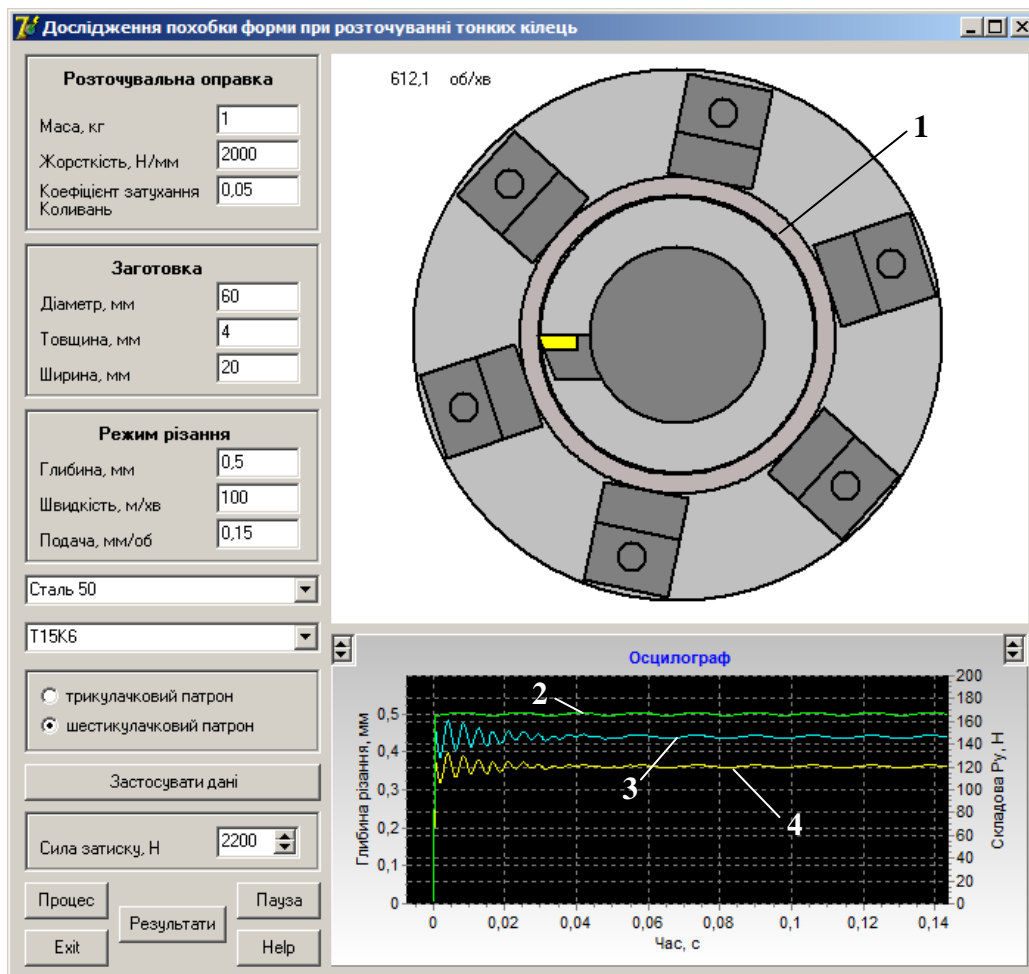
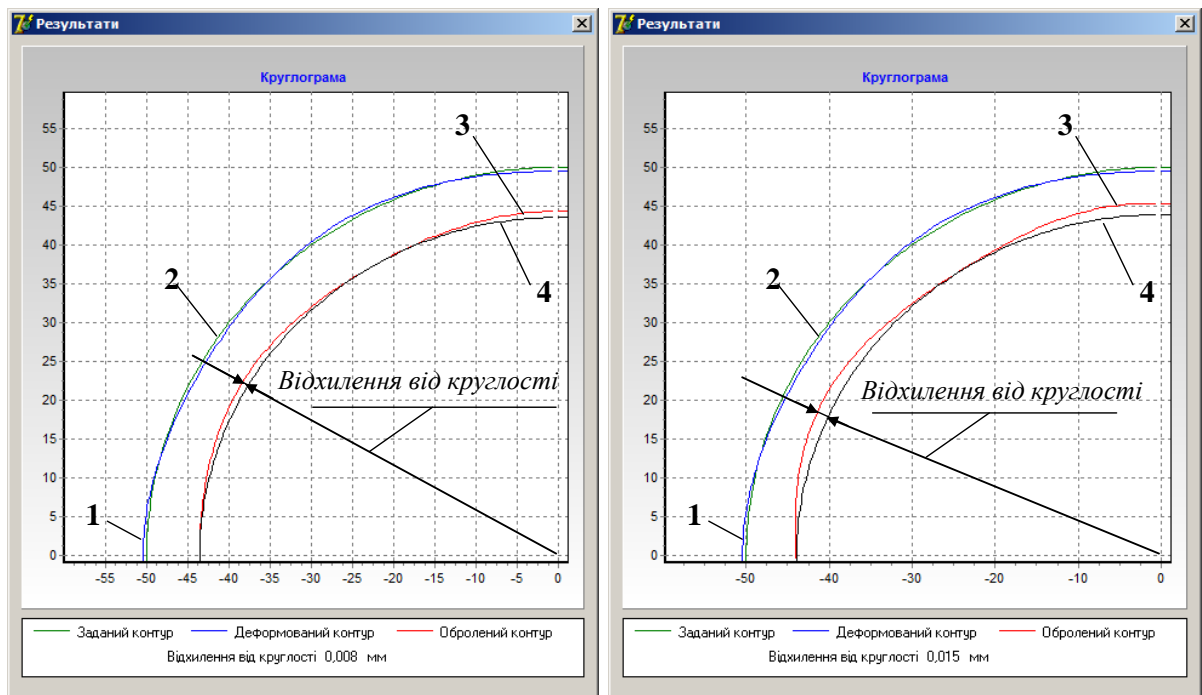


Рис. 8.10 Інтерфейс програми моделювання

Дійсно, як показує аналіз результатів (дивись рис. 8.11, де прийняті такі ж позначення ліній, як і на попередніх кругло грамах) при розточуванні у шестикулачковому патроні на швидкості різання 100 м/хв. відхилення від круглості складає 0,008мм (рис. 8.11,а), а резонанс спостерігається при швидкості різання у 2 рази меншій, ніж для розточування у трикулачковому патроні – 400 м/хв. (рис. 8.11.б). Результати експериментів представлені у таблиці 8.3. На рис. 8.11 показані чверті круглограм, що отримані за рахунок збільшення виділеної частини всього зображення (дивись інструкцію, що з'являється при натисканні кнопки Help на головному інтерфейсі).

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ РОЗТОЧУВАННЯ ТОНКОСТІННИХ КІЛЕЦЬ ПРИ ЗАТИСКУ В ПАТРОНІ



а) б)
Рис. 8.11 Круглограми отворів (збільшено)

Таблиця 8.3 – Експериментальні дані при розточуванні у шестикулачковому патроні

V, м/хв.	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
δ , мм	0,008	0,008	0,007	0,015	0,011	0,010	0,010	0,009	0,009	0,009

За експериментальними даними побудовані графіки залежності відхилення від круглості розточених отворів при затиску заготовки у формі кільця в трикулачковому і шестикулачковому патронах (рис. 8.12).

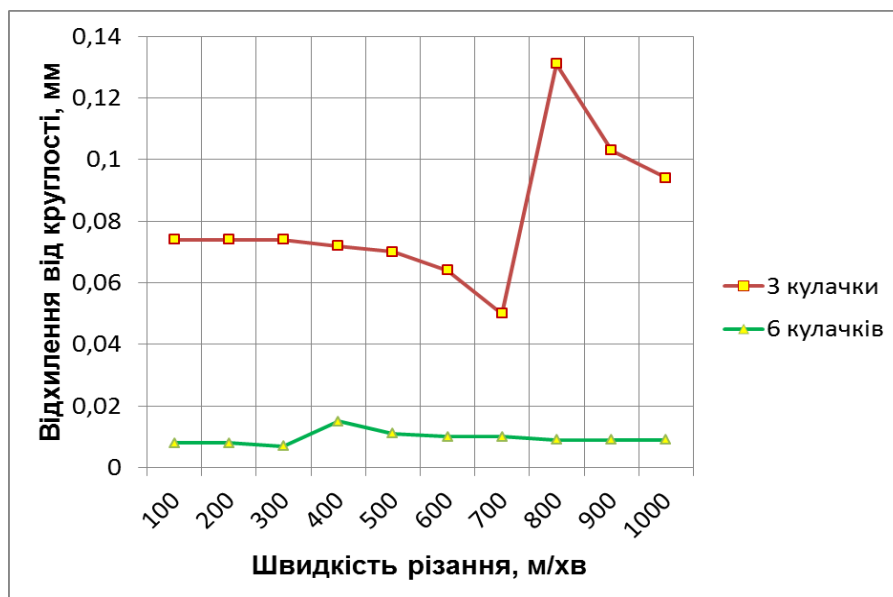


Рис. 8.12 Графіки залежності відхилення від круглості від швидкості різання

Висновки

1. Результати моделювання розточування отворів в тонкостінних кільцях збігаються з експериментальними даними, що отримані фірмою Schunk, що підтверджує адекватність створеного програмного забезпечення (порівняйте круглограми рис. 8.1 і круглограми, що отримані в результаті моделювання).
2. Відхилення від круглості розточених отворів у тонкостінних заготовках переважно викликано їх деформацією під силою затиску, що обумовлює періодичну зміну заданої глибини різання при розточуванні на токарному верстаті.
3. Відхилення від круглості отворів, що розточені при закріпленні заготовки у шестикулачковому патроні майже в 9 разів менше, ніж при закріпленні у трикулачковому патроні при однакових режимах різання і однакових параметрах ТОС.
4. Відхиленні від круглості розточених отворів суттєво залежить від швидкості різання, величина якої через геометричні параметри заготовки трансформується у частоту обертання шпинделя і частоту зміни збурення на ТОС. Як для затиску у трикулачковому, так і шестикулачковому патронах спостерігається збільшення відхилення від круглості майже в 2 рази при швидкостях різання, що провокують частоту зміни збурення у вигляді припуску, яка співпадає з власною частотою динамічної ТОС.
5. Характер зміни відхилення від круглості в залежності від швидкості різання обумовлюється двома причинами: впливом швидкості різання на силу різання і наявністю резонансу при періодичному збуренні, але в цілому підпорядковується вигляду амплітудно-частотної характеристики динамічної ТОС.

Завдання

1. За вихідними даними у відповідності до варіанту (таблиця 8.4) провести експерименти з визначення залежності відхилення від круглості від швидкості різання для заданих параметрів технологічної обробляючої системи (ТОС) при затиску заготовки у трикулачковому і шестикулачковому патронах. Програма «Кільце» знаходиться на диску в кінці книги.

2. Перед проведенням експериментів для заданих вихідних даних розрахувати необхідну силу затиску (формули (8.6), (8.7) і таблиця 8.1), а також приблизну величину власної частоти коливань динамічної ТОС. Визначити діапазон та крок зміни швидкості різання в експериментах, ураховуючи величину власної частоти ТОС і підготувати таблиці для експериментальних даних.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ РОЗТОЧУВАННЯ ТОНКОСТІННИХ КІЛЕЦЬ ПРИ ЗАТИСКУ В ПАТРОНІ

3. Експерименти проводити на всьому діапазоні зміни швидкості різання з фіксацією копій екранів для максимального відхилення від круглості (головний інтерфейс та круглогами) як при моделюванні розточування у трикулачковому так і у шестикулачковому патронах.

4. Записати результати експериментів у таблицю і побудувати графіки залежності відхилень від круглості від швидкості різання при затиску у трикулачковому і у шестикулачковому патронах.

