

## МОДЕЛЮВАННЯ ВІДХИЛЕННЯ ПРОФІЛЮ ПОВЗДОВЖНЬОГО ПЕРЕРІЗУ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛІ ВНАСЛІДОК ПРУЖНИХ ВІДТИСКАНЬ В ТЕХНОЛОГІЧНІЙ СИСТЕМІ ПРИ ТОКАРНІЙ ОБРОБЦІ

В статті доводиться необхідність моделювання відхилення профілю повздовжнього перерізу при токарній обробці для циліндричних поверхонь, таких як вали та ступінчасті вали. Проаналізовано в деталях фізичні процеси, що призводять до відхилення профілю повздовжнього перерізу при обточуванні циліндричних поверхонь. Показано математичні методи розрахунку податливості балок для двох схем навантаження балки, які імітують вал, що обточується у верстаті. Вказано методи розрахунку податливості верстата відповідно до певних схем обробки. В цій статті пояснюється головна логіка: як застосовувати наведені вище методи коректно для того, щоб розрахувати податливість технологічної системи, при їх реалізації в прикладній програмі. Щодо моделювання похибки, автор представляє програмний додаток для моделювання, оснований на "Системі розрахунку режимів різання". Автор вказує принципи проектування деяких екранів інтерфейсу користувача в додатку і відмічає трюки програмування – як можна упередити користувача від вводу суперечливих даних і заплутатись при користуванні додатком. Також описано як тлумачити результати програми і дано приклад того, як може виглядати реальний шар матеріалу, утворений похибками пружних відтискань.

Ключові слова: різання металів, різець, оброблювана поверхня, токарна обробка, токарний універсальний верстат, технологічна система, жорсткість, податливість технологічної системи, податливість заготовки, похибка обробки.

K.S. SOKOLAN, D.K. KOKOREV  
Kmelnytsky National University

## MODELLING OF THE PROFILE DEVIATION OF THE LONGITUDINAL SECTION OF DETAIL CYLINDRICAL SURFACE AS RESULT OF ELASTIC EXPRESSION IN THE TECHNOLOGICAL SYSTEM BY TURNING

This article proves the necessity of modelling the deviation from true longitudinal section profile when cutting a radial surfaces such as shafts and multidiameter shafts. Were described in depth the physical processes, those lead to the deviation from true longitudinal section profile when cutting radial surfaces. Were shown the math methods of calculation the suppleness of beams for the two beam-loading conditions, those imitate the shaft while cutting. Were pointed the methods of calculating the compliance of a turning machine accordingly to some certain cut-map. This article explains the main logic of how to use correctly the methods those mentioned above to calculate the slack of a technological system while implementing them into an application. As of deviation modelling, the author introduces a modelling application, which is based on the "Cutting conditions calculation system". The author points the principles of designing the user interface of some screens in the application and notices developers' tricks of how to both avoid a user to enter contradicting data and get becoming confused, while using the application. It is also outlined of how to interpret the results of the application and given an example of what the real deviation layer might look like.

Key words: metalcutting, cutter, processing surface, turning, turning machine, technological system, stiffness, slack, suppleness, working error.

### Вступ

Точність деталі взагалі не має кількісної оцінки. Не можна казати, що точність дорівнює якійсь величині. Тому за міру точності приймають величини відхилень дійсних значень різних параметрів деталей від їх теоретичних або розрахункових значень. Таким чином точність обробки оцінюється величинами дійсних відхилень параметрів або похибками обробки.

В умовах виробництва часто немає потреби навіть вимірювати похибки обробки. Достатньо визначити чи знаходяться дійсні відхилення параметрів у межах заданих допусків, тобто встановити: ці деталі придатні чи браковані. Але щоб гарантувати стабільну точність обробки і відсутність браку технолог забов'язаний знати та прогнозувати не тільки загальні величини можливих похибок обробки, а й величини їх складових, що з'являються від дії різних причин та факторів систематичного і випадкового характеру.

Якщо на кресленні є точність на розмір, то відхилення геометричної форми поверхні, що впливає на цей розмір, не повинно перевищувати її. Якщо на кресленні деталі немає ніяких вимог до допусків відхилення геометричної форми поверхні, то відхилення форми повинні укладатися в допуск на розмір, а відхилення форми циліндричних поверхонь в половину допуску на розмір. Тобто, не можна говорити про точність розміру і замовчувати про точність геометричної форми, оскільки ці поняття взаємопов'язані. Відхилення ставляться по конструкторським міркуванням, виходячи із експлуатаційних особливостей роботи деталі.

### 1.2 Поняття про похибки від пружних деформацій технологічної системи

Технологічна система верстат – пристрій – інструмент – деталь представляє собою систему (рис. 1), деформації якої в процесі обробки обумовлюють виникнення систематичних похибок розмірів і геометричної форми оброблюваних заготовок.