Таблиця 8.4 – Вихідні дані

Перша цифра	Параметри ТОС			Заготовка		
	Маса, кг	Жорсткість, Н/мм	Коефіцієнт затухання колив.	Діаметр, мм	Товщина, мм	Ширина, мм
0	0,9	1600	0,05	45	3,2	12
1	1,2	1800	0,06	50	3,6	16
2	1,6	2000	0,07	55	3,8	18
3	1,8	2200	0,08	60	4,0	20
4	2,0	2800	0,10	65	4,2	10
5	1,1	1500	0,05	44	3,0	14
6	1,3	1700	0,09	50	3,5	15
7	1,5	1900	0,12	56	4,0	22
8	1,9	2600	0,13	60	4,2	18
9	2,2	3000	0,05	64	3,8	20

Таблиця 8.5 – Вихідні дані

Друга цифра	Матеріал заготовки	Матеріал інструменту	Режим різання	
			Глибина, мм	Подача, мм/об
0	Чавун СЧ20	ВК8	1,0	0,15
1	Чавун ВЧ60	ВК6	1,2	0,12
2	Сталь 35ХГСА	Т15К6	0,8	0,14
3	Сталь 50	Т14К8	0,7	0,16
4	Сталь 25ХГТ	Т15К6	0,9	0,10
5	Чавун КЧ60-3	ВК8	1,6	0,13
6	Алюміній АМГ6	Р6М5	2,3	0,10
7	Сталь 30ХМА	Т14К8	1,5	0,12
8	Сталь 40Х	Т14К8	1,1	0,20
9	Сталь 12Х18Н9Т	Т15К6	0,7	0,12

Зміст протоколу

У протоколі навести: завдання, розрахунки необхідної сили затиску, власної частоти коливаний динамічної ТОС, копії головних інтерфейсів та круглограм для максимального відхилення від круглості при затиску заготовки у трикулачковому і у шестикулачковому патронах, таблиці експериментальних даних, графіки залежності відхилень від круглості від швидкості різання при затиску у трикулачковому і у шестикулачковому патронах, висновки.

Інструкції до роботи з програмою

Програма призначена для моделювання впливу швидкості різання на похибку форми при розточуванні тонких кілець, що закріплені в патроні токарного верстата.

Для роботи з програмою у вікнах інтерфейсу задати вихідні дані для моделювання, вибрати (з меню, що випадає) матеріал заготовки та інструменту, потім вибрати патрон (з трьома або шістьма кулачками) і натиснути кнопку "Застосувати дані". З'являється вікно "Сила затиску", в якому треба встановити розраховану раніше величину сили. При цьому у графічному вікні відбувається деформація заготовки, для наочності збільшена в декілька разів, у лівому нижньому куті - розрахункові величини деформації, а у правому верхньому куті - частота обертання шпинделя.

Для виконання моделювання натиснути кнопку "Процес". У графічному вікні відбувається анімація розточування заготовки, а у вікні віртуального осцилографа - осцилограми характеристик системи за часом. Зелена лінія - задана глибина різання, синя лінія - фактична глибина різання, жовта лінія - складова P_y сили різання. Для призупинення процесу - кнопка "Пауза", для відновлення - кнопка "Процес".

Після виконання 2-3-х обертів заготовки можна натиснути кнопку "Результати". З'являється додатковий інтерфейс, на якому зображені круглограми.

Для точного вимірювання величин у вікні осцилографа і у вікні круглограм можна збільшувати масштаб зображення: підвести мишку до верхнього правого кута обраної для збільшення ділянки, натиснути ліву клавішу и "протягнути" донизу-вліво, відпустити клавішу. Таке збільшення можна виконувати декілька разів до бажаного масштабу.

Повернення до вихідного масштабу - у будь-якому місці вікна осцилографі чи круглограм натиснути ліву клавішу мишки, "протягнути" вправо-вгору і відпустити клавішу.

Для виконання наступного експерименту (з іншою величиною швидкості різання) необхідно ввести бажану величину у вікно, натиснути кнопку "Застосувати дані" і активувати поле значення сили затиску. Для цього достатньо натиснути стрілку поряд з вікном, а потім повернутися до встановленої раніше величини.

УВАГА! Активація цього вікна необхідна після будь-якої зміни у вихідних даних програми!

Запитання для самоконтролю

1. Чому задана глибина різання при розточуванні тонкостінного кільця, що затиснуте в патроні має періодичний характер зміни?

2. Чим відрізняється зміна припуску під розточування для затиску у трикулачковому і шестикулачковому патронах? Чому?
 3. Чим пояснюється отриманий в результаті моделювання характер залежності відхилення від круглості від швидкості різання?
 4. Чому середня величина фактичної глибини різання завжди менша за середню величину заданої глибини різання? Поясніть, використовуючи математичну модель процесу різання у замкненій ТОС.
-
-

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОХИБКИ ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАГОТОВКИ У ПРИСТРОЇ ВІД СИЛИ ЗАТИСКУ

Мета роботи: Визначення залежності складової похибки встановлення заготовки від місця прикладання та величини сили затиску при базуванні заготовки у верстатному пристрої.

Теоретична частина

Похибка встановлення заготовки у верстатному пристрої складається з похибок базування, закріплення і похибки від неточності самого пристрою.

Похибка закріплення визначається для партії деталей [3], виходячи з розсіювання за нормальним законом величини сили затиску и розраховується як різниця найбільшої і найменшої проекції зсуву вимірювальної бази на напрямок розміру, що виконується. Зсув вимірювальної бази відбувається в результаті деформації елементів пристрою під дією сили затиску. За всім балансом зсуву найбільшу частку складають деформації у стиках заготовка – установчі елементи. Залежність контактних деформацій у для стиків заготовка – опори пристрою має нелінійний характер:

$$y = KQ^n, \quad (9.1)$$

де K – коефіцієнт, що характеризує вид контакту, матеріал, шорсткість поверхні заготовки, Q – сила, що діє на опору, n – показник ступеня.

При зміні величини сили затиску відбувається зміна контактної деформації у стиків опора – заготовка за нелінійним законом (рис.9.1).

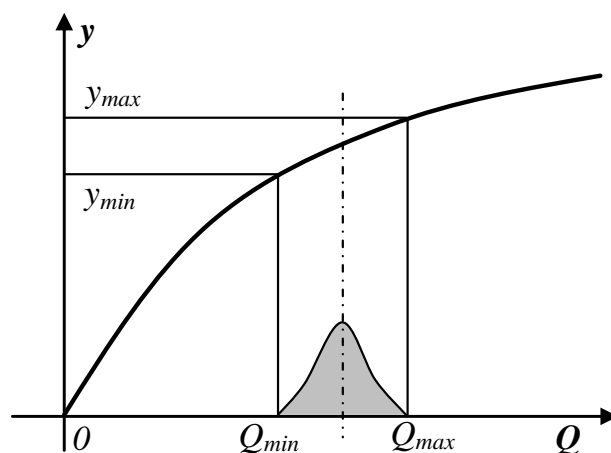


Рис. 9.1 Графік для визначення похибки закріплення

Отже похибка від закріплення заготовки у пристрої зазвичай визначається за формулою:

$$\varepsilon_z = (y_{\max} - y_{\min}) \cos \alpha, \quad (9.2)$$

де y_{\max} , y_{\min} – найбільший і найменший зсув вимірювальної бази, α – кут між напрямком розміру, що виконується і напрямком зсуву вимірювальної бази.

При використанні пневматичних, гідравлічних затискних пристроїв спостерігається незначне коливання величини сили затиску. Для затискних пристроїв з ручним затиском величина сили затиску за партією деталей може змінюватись в 1,5-1,6 разів.

Похибка закріплення по-різному впливає на розміри, що виконуються на операції. Так, для заготовки, схема встановлення якої у пристрої показана на рис. 9.2, похибка закріплення (за формулою (9.2)) для розмірів A і B не дорівнює нулю, оскільки для цих розмірів $\alpha = 0$, а для розміру C вона буде відсутня ($\alpha = 90^\circ$).

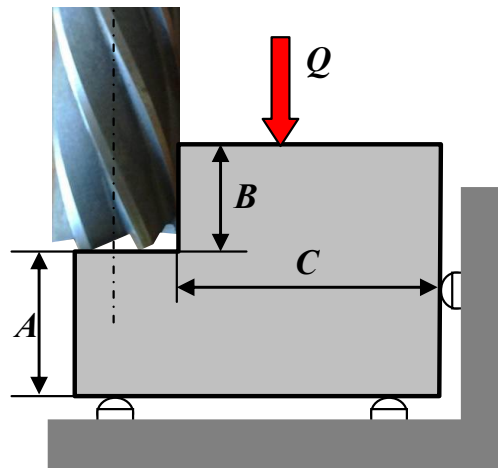


Рис. 9.2 Схема для визначення похибки закріплення

На механічних операціях оброблення різанням використовують верстатні пристрої з різними видами опор. При встановленні заготовок на необроблені базові поверхні використовують опори з сферичною або рифленою голівкою (рис. 9.3,а, б), вже оброблені базові поверхні заготовок встановлюють на опори з плоскою опорною поверхнею (рис. 9.3,в).

При конструюванні верстатних пристроїв рекомендуються наступні максимальні навантаження на опори зі сферичною поверхнею [3]:

D , мм.....	10	16	25	40
Q , кН.....	4	5	12	30

Такі дані відносяться до заготовок зі сталі і чавуна. Для заготовок з кольорових сплавів навантаження слід зменшувати на 30-40%. Для опор з рифленою поверхнею рекомендуються наступні максимальні навантаження:

D , мм.....	10	16	25	40
Q , кН.....	4	10	25	60

Для опор з плоскою поверхнею допустиме навантаження 5 МПа.

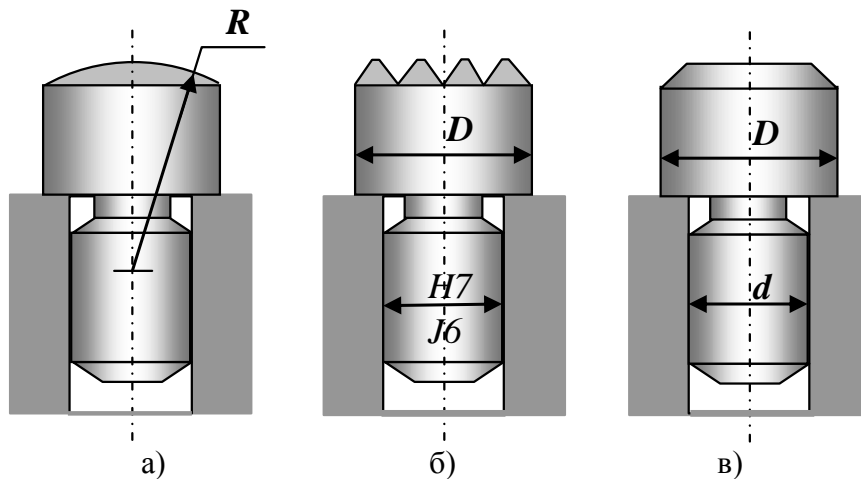


Рис. 9.3 Опори для встановлення заготовок на плоскі поверхні:
а) – сферичні, б) – рифлені, в) – плоскі

Для визначення похибки закріплення заготовки необхідно встановити залежність між силою та контактною деформацією при застосуванні опор різного виду. Аналітичне вирішення контактної задачі викликає значні труднощі, оскільки на контактуючих поверхнях заготовки присутні макро- і мікронерівності, що обумовлює випадковий характер взаємодії з поверхнями опор. Крім того, наявність на поверхнях заготовок зміненого поверхневого шару (особливо литих заготовок), механічні властивості якого суттєво відрізняються від механічних властивостей тіла заготовки, утворює специфічні умови контакту.

Тому для розрахунку контактних деформацій рекомендується користуватися емпіричними залежностями, які у дещо скорегованому вигляді (в порівнянні з даними [3]) представлені в таблиці 9.1.

Таблиця 9.1 – Емпіричні залежності контактної деформації від сили

Вид опори	Матеріал заготовки	Деформація (мкм)
Сферична (рис.9.1,а)	Сталь	$(0,67 - 0,003HB + 6,23/R)(Q/10)^{0,8}$
	Чавун	$(2,7 - 0,008HB + 9,23/R)(Q/10)^{0,6}$
Рифлена (рис.9.1,б)	Сталь	$(2,38 - 0,004HB - 0,0034D)(Q/10)^{0,6}$
	Чавун	$(2,76 - 0,0008HB - 0,03D)(Q/10)^{0,6}$
Плоска (рис.9.1,в)	Сталь	$(0,4 + 0,00012F + 0,004Rz - 0,0016HB)(Q/10)^{0,7}$
	Чавун	$(0,776 + 0,0053F + 0,016Rz - 0,0045HB)(Q/10)^{0,6}$

У формулах таблиці 9.1 використовуються наступні розмірності параметрів: R – радіус сферичної поверхні опори, мм, D – діаметр рифленої

опори, мм, Q – сила, Н, F – площа плоскої поверхні опори, мм², R_z – параметр шорсткості поверхні заготовки, мкм.