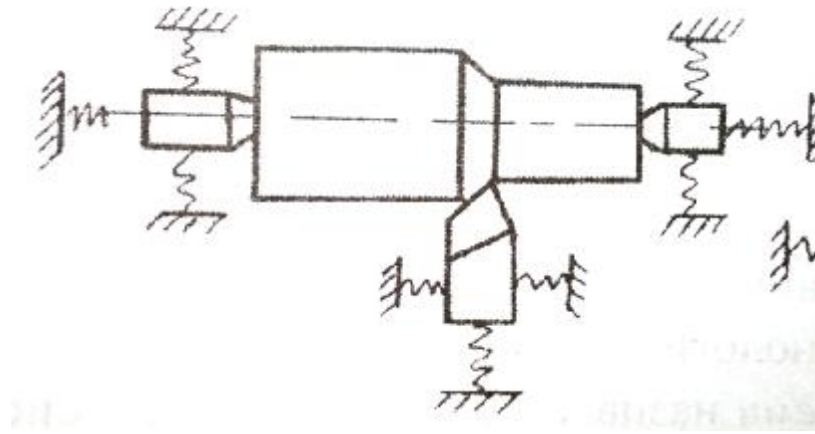


Рис. 1. Спрощена модель токарної пружної технологічної системи

При обробці в центрах на токарному верстаті гладкого вала (рис. 1.6) у початковий момент, коли різець знаходиться біля правого кінця вала, вся нормальна складова  $P_y$  зусилля різання передається через заготовку на задній центр, піноль і задню бабку верстата, викликаючи пружну деформацію названих елементів верстата (згинання заднього центра і пінолі, відтискання корпусу задньої бабки) в напрямку "від робітника". Це призводить до збільшення відстані від вершини різця до осі заготовки на величину  $U_{з.б.}$  і відповідного збільшення радіуса оброблюваної заготовки. Одночасно з цим під дією  $P_y$  відбувається пружне відтискання  $U_{інстр.}$  різця і супорта в напрямку "на робітника", що у свою чергу, тягне за собою збільшення відстані від вершини різця до осі обертання заготовки, а отже, і радіуса обробленого виробу. Таким чином, у початковий момент діаметр обробленої поверхні фактично виявляється більшим за діаметр, встановлений при настроюванні, на величину:

$$\Delta D = 2 \cdot (U_{з.б.} + U_{інстр.}). \quad (1.1)$$

При подальшому обточуванні та переміщенні різця від задньої бабки до передньої відтискання задньої бабки зменшується, але виникає відтискання передньої бабки  $U_{п.б.}$  і оброблюваної заготовки  $U_{заг.}$ , які також збільшують фактичний діаметр обробки (рис. 2).

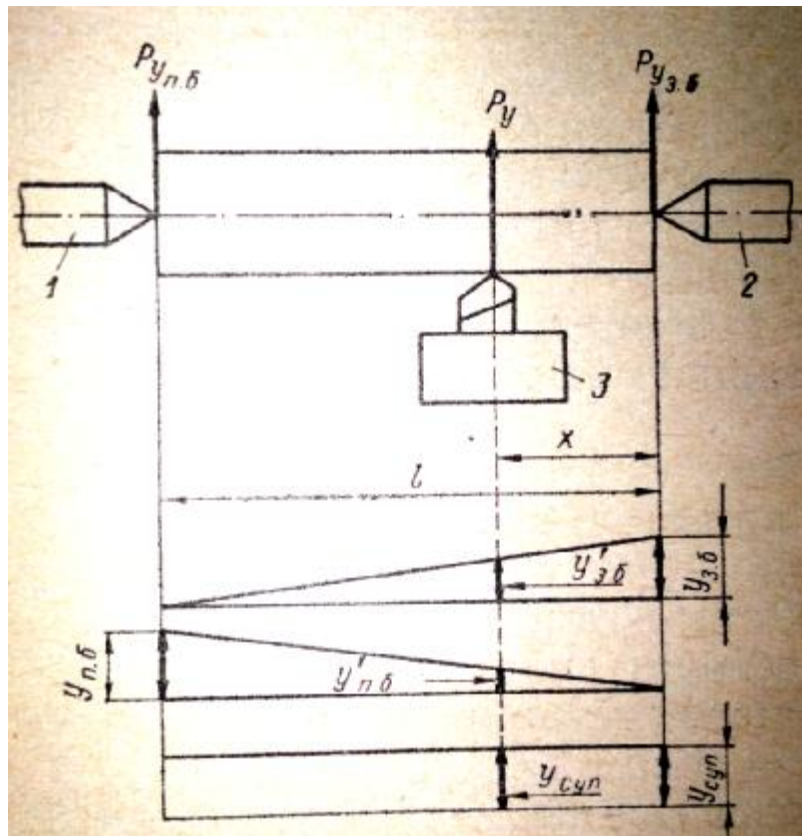


Рис. 2. Пружні відтискання технологічної системи, при закріпленні вала в центрах

В деякому перерізі А-А фактичний діаметр оброблюваної заготовки виявляється рівним [5]:

де – настроювальний діаметр.

У зв'язку з тим, що пружні відтискання елементів верстата (крім відтискання  $Y_{інстр.}$  супорта та інструмента) змінюються по довжині оброблювальної заготовки, її діаметр, а отже і форма виявляються змінними по довжині. Похибка розміру і форми заготовки у даному випадку дорівнюють подвоєній сумі пружних відтискань в технологічній системі. Пружні відтискання у визначаються діючими у напрямку цих відтискань зусиллями і жорсткістю технологічної системи. Якщо жорсткість елементів верстата відносно велика, а жорсткість оброблюваної заготовки мала (обточування довгого і тонкого вала на масивному верстаті), то відтискання  $Y_{з.б.}$  і  $Y_{п.б.}$  малі, а  $Y_{заг.}$  велике. В результаті цього форма заготовки стає бочкоподібною. Навпаки, при обробці масивної заготовки, яка дає мінімальний прогин, на верстаті малої жорсткості  $Y_{з.б.}$  і  $Y_{п.б.}$  значні, і форма заготовки виявляється корсетоподібною з найменшим діаметром біля середини заготовки.

### Розрахунок відхилення профілю поздовжнього перерізу обробленої циліндричної поверхні деталі від очікуваного

Технологічна обробна система представляє собою систему з послідовним з'єднанням складових ланок, при якій переміщення всієї системи в заданому напрямку дорівнює алгебраїчній сумі переміщень її окремих елементів у цьому напрямку.