При встановленні жорсткої заготовки на опори верстатного пристрою її положення залежить від місця прикладання сили затиску, що провокує перекус заготовки і нерівномірну похибку закріплення за довжиною заготовки (рис. 9.4).

Зі схеми рис. 9.4 можна визначити реакції опор:

$$\begin{cases} R_1 = Q(l - x)/l \\ R_{2,3} = Qx/(2l) \end{cases} \quad (9.3)$$

де R_1, R_2, R_3 – реакції відповідних опор, Q – сила затиску, l – відстань між опорами, x – відстань від точки прикладання сили затиску до лівої опори.

Кут γ перекосу розраховується за формулою:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{y_1 - y_2}{l}\right), \quad (9.4)$$

де y_1, y_2 – деформації в опорах 1 і 2 за рис. 9.4, що визначаються за формулами таблиці 9.1.

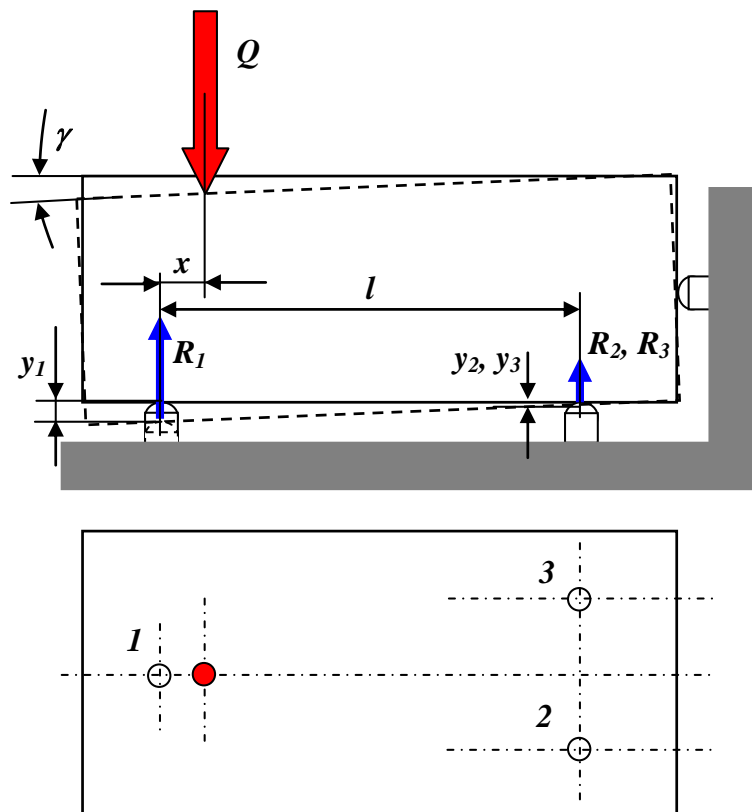


Рис. 9.4 Схема визначення перекосу заготовки

Отже, при прикладанні затискного зусилля в довільному місці заготовки обов'язково виникає нерівномірність контактних деформацій в опорах верстатного пристрою, в результаті чого опорна площа повертається

на деякий кут до її первинного положення, що може викликати похибки розташування поверхонь, які обробляються. Таким чином, при проектуванні верстатних пристроїв важливо не тільки правильно визначати величину затискного зусилля, а й місце його прикладання до заготовки.

Практична частина

Для виконання практичної частини роботи використовується прикладна програма, інтерфейс якої показаний на рис. 9.5.

Програма призначена для визначення залежності похибки закріплення заготовки від сили затиску та місця її прикладання. Програма передбачає можливість виконання дослідження для трьох видів опор: зі сферичною, рифленою або плоскою поверхнею. Інструкції та пояснення для роботи з програмою з'являються на додатковому інтерфейсі при натисканні кнопки "Help".

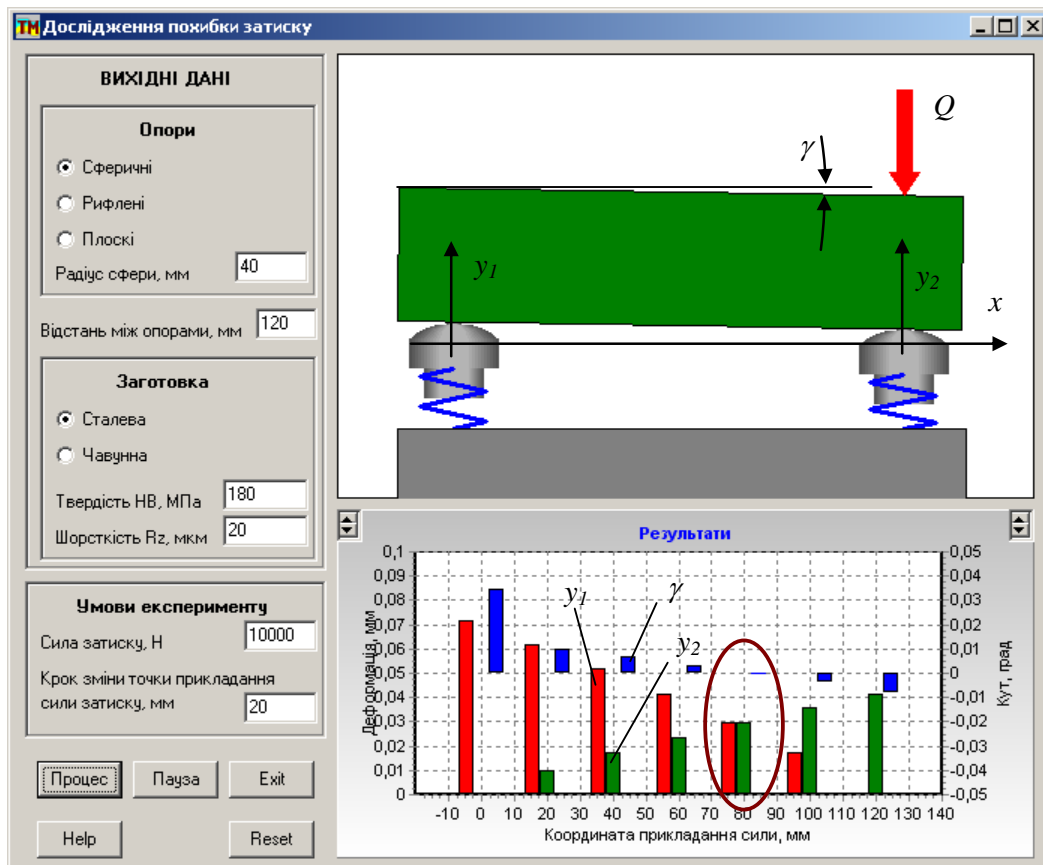


Рис. 9.5 Головний інтерфейс програми

У відповідності до мети роботи, експерименти здійснюються у два етапи. Спочатку визначається залежність похибки затиску від місця прикладання сили затиску. У вікно інтерфейсу вносять кількісні дані за варіантом, обирають вид опори, матеріал заготовки і натискають кнопку «Процес». У графічному вікні відбувається переміщення вектора сили затиску з визначеним кроком, положення заготовки змінюється у збільшено-

му масштабі, а у вікні «Результати» відображаються величини деформації лівої опори (y_1), правих опор (y_2) і кута γ перекосу для кожного положення точки прикладання сили затиску.

При переміщенні точки прикладання сили затиску заготовка змінює своє положення, контактні деформації, що відбуваються в реальному верстатному пристрої умовно представлені як деформації пружин під опорами. Крок зміни точки прикладання сили затиску слід обирати так, щоб, у відповідності до (9.3), було положення при якому деформації лівої і правих опор стають однаковими. Ясно, що таке положення відповідає умові $x = 2l/3$, кут нахилу при цьому дорівнює нулю. На рис. 9.5 таке положення відповідає координаті $x=80\text{мм}$ (обведено еліпсом на рис. 9.5).

За результатами експерименту (при збільшенні відповідних стовпчиків у вікні «Результати» заповнена таблиця 9.2 і побудовані графіки на рис. 9.6.

Таблиця 9.2 – Експериментальні дані

№	Координата x , мм	Деформація y_1 , мм	Деформація y_2 , мм	Кут нахилу γ , град
1	0	0,0718	0	+0,0342
2	20	0,0620	0,0099	+0,0100
3	40	0,0519	0,0171	+0,0067
4	60	0,0412	0,0237	+0,0033
6	80	0,0298	0,0298	0
7	100	0,0171	0,0356	-0,0035
8	120	0	0,0412	-0,0078

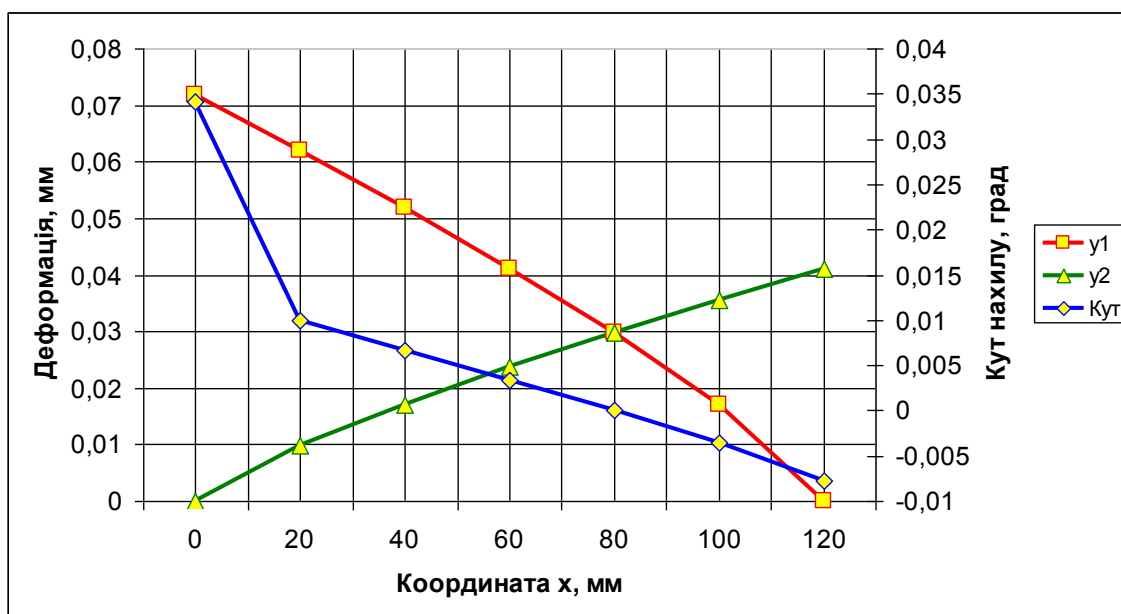


Рис. 9.6 Графіки залежності деформацій опор і кута нахилу від координати прикладання сили затиску

На другому етапі проведення експериментів необхідно визначити похибку затиску при прикладанні сили затиску в точці, що відповідає визначеній величині координати x , яка забезпечує відсутність перекосу заготовки, від сили затиску для різного типу опор. Вид опор обирати у верхньому віконці інтерфейсу «Вихідні дані», а силу затиску змінювати у діапазоні 1000 – 10000 Н з кроком 1000 Н. Для кожного значення сили затиску проводять експеримент і дані, що відповідають умові відсутності перекосу, записують у таблицю 9.3. За експериментальними даними побудовані графіки (рис. 9.7), за якими можна визначати розсіювання похибки затиску при зміні сили затиску.