Виходячи з цього, податливість системи дорівнює сумі податливості її окремих ланок [2]:

$$\omega_{п.с.} = \omega_{верст.} + \omega_{заг.} \quad (2.20)$$

Похибка обробки:

$$\Delta D = 2(Y_{з.б.} + Y_{п.б.} + Y_{інстр.} + Y_{заг.}) = 2y = 2F_y \cdot \omega_{п.с.} \quad (2.21)$$

### Метод розрахунку податливості верстата

Податливість верстата при встановленні заготовки в центрах і передачі моменту поводковим патроном визначають за формулою [2]:

$$\omega_{верст.} = \omega_{суп.} + \omega_{п.б.} \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 + \omega_{з.б.} \left(\frac{x}{l}\right)^2 \quad (2.22)$$

де  $l$  – довжина заготовки;

$x$  – відстань від торця заготовки до місця прикладання сили  $F_y$  (рис. 3).

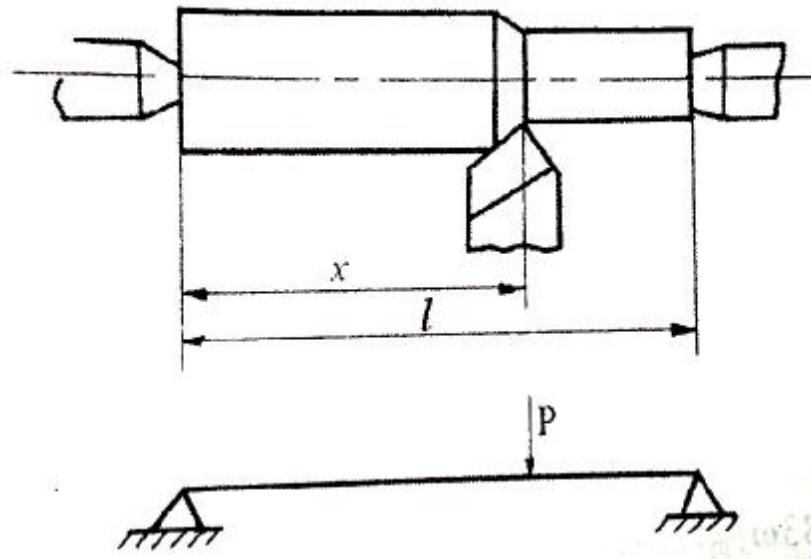


Рис 3. Схема обробки вала в центрах

Податливість верстата при консольному закріпленні заготовки в патроні токарного верстата, або цанзі револьверного верстата визначають за формулою [2]:

$$\omega_{верст.} = \omega_{суп.} + \omega_{п.б.} \left(1 + \frac{x}{l_0}\right)^2 \quad (2.23)$$

де  $l_0$  – відстань від торця кулачків патрона (торця цанги) до середини переднього підшипника шпинделя, мм;

$x$  – відстань від кулачків патрона до місця прикладання сили різання, мм.

### Методика розрахунку податливості заготовки закріпленої в верстаті

Піддатливості заготовок при різних схемах закріплення визначають із рівняння пружної лінії балки постійного перерізу [1, ст. 77].

Валу встановленому в центрах, відповідає балка на двох шарнірних опорах (рис. 4).

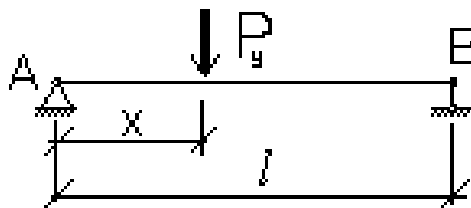


Рис 4. Балка на двох шарнірних опорах

Прогин у місці прикладання зосередженої сили для такої балки рівний:

$$y = P_y \cdot \frac{(l-x)^2 \cdot x^2}{3EI} \quad (2.24)$$

де  $E$  – модуль Юнга (модуль пружності першого роду);

$I$  – момент інерції перерізу заготовки,  $\text{мм}^4$ .

Для круглого перерізу момент інерції перерізу визначається за формулою [12, ст. 63]:

$$I = \frac{\pi D^4}{64} \quad (2.25)$$

де  $D$  – діаметр гладкого вала, або приведений діаметр ступінчатого вала.

Для вала із однією потовщенням [10]:

$$D = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n D_i \cdot l_i \quad (2.26)$$

Для вала із потовщенням по середині [10]:

$$D = \sqrt{\frac{1}{l} \sum_{i=1}^n D_i^2 \cdot l_i^2} \quad (2.27)$$

Піддатливість заготовки при довільному положенні різця (на відстані  $x$ ) при обробці в центрах визначають за формулою [10]:

$$\omega_{\text{вст.}} = \frac{1000 \cdot (l-x) \cdot x^2}{3EI} \quad (2.28)$$

Валу закріпленому в патроні відповідає консольна балка із жорстко зашкеленим кінцем (рис. 5).

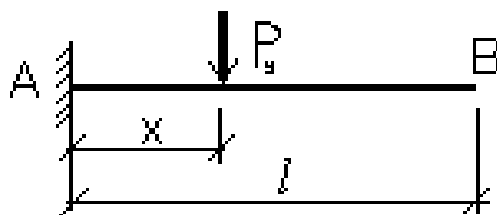


Рис. 5. Консольна балка із жорстко зашкеленим кінцем

Прогин у місці прикладання зосередженої сили для такої балки рівний:

$$y = P_y \cdot \frac{x^3}{3EI} \quad (2.30)$$

Піддатливість заготовки при консольному закріпленні в патроні токарного верстата або цанзі револьверного верстата визначається за формулою:

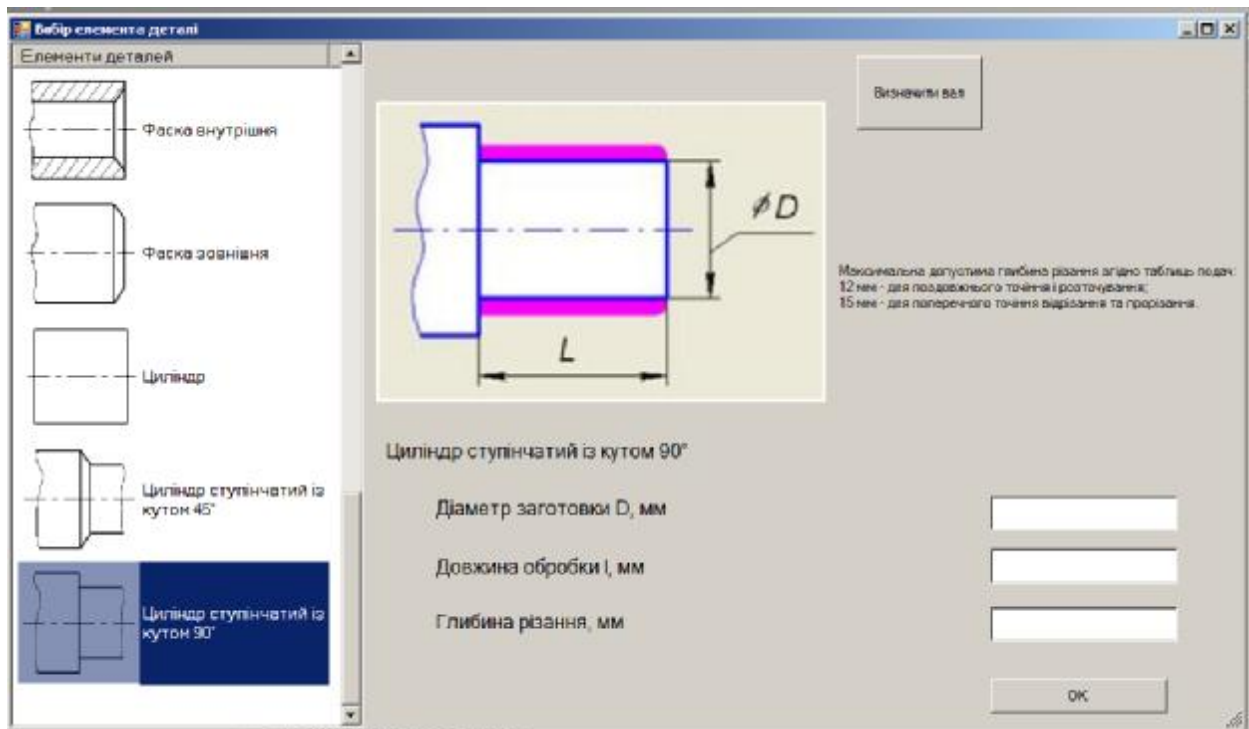
$$\omega = \frac{1000x^3}{3EI} \quad (2.31)$$

**САЕ система моделювання відхилення профілю повздовжнього перерізу циліндричної поверхні деталі**  
моделювання відхилення профілю повздовжнього перерізу циліндричної поверхні деталі, далі просто моделювання відхилення.

У системі можна виконувати розрахунок режимів різання для більшості елементів деталей, які можна обробляти на токарному верстаті. Елементи деталі, далі просто елементи. Усі наявні елементи в системі є тілами обертання. Із елементів деталей доступних для вибору в системі, потрібно реалізувати можливість моделювання похибок для тих, що включають у себе циліндричну поверхню, яка обробляється різцем в поздовжньому до осі

обертання заготовки напрямку. У нашому випадку це елементи “Циліндр”, “Циліндр ступінчастий із кутом 90°”.

Для того щоб задати реальну схему навантаження, кріплення вала та обрахувати жорсткість технологічної системи передусім необхідно задати геометричні розміри вала або якщо він ступінчастий – розміри усіх його ступенів. Тобто необхідно визначити вал в системі із усіма його параметрами. Тому створимо кнопку “Визначити вал”, і запрограмуємо щоб вона ставала активною при виборі вище зазначених елементів. Натисканням цієї кнопки ми будемо відкривати вікно, у якому в спеціальну таблицю будемо послідовно вводити розміри усіх ступенів вала. Таблиця містить колонки “D” і “L”, що відповідають діаметрам і довжинам ступенів вала. Заповнювати таблицю необхідно по рядкам вводячи діаметр, потім довжину ступені вала. Користуючись клавішами навігації на клавіатурі можна перейти до нижчого вільного рядка для заповнення. Коли починають заповнювати пустий рядок, під ним автоматично створюється новий рядок. Цей рядок також можна заповнити, або залишити пустим, якщо всі наявні у вала ступені були введені. Під час переходу на новий рядок, щойно введена ступінь вала буде відмальована у вікні, таким чином інженер зможе у реальному часі бачити конфігурацію вала, що він вводить у систему. Кожна ступінь вала повинна відображатись із нанесеними на неї розмірами. Це дозволяє виключити помилки пов’язані із необачністю, формує зображення близьке до креслярського.



Кожний рядок таблиці вимагає введення діаметра ступені. Ця інформація необхідна для обрахунку моменту інерції перерізу приведенного вала. У випадку гладкого вала, для розрахунку моменту інерції перерізу необхідний діаметр цього вала. У випадку ступінчастого вала ми маємо декілька діаметрів, кожен відповідає певній ступені. Діаметр вала, який буде брати участь у знаходженні моменту інерції перерізу повинен розраховуватись як приведений діаметр із усіх, що введені в таблицю. При цьому не важливо чи вал гладкий чи ступінчастий: якщо в таблиці буде лише один заповнений рядок, система буде вести розрахунки як для гладкого вала.