Таблиця 9.3 – Експериментальні дані

№	Сила, Н	Деформація, мм		
		Сферичні	Рифлені	Плоскі
1	1000	0,0047	0,0128	0,0017
2	2000	0,0082	0,0193	0,0027
3	3000	0,0114	0,0247	0,0035
4	4000	0,0143	0,0293	0,0044
5	5000	0,0171	0,0336	0,0051
6	6000	0,0198	0,0375	0,0058
7	7000	0,0224	0,0410	0,0065
8	8000	0,0249	0,0445	0,0071
9	9000	0,0274	0,0478	0,0077
10	10000	0,0298	0,0508	0,0083

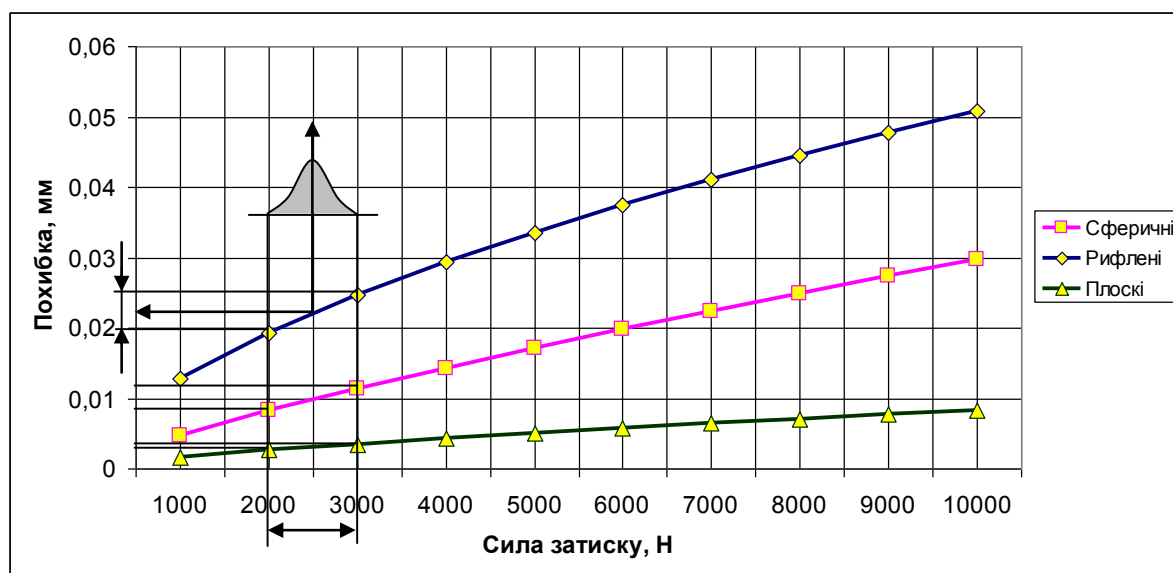


Рис. 9.7 Графіки залежності похибки затиску

Висновки

1. При зміні точки прикладання сили затиску деформації лівої і правих опор змінюються, що провокує виникнення кута нахилу заготовки, який змінюється від позитивного до негативного по відношенню до гори-

зонту. Визначено точку прикладання сили затиску $x = 2l/3 = 80\text{мм}$, яка забезпечує відсутність перекосу заготовки.

2. Зміна похибки затиску для різних видів опор від сили затиску має нелінійний характер. За отриманими експериментальними результатами можна визначити математичне очікування і дисперсію при випадковій зміні сили затиску. Так, при ручному затиску з розрахунковою силою затиску 2500 Н, фактична сила затиску може коливатися в діапазоні 2000 – 3000 Н, що викликає зміну похибки затиску для сферичних опор в діапазоні 0,0082 – 0,0114 мм. Таким чином, при проектуванні технологічної операції необхідно ураховувати похибку затиску ε_z з математичним очікуванням $M=0,0098\text{мм}$ і дисперсією $\sigma = 0,00053\text{мм}$.

3. Найменший вплив величини сили затиску на похибку затиску при інших рівних умовах спостерігається при використанні опор з плоскими поверхнями. Проте за існуючими рекомендаціями їх можна використовувати при базуванні вже обробленою базовою поверхнею заготовки.

Завдання

1. За вихідними даними у відповідності до варіанту (таблиця 9.4) провести експерименти з визначення залежності похибки затиску і кута перекосу від точки прикладання сили затиску. Програма «Похибка_затиску» знаходиться на диску в кінці книги.

2. Провести експерименти з визначення залежності похибки затиску (при прикладанні сили затиску в точці, що відповідає координаті x , яка забезпечує відсутність перекосу заготовки) від сили затиску для різного типу опор.

Таблиця 9.4 – Вихідні дані

Перша цифра	Опора			Відстань, мм	Друга цифра	Заготовка		Твердість, НВ	Шорсткість, Rz, мкм
	Сферична, R, мм	Рифлена, D, мм	Плоска, F, мм ²			Сталь	Чавун		
0	10	40	1256	120	0	+	-	200	10
1	16	25	490	90	1	-	+	220	20
2	25	16	201	360	2	+	-	180	30
3	40	10	78	330	3	-	+		40
4	40	10	78	180	4	+	-		10
5	25	16	201	240	5	-	+		20
6	16	25	490	210	6	+	-		30
7	10	40	1256	150	7	-	+		40
8	16	40	201	300	8	+	-		30
9	25	25	490	360	9	-	+		20

Зміст протоколу

У протоколі навести: завдання, копії інтерфейсів прикладної програми при проведенні експериментів, таблиці експериментальних даних, гра-

фіки залежності деформацій опор і кута нахилу від координати прикладання сили затиску, графіки залежності похибки затиску від сили затиску для різного виду опор, висновки.

Інструкції до роботи з програмою

Програма призначена для дослідження похибки закріплення заготовки у верстатному пристрої від величини в місця прикладання зусилля затиску.

Для роботи з програмою в полі "ВИХІДНІ ДАНІ" вибрати тип опори і задати інші параметри. Задати умови експерименту і натиснути кнопку "Процес".

В графічному вікні відбувається переміщення сили затиску в заданому діапазоні з заданим кроком, а заготовка змінює своє положення у відповідності до деформацій опор (для наочності – збільшено). У вікні "Результати" у функції координати прикладання сили з'являються: червоний стовпчик – деформація правих опор, зелений стовпчик – деформація лівої опори, синій стовпчик – кут перекосу.

Кнопки в полі віртуального осцилографа дозволяють змінювати масштаб за відповідними осями.

Для точного вимірювання величин у вікні "Результати" можна збільшувати масштаб зображення: підвести мишку до верхнього правого кута обраної для збільшення ділянки, натиснути ліву клавішу і "протягнути" вниз-вліво, відпустити клавішу. Таке збільшення можна виконувати декілька разів до бажаного масштабу.

Повернення до вихідного масштабу – у будь-якому місці вікна "Результати" натиснути ліву клавішу мишки, "протягнути" вправо-вгору і відпустити клавішу.

Для виконання наступного експерименту натиснути кнопку "Reset", змінити вихідні дані і знову натиснути кнопку "Процес".

Запитання для самоконтролю

1. Чому відбувається зсув вимірювальної бази при затиску заготовки у верстатному пристрої?
 2. Яким чином визначається необхідна координата точки прикладання сили затиску? Чому?
 3. На які розміри, що виконуються на операції похибка закріплення впливає на які не впливає? Поясніть на прикладі.
 4. За якими даними необхідно ураховувати похибку закріплення для партії деталей з ручним затиском при визначенні розмірного ланцюга забезпечення заданої точності оброблення?
-
-

ПРОЕКТУВАННЯ САМОЦЕНТРУЮЧОГО ЛЮНЕТУ

Мета роботи: *Визначення оптимальних конструктивних параметрів самоцентруючого люнету.*

Теоретична частина

Якщо довжина деталі у 10...12 разів більша за її діаметр, то для її оброблення застосовують люнети. Люнет є верстатним пристроєм, що забезпечує додаткову опору заготовок, які обертаються при обробленні і усуває прогин під дією сили різання, або власної ваги заготовки, підвищує вібросталість всієї ТОС. Люнети найчастіше застосовують при обробці довгих маложорстких валів на токарних, круглошліфувальних, різбошліфувальних, щліцефрезерних верстатах тощо. Люнети за способом встановлення на верстаті розділяються на нерухомі (закріплюються на напрямних верстата) і рухомі (встановлюються на супорті, каретці і переміщується разом з ними).

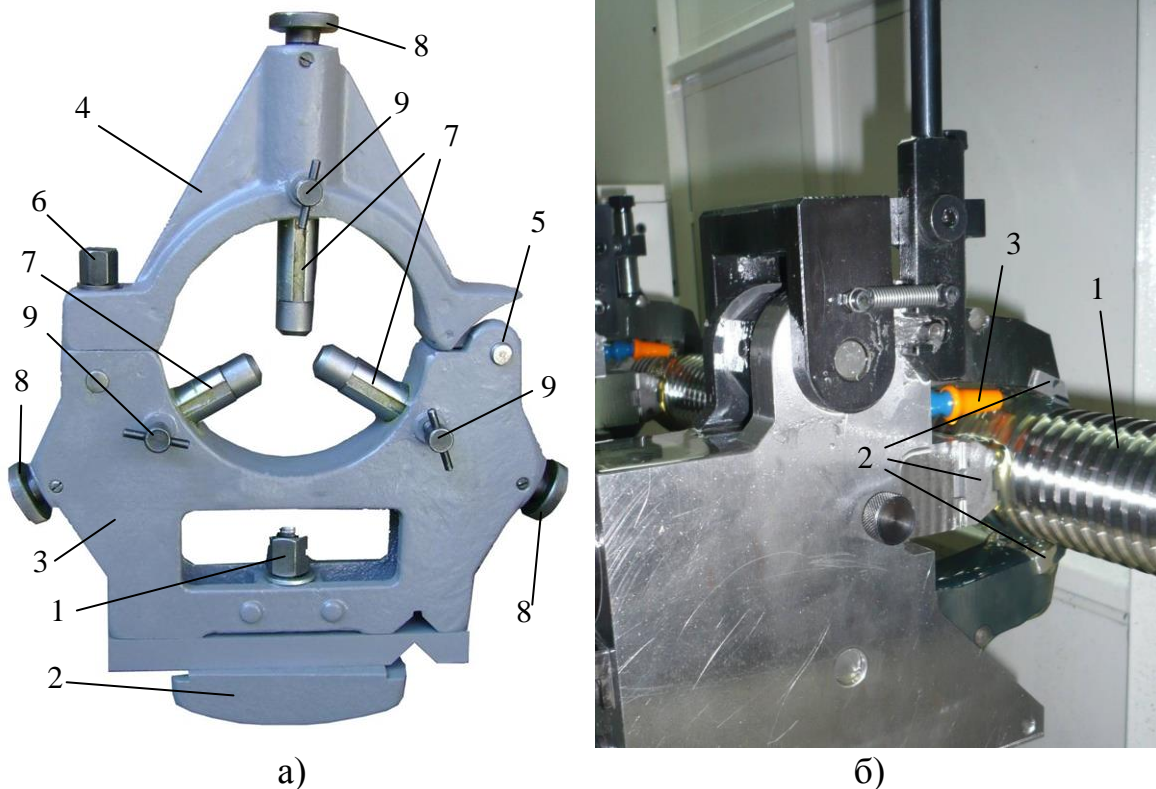


Рис. 10.1 Кулачковий люнет (а),
люнет для шліфування гвинта КГП (б)

Нерухомий кулачковий люнет (рис. 10.1,а) встановлюється на станині верстата і закріплюється болтом 8 і планкою 9 (тобто аналогічно задній бабці токарних верстатів). Корпус люнета складається з основи та кришки,

що з'єднані між собою шарніром 3. Закріплення кришки 1 в робочому стані виконується відкидним болтом 6. Люнет містить три кулачка 2, причому два кулачка розташовані в основі люнета, а третій — в кришці. Всі кулачки за допомогою регулюючих болтів 4 можуть переміщуватись в напрямних отворах корпусу люнета. Закріплення кулачків в обраному положенні здійснюється гвинтами 5.

Кулачки люнетів звичайно виготовляються з чавуну. Якщо люнет використовується на чистових операціях для запобігання псуванню поверхні деталі використовують бронзові наконечники. В деяких випадках з таких міркувань використовують кулачки, робочі поверхні яких покриті бабітом. Якщо, навпаки, можливе швидке зношування кулачків, робочі поверхні наплавають твердим сплавом, або використовують кулачки з опорними поверхнями у вигляді роликів.

На рис. 10.1,б показаний люнет для шліфування гвинта 1 кульково-гвинтової пари. Гвинт підтримується трьома регульованими кулачками 2, під які подається мастило через спеціальний штуцер 3. При шліфуванні різьби довгих гвинтів використовують декілька таких люнетів.

Установка люнета та його налаштування виконується різними способами. Настроювати кулачки люнета безпосередньо по заготовці можливо тільки у випадку її достатньої точності (наприклад, калібрований пруток) або вона вже попередньо оброблена. Таким способом можна встановлювати кулачки тільки при грубих роботах, причому, якщо заготовка прогинається під дією власної ваги, то спочатку до неї підводять два нижніх кулачки і тільки після цього закріплюють верхній кулачок.

При чистових і точних роботах краще налаштування виконувати за допомогою короткої оправки з діаметром рівним діаметру заготовки в місці контакту з опорами люнету. Один кінець оправки закріплюється в патроні шпинделя, а по другому кінцю, що попередньо вивірений індикатором, або проточений на місці виставляють кулачки люнета. Після установки кулачків люнет пересувають вздовж напрямних верстата до необхідного положення.

Слід зауважити, що при обточуванні заготовки з нерухомим люнетом кут нахилу головної різальної кромки різця повинен бути позитивним. Завдяки цьому стружка, що утворюється, відходить в напрямку, протилежному позиції люнета і не попадає в його кулачки.

На верстатах з ЧПК найбільше застосування зайшли люнети з гідروприводом самоцентруючі. Такі люнети виготовляють декілька світових фірм ROHM, Kitagama, Schunk, Sajrai Technologies та інші. На рис. 10.2 показаний самоцентруючий люнет SMW-AUTOBLOK SLU з овальним гідравлічним поршнем, а в лівому верхньому куті – фрагмент люнету фірми Schunk з круглим поршнем.

У напрямних корпуса 1 розташований повзун 2, що зв'язаний зі штоком 3 гідравлічного циліндра і містить два копії 4. З копіями 4 взаємо-

діють ролики поворотних важелів 5 і 6. На кінцях важелів і повзуна встановлені ролики-опори лунету 7, 8 і 9. Гідравлічний циліндр може бути виконаний і в іншому виконанні – з круглим поршнем (дивись рис. 10.2, справа).

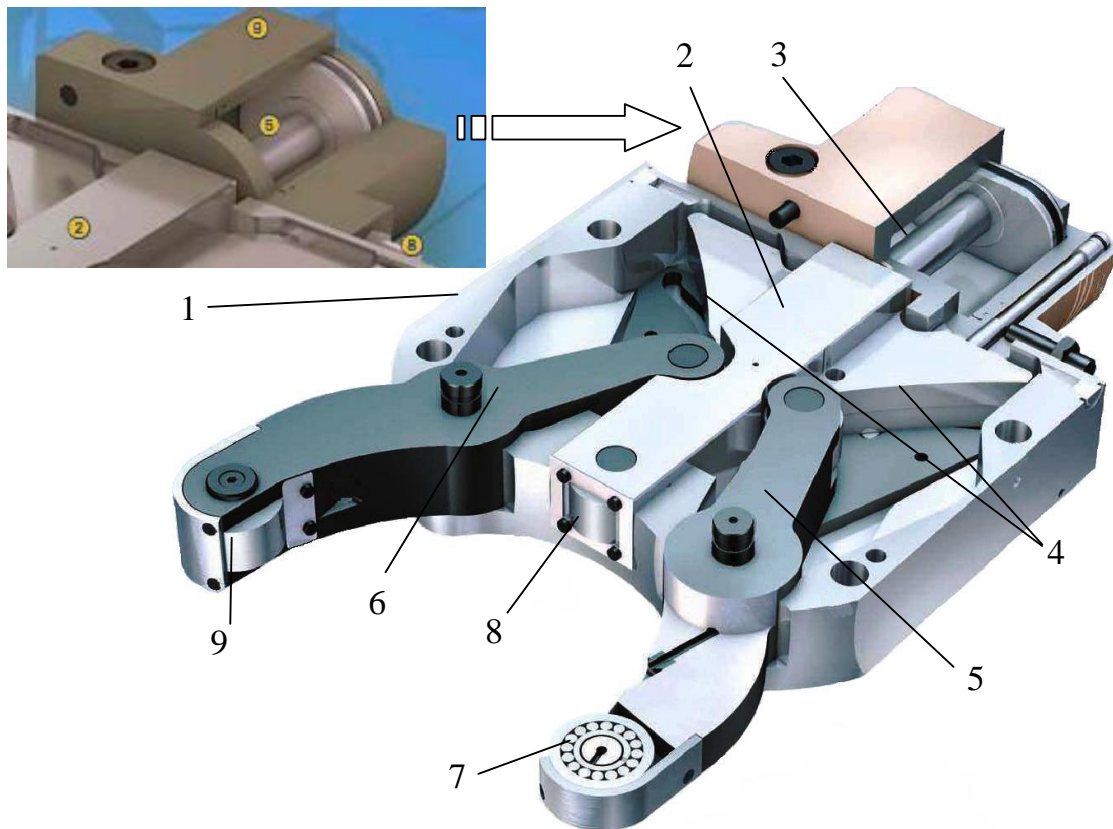


Рис. 10.2 Самоцентруючий лунет

Для шліфувальних верстатів доцільно застосовувати самоцентруючі лунети з твердосплавними опорами тертя, що при завантаженні заготовки повністю прибираються всередину, не заважаючи автоматизації процесу (рис. 10.3).

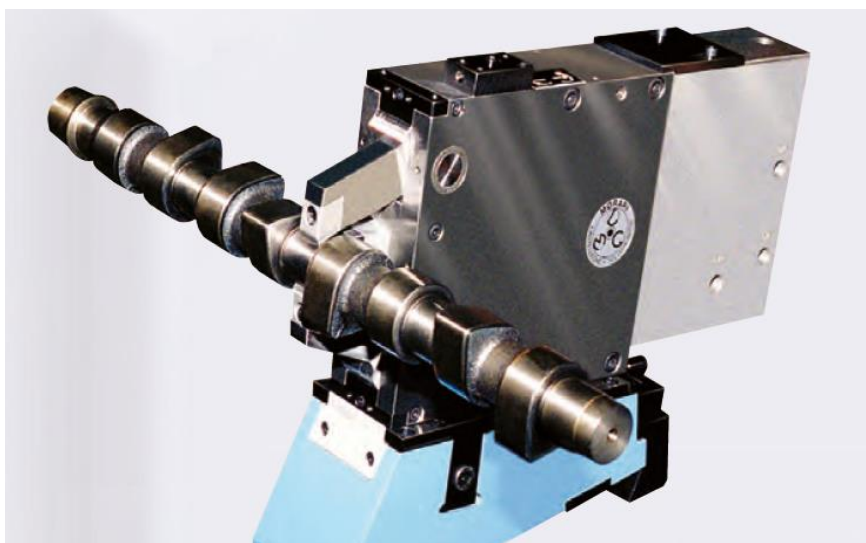


Рис. 10.3 Самоцентруючий лунет для операції шліфування

Функціонування люнету зрозуміле з кінематичної розрахункової схеми самоцентруючого люнету, яка представлена на рис.10.4.

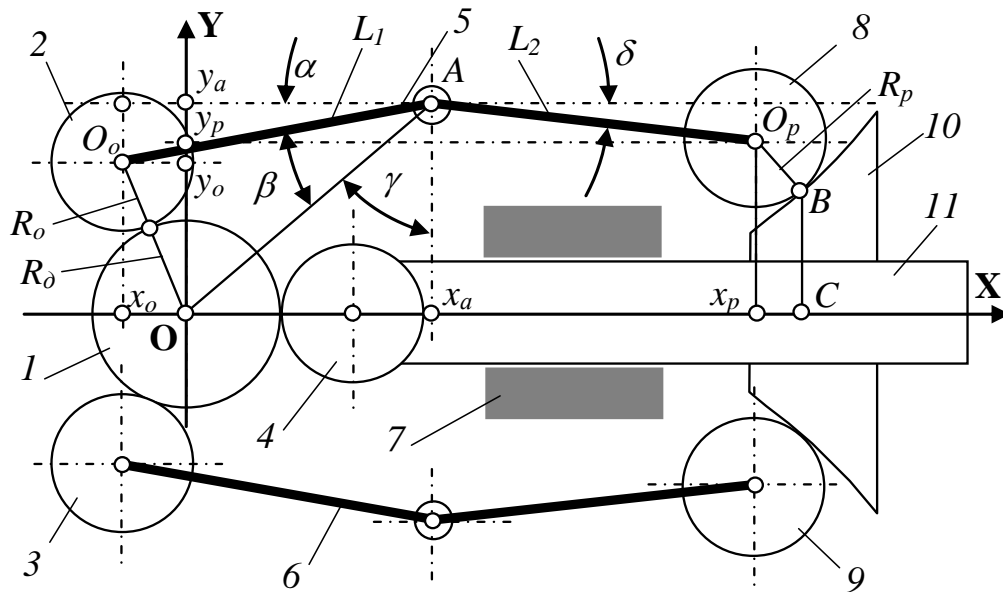


Рис. 10.4 Розрахункова схема самоцентруючого люнету

Початок системи координат XOY співпадає з віссю заготовки 1 (з віссю центрів верстата), а опорні ролики 2, 3 і 4 люнету контактують з циліндричною поверхнею заготовкою і забезпечують її підтримку при обробленні. Причому опорні ролики 2 і 3 розташовані на поворотних важелях 5 і 6, які можуть повертатися навколо осей, нерухомо закріплених у корпусі 7 люнету. Важелі 5 і 6 через ролики 8 і 9 взаємодіють з поверхнями копіра 10, який закріплений на повзуні 11, що має опорний ролик 4 і зв'язаний зі штоком гідравлічного циліндру (на схемі не показаний), який забезпечує силове замикання кінематичних ланцюгів люнету.

Проектування самоцентруючого люнету зводиться до розрахунку профілю копіра 10. Оскільки центр системи координат XOY розташований на вісі обертання деталі, за конструктивно визначеними координатами x_a , y_a опори A важеля 5 маємо:

$$OA = \sqrt{x_a^2 + y_a^2}, \quad \gamma = \arctan(x_a / y_a). \quad (10.1)$$

Тепер, з трикутника OO_oA , за теоремою косинусів, можна визначити кут β :

$$\beta = \arccos \left(\frac{L_1^2 + OA^2 - (R_o + R_a)^2}{2L_1 OA} \right). \quad (10.2)$$

Таким чином, за кутом $\alpha = \pi/2 - \beta - \gamma$ можна розрахувати координати опорного ролика 2:

$$\begin{cases} x_o = x_a - L_1 \cos \alpha \\ y_o = y_a - L_1 \sin \alpha \end{cases} \quad (10.3)$$

Координати опорного ролика 3 визначаються аналогічно за його симетричним розташуванням, координата x_o опорного ролика 4 розраховується за простою формулою $x_o = R_o + R_o$, а координата $y_o = 0$.

Для функціонування люнету профіль копіра має забезпечувати рух опорних роликів при зміні діаметра заготовки за формулами (10.3). Звідки профіль копіра 10, в свою чергу, має забезпечувати рух ролика 8 (у відносному русі) за траєкторією, що визначається з геометричних співвідношень схеми:

$$\begin{cases} x_p = x_a + L_2 \cos(\alpha - \delta) \\ y_p = y_a - L_2 \sin(\alpha - \delta) \end{cases} \quad (10.4)$$

Для розрахунку матеріального профілю копіра 10 зручно скористатися схемою за рис. 10.5, де лінією 1 позначена еквідистанта ролика у зворотному русі.

З розкладу вектора V швидкості центра ролика за еквідистантою можна знайти кут ψ між складовими швидкості:

$$\psi = \arctan(V_x / V_y). \quad (10.5)$$

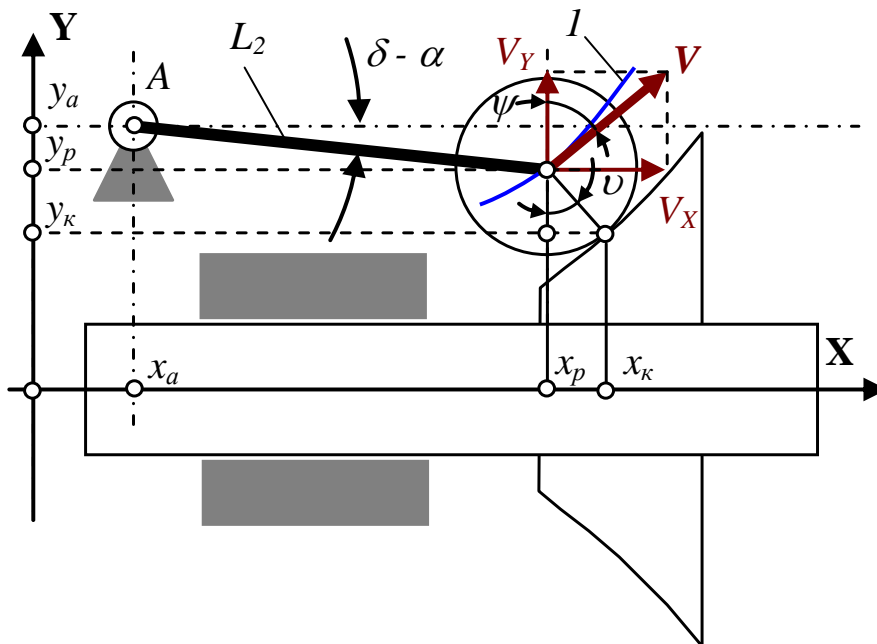


Рис. 10.5 Схема для розрахунку профілю копіра

Складові швидкості визначають чисельним методом (метод кінцевих різниць) як похідні з системи рівнянь (10.4), що описують траєкторію руху центру ролика.