У таблиці задання вала також є колонки “P” і “Z” за допомогою яких задається схема обробки вала. Колонка “P” означає “робоча поверхня”, це те ж що й оброблювана поверхня. Оброблювальну поверхню необхідно виділяти поміж інших для того, щоб передати її параметри у вікно “Вибір елемента деталі”, щоб автоматично заповнити поля “Діаметр заготовки” та “Довжина обробки”. Такий підхід виключить ввід даних не тієї ступені або ввід даних які суперечать логіці (наприклад ввід параметрів ступені, яка знаходиться лівіше поверхні закріплення: таку поверхню буде технічно не можливо обробити). Головним чином виділяти робочу поверхню необхідно для того, щоб дізнатись початкову і кінцеву координати обробки, та приведений діаметр вала необхідні для розрахунку пружних відтискань системи. Початковою координатою в системі будемо вважати суму довжин ступенів між поверхнею закріплення та робочою поверхнею, або суму довжин ступенів, що знаходяться з лівого боку від оброблюваної поверхні, у випадку коли не існує поверхні закріплення (вал закріплений в центрах). Слід розуміти, що принципи викладені вище, ґрунтовані на тому, що вал прогинається по всій довжині, тільки коли встановлений в центрах. Використовуючи трикулачковий патрон, ми накладаємо на деяку поверхню вала жорстке защемлення, тому буде прогинатись лише частина вала між центром і патроном. Для того, щоб задати робочу поверхню, поставте у рядку із параметрами потрібної ступені, колонці “P” індикатор. Вибрана поверхня підсвітиться червоним кольором. В якості робочої поверхні можна вибрати любую поверхню, тому обмеження будуть накладатись на використання можливих способів закріплення.

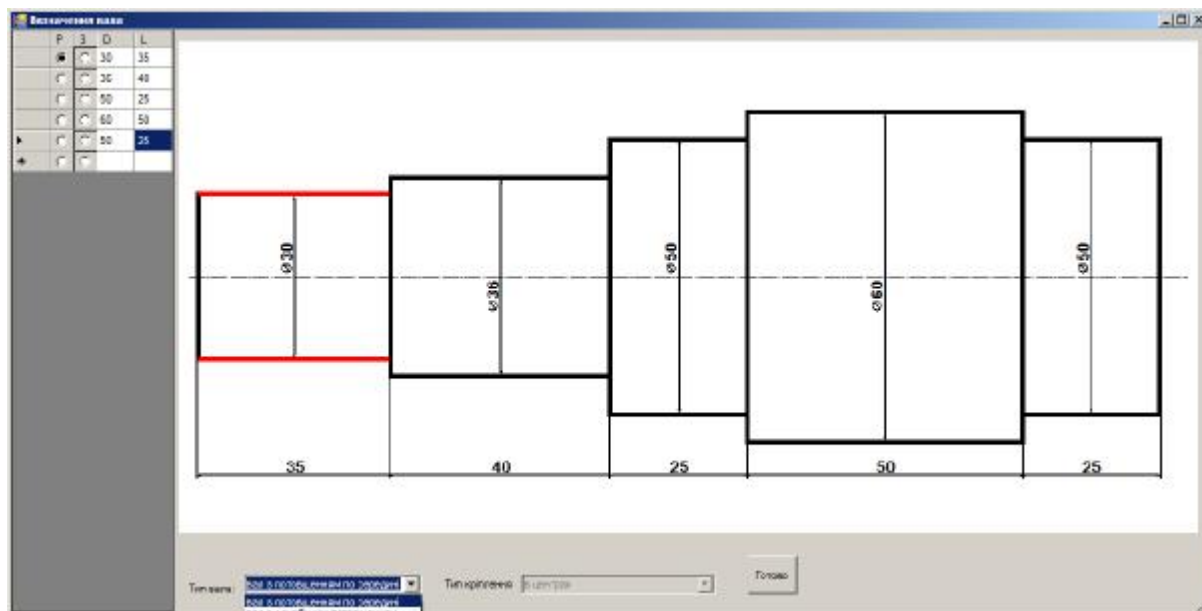
Колонка “Z” означає поверхню закріплення. Це поверхня, ступінь, яку зажимає патрон. В системі цю поверхню необхідно виділяти головним чином для того, щоб правильно розрахувати початкову і кінцеву

координати обробки, та правильно розрахувати приведений діаметр вала. Приведений діаметр повинен розраховуватися на основі діаметрів ступенів, через які передається навантаження вала, тобто ступенів, що дають прогин. При наявності поверхні закріплення, із розрахунку приведенного діаметра потрібно відкидувати поверхню закріплення, та поверхні, що лежать ліворуч від неї. У нашій системі будемо передбачати закріплення деталі “в патроні”, “в центрах” та “в патроні та центрі”. Залежно від того, чи буде потрібний спосіб закріплення передбачати використання патрона ми можемо ставити індикатор в колонці “З”, в рядку з параметрами поверхні закріплення, чи не ставити індикатор – якщо немає серед ступенів поверхні закріплення, і заготовка кріпиться в центрах. Якщо деталь кріпиться в патроні, то оброблювальною поверхнею можуть бути ступені, що знаходяться справа від поверхні кріплення. Робочу поверхню ми задаємо першою, тому система не повинна дозволити поставити індикатор в колонці “З” нижче або на рівні з індикатором “Р”. Тому, якщо є встановлений індикатор “Р” можливо у вищих рядках ставити індикатор “З”; спробу встановити його в рядках нижче система буде блокувати і підсвічувати чарунки червоним кольором. Коли індикатор поверхні закріплення встановлюється, над відповідним ступенем з’являється значок трикулачкового патрона.