Ураховуючи, що кут між вектором швидкості, який є дотичним до траєкторії руху і радіусом, що проведений до точки дотику з профілем копіра, дорівнює $\pi/2$, з геометричних співвідношень можна визначити кут ν тиску в парі ролик - копір:

$$\nu = \pi/2 - \psi. \quad (10.6)$$

Тепер можна розрахувати координати матеріального профілю копіра в системі координат XOY:

$$\begin{cases} x_k = x_p + R_p \sin \nu \\ y_k = y_p - R_p \cos \nu \end{cases} \quad (10.7)$$

Для проектування люнети важливим є його силовий розрахунок який виконується з аналізу схеми дії сил (рис. 10.6). Оскільки механізм люнети функціонує за принципом геометричного замикання, то заготовка без урахування радіальної складової P_Y сили різання знаходиться у рівновазі під дією сил:

$$2F_2 \sin \varphi = F_1. \quad (10.8)$$

де φ – кут тиску в парі опорний ролик – заготовка.

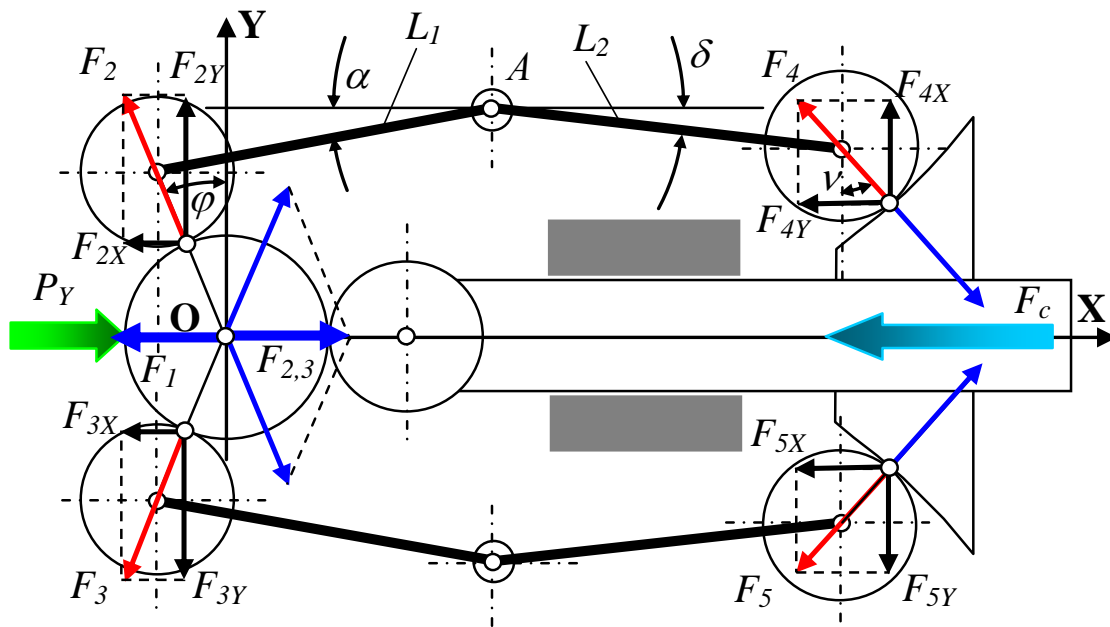


Рис. 10.6 Схема дії сил в люнеті

За розкладом сили F_4 , що діє зі сторони копіра на ролик та сили F_2 , що діє зі сторони заготовки на опору, можна отримати умову рівноваги важеля навколо осі A як рівняння моментів:

$$F_2 \cos \varphi L_1 \cos \alpha + F_2 \sin \varphi L_1 \sin \alpha = F_4 \cos \nu L_2 \cos \delta - F_4 \sin \nu L_2 \sin \delta. \quad (10.9)$$

Звідки:

$$F_4 = \frac{F_2 L_1 (\cos \varphi \cos \alpha + \sin \varphi \sin \alpha)}{L_2 (\cos \nu \cos \delta - \sin \nu \sin \delta)}. \quad (10.10)$$

Тепер, після підстановки сили F_2 , яка знайдена з рівняння (10.8), маємо:

$$F_4 = \frac{F_1 L_1 (\cos \varphi \cos \alpha + \sin \varphi \sin \alpha)}{2 \sin \varphi L_2 (\cos \nu \cos \delta - \sin \nu \sin \delta)}. \quad (10.10)$$

Таким чином може бути отримане рівняння рівноваги повзуна за віссю X без урахування радіальної складової сили різання:

$$F_c = 2F_4 \sin \nu + F_1. \quad (10.11)$$

Після підстановки (10.10) в (10.11) можна отримати залежність для визначення сили, що діє зі сторони гідравлічного циліндра:

$$F_c = \frac{F_1 L_1 \sin \nu (\cos \varphi \cos \alpha + \sin \varphi \sin \alpha)}{L_2 \sin \varphi (\cos \nu \cos \delta - \sin \nu \sin \delta)} + F_1. \quad (10.12)$$

Для забезпечення контакту опорних роликів з заготовкою і її центрування (без різання) гідравлічним циліндром має бути створена деяка сила F_1 взаємодії опорного ролика з заготовкою. З формули (10.12) видно, що, в залежності від кута φ тиску в парі опорний ролик – заготовка, сила F_c на штоку гідравлічного циліндра може сягати значних величин, а при $\varphi \leq 0$ люнет взагалі не може виконувати функцію центрування заготовки. Отже, таке обмеження обов'язково має бути урахованим при виборі конструктивних параметрів люнету.

За умови не розкриття стиків між опорами і заготовкою при різанні сила F_1 має бути більше радіальної складової P_Y сили різання. З формули (10.12) при умові $F_1 \geq P_Y$ можна отримати необхідну величину сили гідравлічного циліндра люнета, а значить і визначити необхідний тиск рідини. Проте, аналіз рівняння (10.12) показує, що така сила залежатиме як від конструктивних параметрів люнету, так і від кутів, які при його функціонуванні в робочому діапазоні зміни діаметрів заготовки змінюються. Отже немає альтернативи визначенню сили шляхом моделювання за отримани-

ми математичними моделями. При недостатній силі гідравлічного циліндру буде спостерігатися розкриття опор люнету при різанні і втрата його функціонального призначення.

Попереднє визначення необхідної сили гідравлічного циліндру (звичайно з деяким коефіцієнтом запасу, наприклад $F_c = 1,5P_Y$) є важливим етапом підготовки операції, тому що перевищення потрібної величини приводить до невиправданого перевантаження вузлів люнету і передчасного виходу його з ладу.

Практична частина

Для виконання практичної частини роботи використовується прикладна програма, інтерфейс якої у вихідному стані показаний на рис. 10.7. Прикладна програма під назвою «Люнет» знаходиться на диску в кінці книги. Інструкції і пояснення для роботи з програмою з'являються на додатковому інтерфейсі при натисканні кнопки «Help».

Програма призначена для моделювання процесу підтримки заготовки при зміні її діаметра у заданому діапазоні. Програма дозволяє досліджувати зміну кута тиску двох підтримуючих опор, що розташовані на поворотних важелях і необхідної сили гідравлічного циліндра від конструктивних параметрів люнету і радіальної складової сили різання.

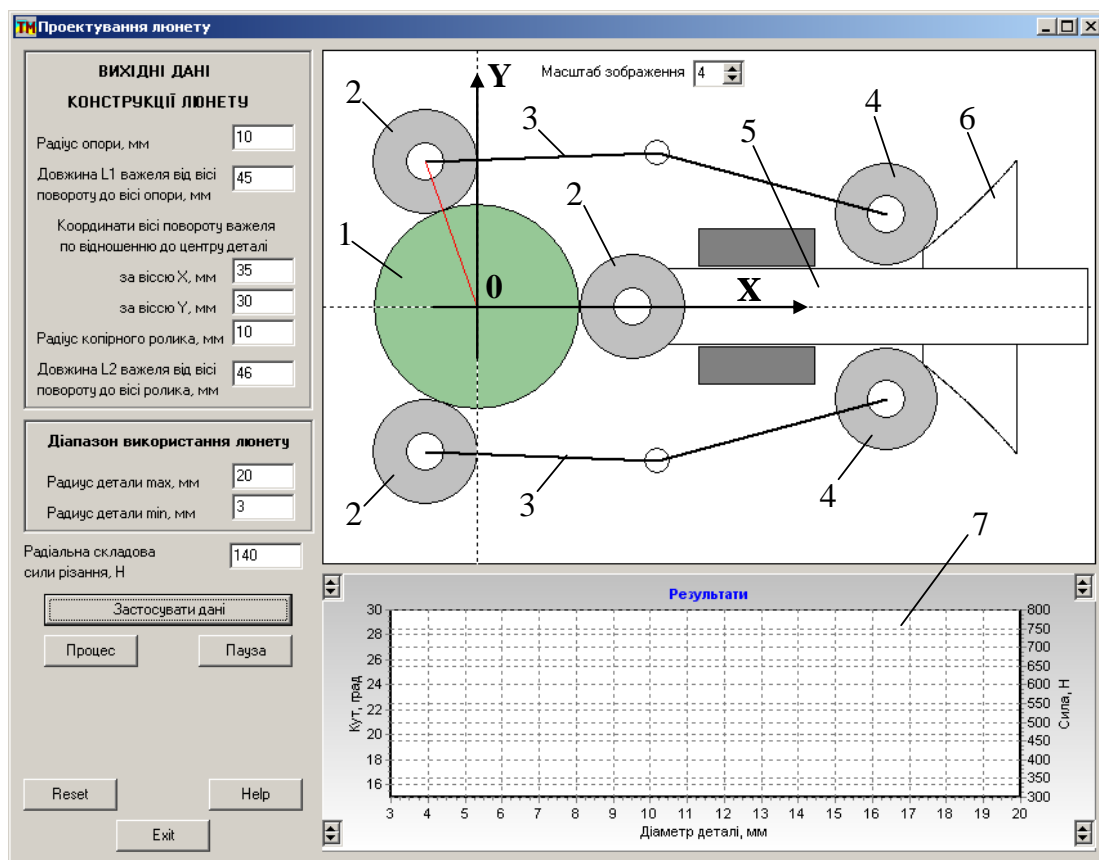


Рис. 10.7 Інтерфейс програми моделювання у вихідному стані

На інтерфейсі (рис. 10.7) зліва розташовані вікна для завдання вихідних даних, справа – графічне вікно анімації процесу, де зображена загото-

вка 1 при максимальному діаметрі, опорні ролики 2, важелі 3 з копірними роликами 4 повзун 5 з копірами 6. Справа внизу розташоване вікно 7 для представлення результатів моделювання при зміні діаметра заготовки в заданому діапазоні. Масштаб зображення у графічному вікні можна змінювати за допомогою відповідного віконця.

Для моделювання функціонування люнету при зміні діаметра заготовки в заданому діапазоні натиснути кнопку «Процес». В графічному вікні відбувається зміна діаметра заготовки з відповідними рухами всіх ланок люнету, а у вікні «Результати» з'являються графіки зміни необхідної сили гідравлічного циліндра (лінія 1) і кута φ тиску в парі опорний ролик – заготовка (лінія 2). Після закінчення циклу моделювання на інтерфейсі з'являється вікно 3 для зберігання даних профілю копіра, який забезпечує функціонування люнету у заданому діапазоні зміни діаметра заготовки (рис. 10.8).

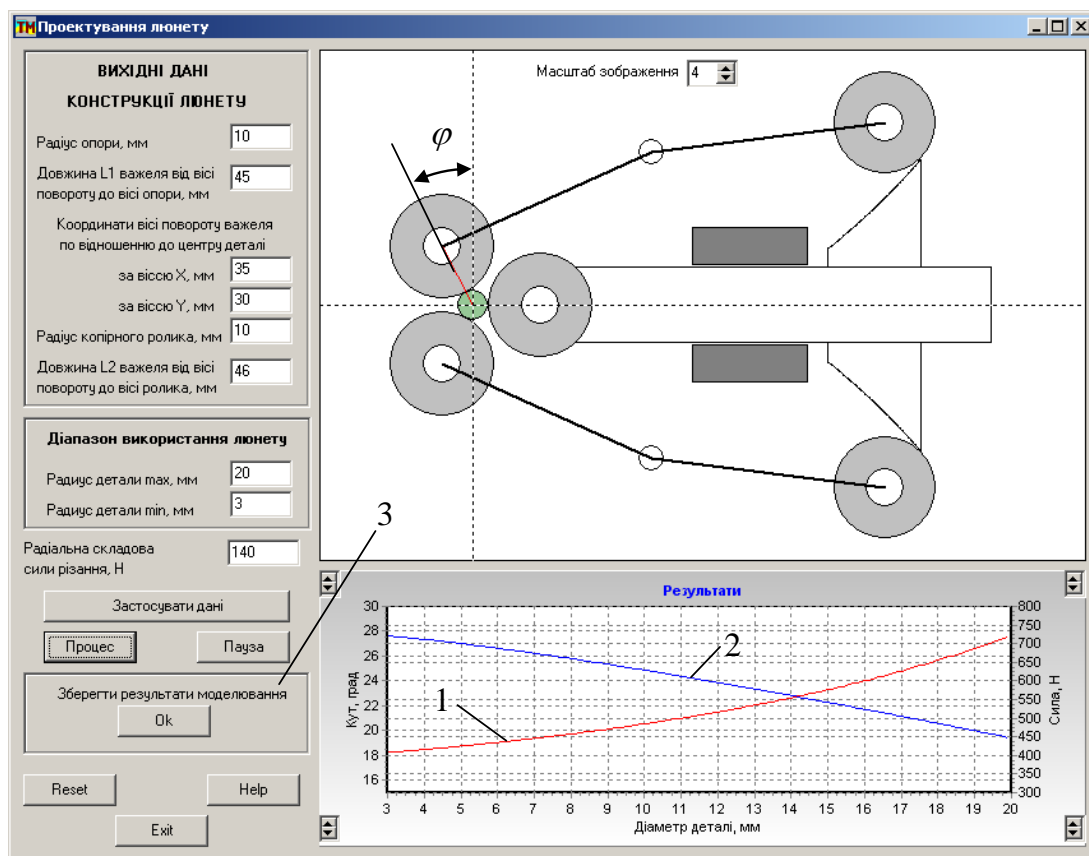


Рис. 10.8 Стан інтерфейсу в кінці циклу моделювання

У відповідності до мети роботи необхідно вибрати оптимальні конструктивні параметри люнету. Задача оптимізації у спрощеному вигляді може бути сформульована наступним чином: знайти таке значення одного параметру люнету (зазначеного у завданні), яке приводить до мінімальної сили гідравлічного циліндра при забезпеченні функціонування люнету в

заданому діапазоні зміни діаметрів заготовки при заданій величині радіальної складової сили різання. Таким чином, задача оптимізації зводиться до однокритеріальної.

Нехай необхідно знайти оптимальну величину довжини L_1 важеля від вісі повороту до вісі опори при інших вихідних даних, що зазначені у вікнах інтерфейсу за рис. 10.7, рис. 10.8. Пошук треба розпочинати з мінімально можливої величини L_1 за умови забезпечення контакту опорних роликів з заготовкою і її центрування без різання. Діапазон пошуку визначається необхідністю забезпечення функціонування люнету у заданому діапазоні зміни радіуса заготовки, що обробляється.

При довжині $L_1=38\text{мм}$ важеля від вісі повороту до вісі опори моделювання зупиняється при радіусі заготовки менше 5,5мм з повідомленням про порушення силових умов взаємодії (рис. 10.9).

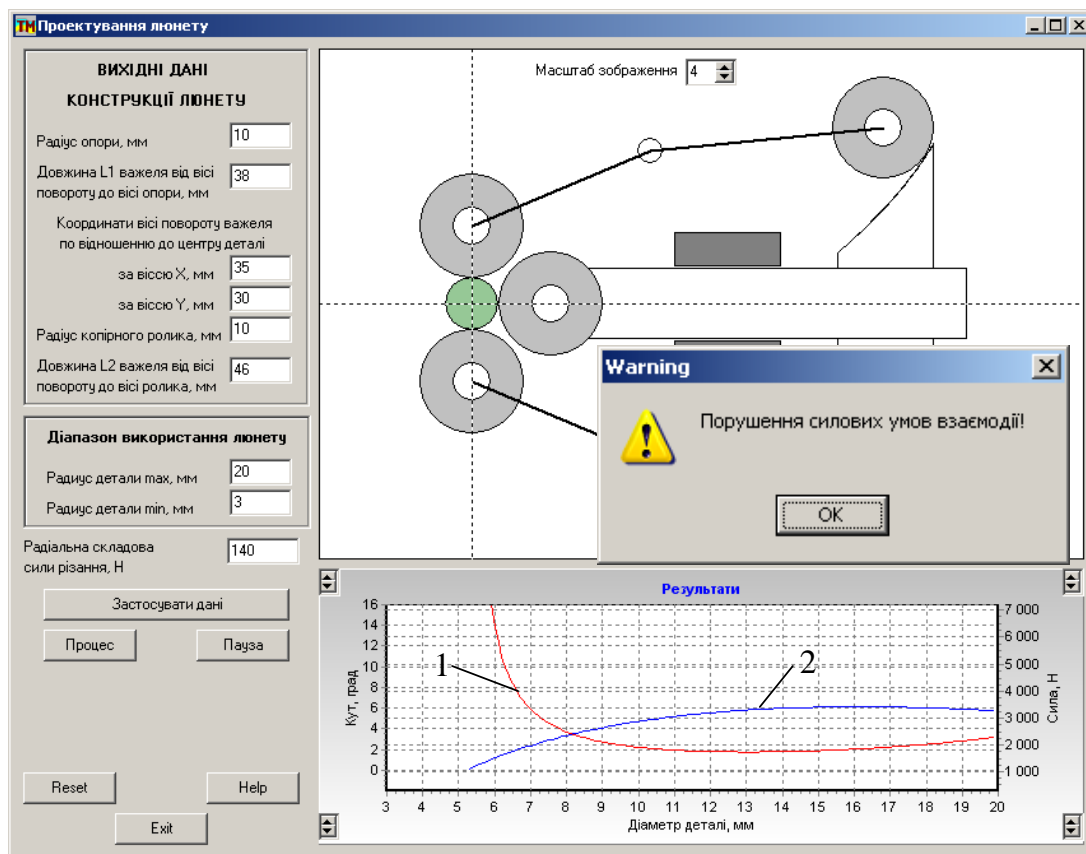


Рис. 10.9 Стан інтерфейсу при порушенні умов силової взаємодії

Це означає, що під час зміни радіуса заготовки до зазначеної межі відбулося порушення умови $\varphi > 0$. (дивись формулу (10.12)). Таким чином, люнет з такими геометричними параметрами не забезпечує центрування заготовки без різання, оскільки складові від сил взаємодії опорних роликів з заготовкою не врівноважуються. На практиці в цьому випадку результуюча сила від роликів опор люнету буде сприйматись безпосеред-

ньо заготовкою, що обов'язково викличе її деформацію і зсув від осі центрів верстату.

Моделювання, що проводилось за умови дії радіальної складової сили різання ($P_Y=140H$), показало, що при зменшенні радіусу заготовки необхідна сила гідравлічного циліндра збільшується (лінія 1 на рис. 10.9), а кут тиску в парі опорний ролик – заготовка зменшується (лінія 2 на рис. 10.9). Така тенденція пояснюється з розгляду схеми дії сил за рис. 10.6: горизонтальні складові від сил F_2 і F_3 зменшуються (оскільки зменшуються кути тиску) і для забезпечення рівноваги заготовки необхідно збільшувати силу F_c гідравлічного циліндра. Отже, за такими геометричними параметрами люнет не спроможний забезпечувати функціонування у заданому діапазоні зміни радіусів заготовки.

На наступному етапі пошуку необхідно збільшити довжину L_1 важеля з обраним кроком, наприклад 2мм. Моделювання з такою довжиною приводить до іншої колізії – порушення геометричних умов взаємодії (рис. 10.10). Оскільки опорні ролики люнету знаходяться в одній площині, то їх контакт запобігає наступному руху при зменшенні радіусу заготовки в заданому діапазоні.

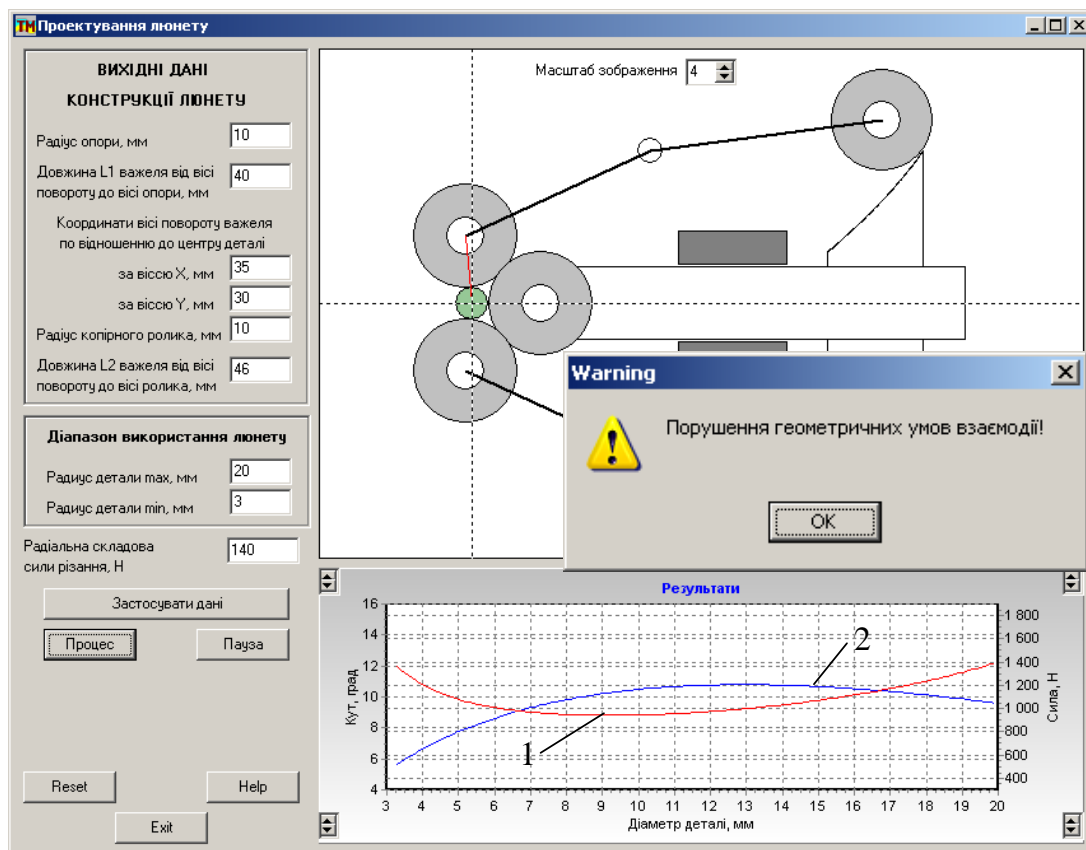


Рис. 10.10 Стан інтерфейсу при порушенні умов геометричної взаємодії

Продовження пошуку оптимальної довжини L_1 важеля приводить до певних результатів, які представлені в таблиці 10.1.