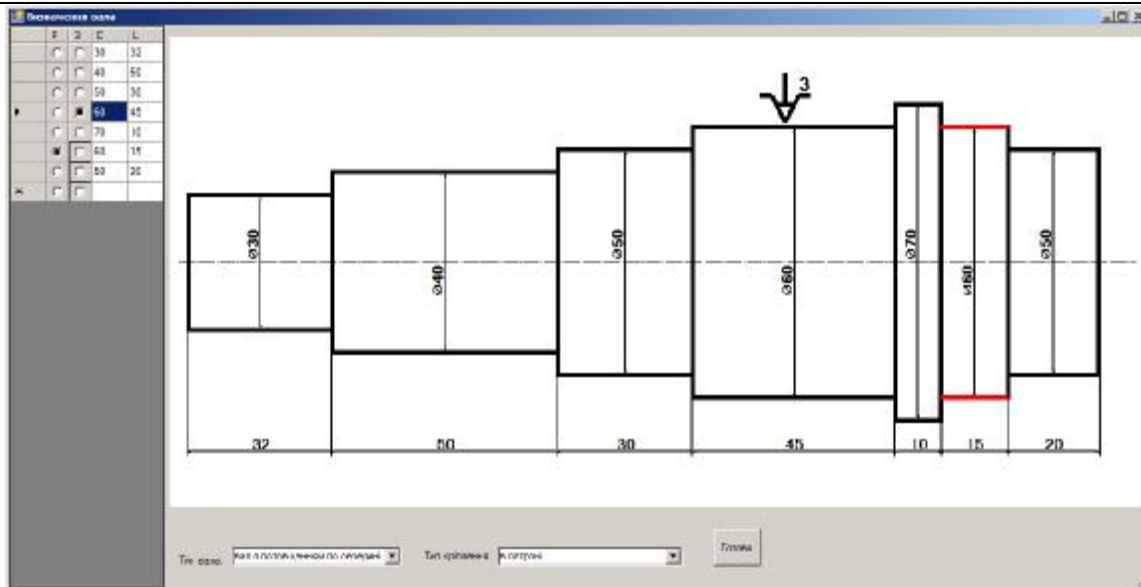
Якщо у якості елемента деталі було вибрано “Циліндр закритий із кутом 90°”, логічно потрібно у таблицю визначення вала ввести щонайменше 2 строки : робочу та закриваючу її поверхні. Система повинна блокувати спробу закрити вікно, якщо визначено лише одну ступінь. При цьому потрібно виводити інформативне повідомлення.

Якщо у якості елемента було вибрано “Циліндр”, при введеному лише одному рядку, в поле “тип вала” потрібно автоматом вбивати значення “гладкий вал”. За значенням “гладкий вал”, система повинна визначати приведений діаметр вала, присвоєнням йому значення діаметра введеної ступені.

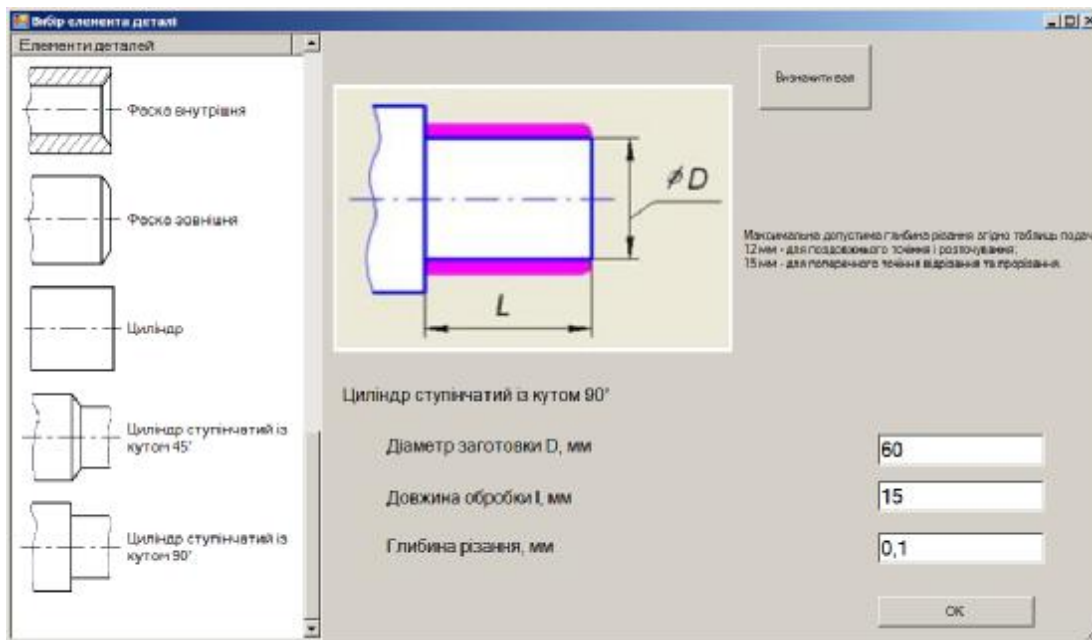
Не залежно від елемента деталі, при вводі першої строки, система повинна по замовчуванню маркувати її як робочу поверхню, і відповідно до цього, виставляти тип кріплення “в центрах” (для патрона буде необхідна додаткова поверхня зліва).