При досягненні довжини $L_1 = 48\text{мм}$ знову настає порушення геометричних умов взаємодії, що свідчить про перевірку всього доступного діапазону зміни цього параметру. Для більш точного визначення оптимальної довжини важеля доцільно повернутися назад з кроком 1мм і на цьому закінчити пошук. Таким чином, оптимальна довжина $L_1 = 47\text{мм}$ важеля забезпечує функціонування люнету у заданому діапазоні зміни радіусів заготовки з мінімальною силою гідравлічного циліндра 610Н . При цьому зміна кута тиску в парі опорний ролик – заготовка відбувається в діапазоні $30^0 \pm 6,5^0$ (рис. 10.11).

Таблиця 10.1 – Експериментальні дані

№	L_1 , мм	$(F_c)_{\min}$, Н	$(F_c)_{\max}$, Н	φ_{\min} , град	φ_{\max} , град	Примітка
1	38	-	-	-	-	Порушення силових умов взаємодії
2	40	-	-	-	-	Порушення геометричних умов взаємодії
3	42	621	1005	13,5	16,3	
4	44	454	792	17,5	23,3	
5	46	375	660	21,5	32,0	
6	48	-	-	-	-	Порушення геометричних умов взаємодії
7	47	350	610	23,5	36,5	

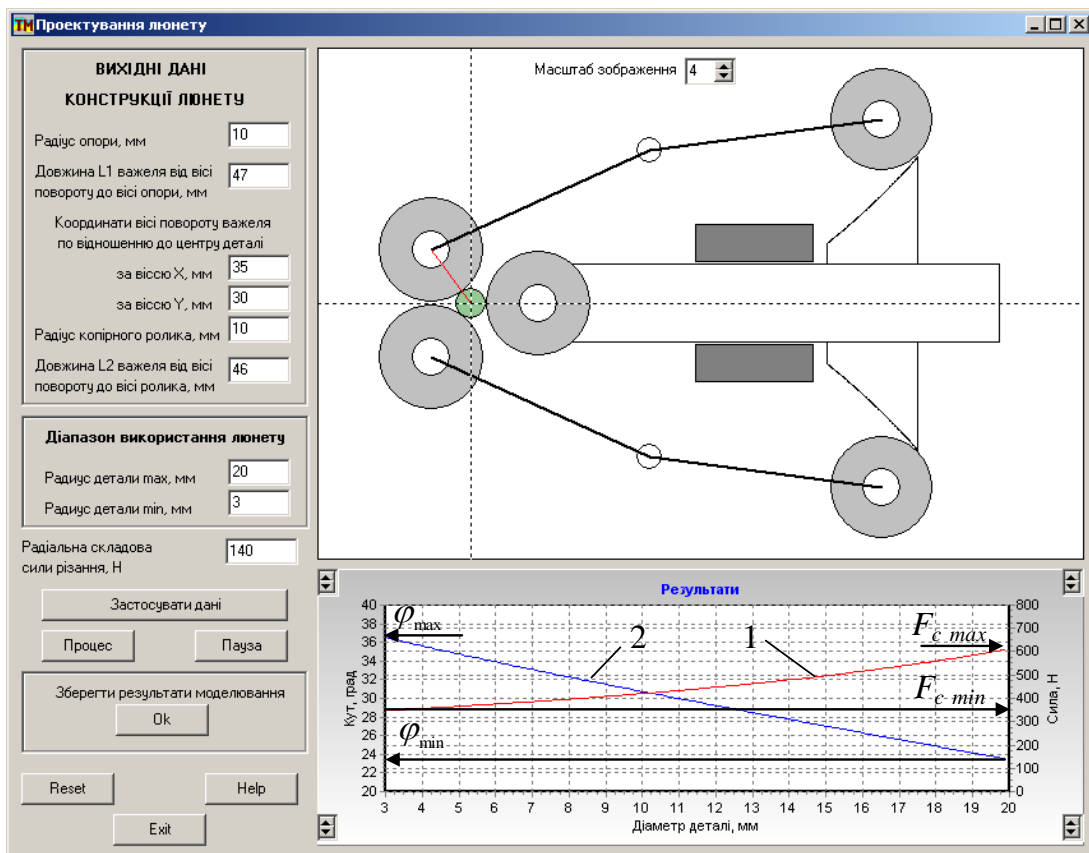


Рис. 10.11 Стан інтерфейсу при оптимальній довжині важеля

Пошук закінчено і треба зберегти результати моделювання (дивись відповідне діалогове віконце на інтерфейсі рис. 10.11) у текстовому файлі для використання при виготовленні профілю копіра люнета (рис. 10.12).

У файлі міститься вся необхідна інформація про основні розміри люнету, а матеріальний профіль копіра представлений масивом даних координат у Декартовій системі з кроком 0,1мм, що цілком достатньо для проектування управляючої програми його виготовлення на верстаті з ЧПК.

1	3.0000	– радіус заготовки m_1	
2	20.0000	– радіус заготовки m_2	
3	10.0000	– радіус ролика	
4	47.0000	– довжина L_1 важеля	
5	35.0000	– координата X	
6	30.0000	– координата Y	
7	46.0000	– довжина L_2 важеля	
8	86.7165	11.7142	} координати профілю
9	86.8419	11.8154	
10	86.9678	11.9174	
.....			
176	104.4882	28.6273	
177	104.5742	28.7252	
178	104.6615	28.8244	

Рис. 10.12 Текстовий файл параметрів люнету

Висновки

1. Самоцентруючі люнети забезпечують автоматичне підналагодження при зміні діаметру заготовки в широкому діапазоні і здатні підвищувати жорсткість та вібросталість технологічної обробляючої системи при різних видах оброблення мало жорстких деталей різанням.

2. Проектування самоцентруючого люнету зводиться до розрахунку профілю копіра та визначення необхідної сили гідравлічного циліндра за розмірами його кінематичних ланцюгів.

3. Необхідна сила гідравлічного циліндру залежить від величини очікуваної на операції радіальної складової сили різання та геометричних параметрів люнету. При моделюванні встановлено, що зміна довжини важеля з $L_1 = 42\text{мм}$ до $L_1 = 47\text{мм}$ необхідна сили гідравлічного циліндра зменшується з 1005Н до 610Н.

4. Пошук оптимальних величин геометричних параметрів люнету проводиться в діапазоні, який обмежується порушенням або силових, або геометричних умов взаємодії люнету.

Завдання

1. За вихідними даними у відповідності до варіанту (таблиця 10.2 і таблиця 10.3) провести попередні експерименти з визначення меж зміни параметру, за яким проводиться оптимізація. Визначити мінімальне і максимальне значення параметру, що забезпечує виконання функціонування люнету у заданому діапазоні зміни радіусів заготовки. Встановити крок зміни цього параметра і підготувати таблицю експериментальних даних. Програма «Люнет» знаходиться на диску в кінці книги.

2. Провести експерименти у визначеному діапазоні зміни параметру, за яким проводиться оптимізація. Вибрати масштаб зображення у графічному вікні інтерфейсу. Записати результати експериментів у таблицю і підготувати аргументовані висновки.

Таблиця 10.2 – Вихідні дані

Перша цифра	Довжина важелів, мм		Координати вісі, мм		Радіус заготовки, мм	
	L_1	L_2	X	Y	min	max
0	36	37	28	24	16	2
1	32	33	25	21	14	2
2	50	52	39	33	18	3
3	54	56	42	36	18	2
4	59	61	46	39	19	3
5	41	43	32	28	15	2
6	76	78	60	51	20	3
7	63	65	49	42	19	2
8	68	70	53	45	20	3
9	72	74	56	48	20	2

Таблиця 10.3 – Вихідні дані

Друга цифра	Радіус опорного ролика, мм	Радіус копірного ролика, мм	Радіальна складова сили різання, Н	Параметр до оптимізації
0	7	6	100	Довжина L_1
1	6	7	120	Координата X
2	8	9	140	Довжина L_1
3	9	5	160	Координата X
4	5	8	170	Довжина L_1
5	6	8	180	Координата X
6	8	9	200	Довжина L_1
7	5	6	220	Координата X
8	9	7	230	Довжина L_1
9	6	8	240	Координата X

Зміст протоколу

У протоколі навести: завдання, таблицю експериментальних даних, копію інтерфейсу прикладної програми при оптимальній величині параметру, за яким проводився пошук, файл параметрів люнету і профілю копіра, висновки.

Інструкції до роботи з програмою

Програма призначена для моделювання функціонування самоцентруючого люнета.

Для роботи з програмою встановити потрібні значення вихідних даних у вікнах інтерфейсу і натиснути кнопку "Застосувати дані". При відсутності конфліктів (з'являється відповідне повідомлення) у графічному вікні виникає зображення кінематичної схеми люнету, що взаємодіє з заготовкою максимального діаметру.

Масштаб зображення можна змінювати так, щоб все зображення було у вікні – кнопки в графічному полі.

Для моделювання натиснути кнопку "Процес". В графічному вікні

Виконуються рухи ланцюгів люнета при зміні діаметру заготовки до мінімальної величини, а у вікні віртуального осцилографа з'являються осцилограми: червона лінія – необхідна сила гідравлічного циліндра, синя лінія – кут тиску в парі опорний ролик – заготовка. Кнопки в полі віртуального осцилографа дозволяють змінювати масштаб за відповідними осями.

Для точного вимірювання величин у вікні "Результати" можна збільшувати масштаб зображення: підвести мишку до верхнього правого кута обраної для збільшення ділянки, натиснути ліву клавішу і "протягнути" вниз-вліво, відпустити клавішу. Таке збільшення можна проводити декілька разів до бажаного масштабу.

Повернення до вихідного масштабу – у будь-якому місці вікна "Результати" натиснути ліву клавішу мишки, "протягнути" вправо-вгору і відпустити клавішу.

Після закінчення руху з'являється вікно "Зберегти результати моделювання", що дозволяє записати файл профілю копіра у текстовому форматі.

Для проведення наступного експерименту натиснути кнопку "Reset", ввести нові дані, натиснути кнопку "Застосувати дані", а потім кнопку "Процес".

Запитання для самоконтролю

1. За допомогою кінематичної схеми пояснити функціонування самоцентруючого люнету.

2. Коли виникає порушення силових умов взаємодії самоцентруючого люнету? Підтвердити відповідною формулою.

3. Коли виникає порушення геометричних умов взаємодії кінематичних ланцюгів люнету?

4. Чому при зменшенні кута тиску в парі опорний ролик – заготовка відбувається збільшення необхідної сили гідравлічного циліндру?

5. Чому при від'ємних значеннях кута тиску в парі опорний ролик – заготовка функціонування люнету неможливе?

ПОСИЛАННЯ:

1. Боровик А.І. Технологічна оснастка механоскладального виробництва: підручник – К.: «Кондор», 2008, 726с. / <http://ктеп.kiev.ua/wp-content/uploads/2019/12/Borovik-A.-I.-Tehnologichna-otnastka-mehaloskladnogo-virobnicztva.pdf>
2. Петров О. В., Сухоруков С. І. Технологічна оснастка : навчальний посібник /. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 123 с. / http://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/IRVC/2021/Petrov_2018_123.pdf
3. Корсаков В. С. Основы конструирования приспособлений; Учебник для вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение. 1983. — 277 с.
4. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок, В.О. Залого, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов; під заг. ред. М.П. Мазура. – 2-е вид. перероб. і доп. – Львів : Новий світ-2000, 2011. – 422 с. // <https://ns2000.com.ua/wp-content/uploads/2019/11/Osnovy-teorii-rizan.mater.pdf>
5. Петраков Ю.В. Лабораторно-комп'ютерний практикум з теорії різання: Навчальний посібник МОН України. Політехніка, Київ. 2006. – 190с. / <https://koha.tntu.edu.ua/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=72869>
6. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням: Навчальний посібник МОН України, УкрНДІАТ, Київ. 2004. – 383 с. <https://www.dstu.dp.ua>
7. Станочные приспособления: Справочник. В 2-х т. /Ред. совет: Б. Н. Вардашкин (пред.) и др.— М.: Машиностроение, 1984. — Т. 1 / Под ред. Б. Н. Вардашкина, Л. Л. Шатилова, 1984. 592 с.
8. Медведєв В. С., Тулупов В. І., Онищук С. Г. Технологічна оснастка : навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» / Краматорськ : ДДМА, 2021. – 108 с. / http://www.dgma.donetsk.ua/docs/kafedry/tiur/metod/nm2021/Технологічна_оснастка_конспект_лекцій.pdf