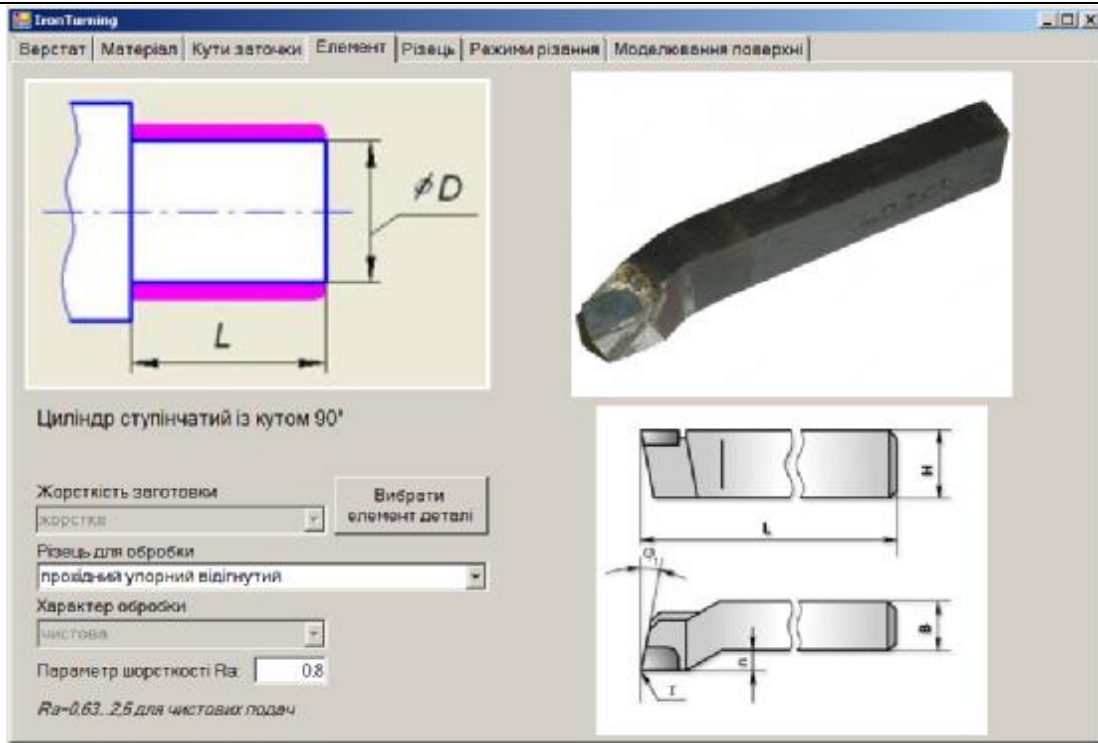
Після того, як ми встановили або пропустили крок задання поверхні закріплення, нам необхідно вибрати тип закріплення із списку внизу “Тип закріплення”. Якщо ми в якості робочої поверхні вибрали саму ліву ступінь, використання зажимного патрона уже не можливе, а значить залишається один можливий тип обробки – в центрах. В такому випадку значення “В центрах” автоматично вибирається із списку і система блокує список від вибору інших значень, які не можливо використовувати у даному випадку. Якщо є встановлений індикатор поверхні закріплення, то система повинна відфільтрувати і залишити для вибору типи закріплення в яких використовується патрон. В інших випадках можливо вибрати будь-який можливий тип закріплення.



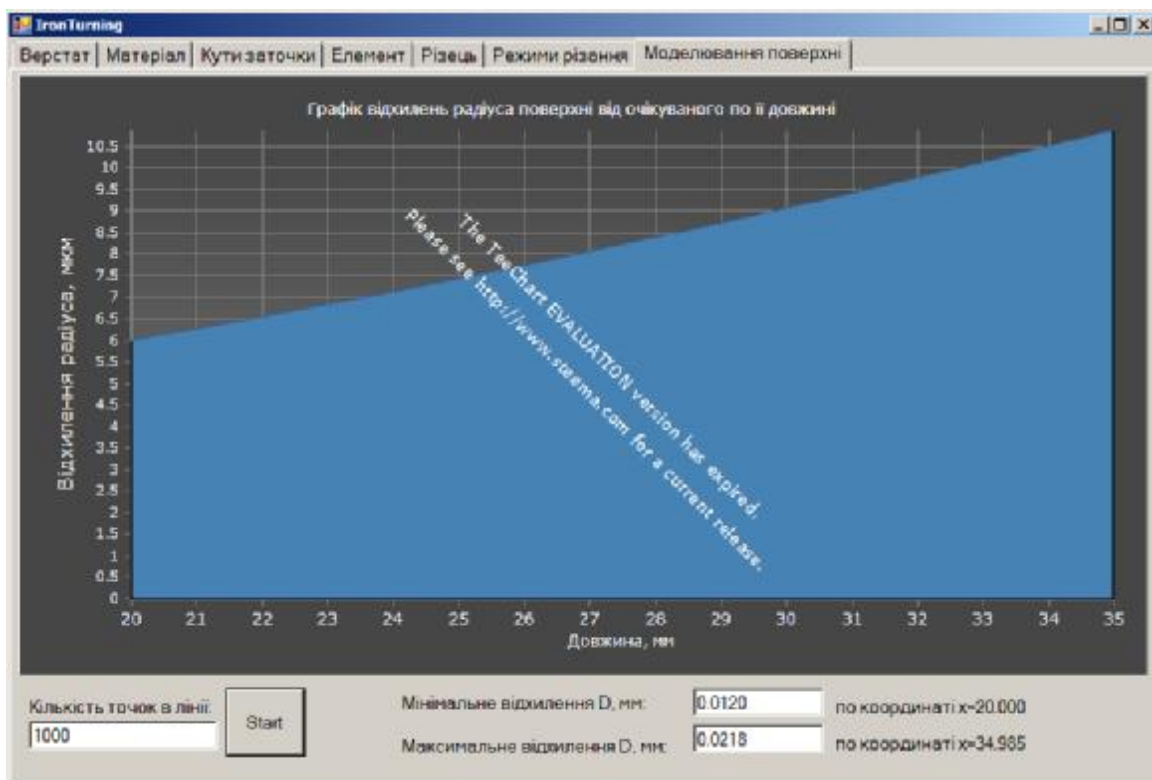
Після того як вал повністю визначено і задана схема його закріплення натискаємо “Готово”. У поля D і L автоматично будуть вставлені відповідні параметри робочої поверхні. Користувачу необхідно ввести глибину різання.



Після вводу глибини різання тиснемо “ok”. На даному етапі у вікні “Елемент” ми повинні автоматично вибрати параметр “жорсткість заготовки”. Не маючи функціональності визначення всього вала ми не могли рахувати цей параметр у попередній версії програми. Цей параметр визначається діленням довжини гладкого вала на його діаметр. Коли вал має більш ніж одну ступінь, і можливо закріплений в патроні, діаметр слід замінити на попередньо розрахований приведений діаметр, а довжину вала на довжину його консольної частини, що виступає з патрона (якщо кріпиться із застосуванням патрона). Розрахувавши жорсткість вала та визначивши в який діапазон жорсткості він попадає, автоматично вибираємо відповідну опцію в списку “Жорсткість заготовки”, та блокуємо можливість вибирати. Із самого початку ми визначали вал для того щоб розрахувати похибку обробки. Як правило похибки обробки розраховують для чистового та тонкого точіння. Звідси, ми повинні автоматично в списку “характер обробки” вибрати опцію “чистова” і заблокувати список від вибору. Користувачу залишається вибрати необхідний різець із запропонованих у списку і ввести параметр шорсткості обробленої поверхні.



Далі необхідно ввести додаткові параметри різця та розрахувати режими різання. Після розрахунку режимів різання у нас є всі необхідні дані, щоб розрахувати похибки обробки. Для розрахунку похибок обробки та їх моделювання в системі передбачена вкладка "Моделювання поверхні". Щоб розпочати моделювання користувачу необхідно нажати "Start". Параметр "кількість точок в лінії" визначає наскільки точним чи грубим буде графік, фактично вказує системі в скількох рівновіддалених по довжині робочої поверхні точках обраховувати похибку. Параметр "мінімальне відхилення D" означає різницю між очікуваним діаметром і мінімальним діаметром обробленої деталі в місці де довжина заготовки рівна значенню параметра "по координаті x". Параметр "максимальне відхилення D" означає різницю між очікуваним діаметром і максимальним діаметром обробленої деталі в місці де довжина заготовки рівна значенню параметра "по координаті x".



Вертикальна шкала графіка починається від нуля, що означає нульове відхилення – це рівень на якому повинна знаходитись поверхня після обробки. Закінчується вертикальна шкала максимальним рівнем реально



отриманої після обробки поверхні. Під рівнем тут ми розуміємо різницю радіусів отриманої та очікуваної поверхонь. Горизонтальна шкала починається із значення відстані від лівого кінця вала до початку робочої поверхні. Закінчується горизонтальна шкала її початковим значенням плюс довжина поверхні обробки. Таким чином синя область на графіку являє собою шар матеріалу, що не був зрізаний різцем внаслідок пружних відтискань в технологічній системі. Судячи із форми цієї фарбованої області можна легко судити про те в яких місцях відхилення найбільші, найменші, та що необхідно зробити, щоб попередити похибку.

### Висновки

Система і математичні моделі можуть бути розширені для можливості роботи із пустотілими валами. Система може бути використана для попередження появи бракованих деталей та створення, призначення режимів обробки, які задовольняють конструкторські вимоги до виробу.

### Література

1. Технологія машинобудування : підручник / [Мельничук П.П., Боровик А.І., Лінчевський П.А., Петраков Ю.В.]. – Житомир : ЖДТУ, 2005. – 882 с.
2. Скраган В.А. Лабораторные работы по техноогии машиностроения : [учебное пособие для студентов по курсу “Технология машиностроения”] / Скраган В.А., Амосов И.С., Смирнов А.А. – [2-е изд.]. – Л. : “Машиностроение”, 1974. – 192 с.
3. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. Т. 1 / Анурьев В.И. – [5 изд.]. – М. : Машиностроение, 1980. – 728 с.
4. Андрійчук А.Т. Технічна механіка : [програма, методичні вказівки і контрольні завдання для студентів спеціальності “Інформаційні технології проектування”] / А.Т. Андрійчук, С. А. Петрашук. – Хмельницький : ХНУ, 2007. – 78 с.

### References

1. Melnichuk P.P., Borovik A.I., LInchevskiy P.A., Petrakov Yu.V. TehnologIya mashinobuduvannya: PIdruchnik. – Zhitomir: ZhDTU, 2005. – 882 s.
2. Skragan V.A., Amosov I.S., Smirnov A.A. Laboratornyie raboty po tehnologii mashinostroeniya. Uchebnoe posobie dlya studentov po kursu “Tehnologiya mashinostroeniya”. Izd. 2-e, L., “Mashinostroenie”, 1974. 192 s.
3. Anurev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya: V 3-h t. T. 1. – 5 izd., M.: Mashinostroenie, 1980. – 728 s.
4. Tehnichna mehanika. Programa, metodichni vkazivki i kontrolni zavdannya dlya studentiv spetsialnosti “Informatsiyni tehnologiyi proektuvannya” / A.T. Andriyчук, S. A. Petraschuk. – Khmel'nitskiy: HNU, 2007. – 78 s.

Рецензія/Peer review : 13.7.2013 р.

Надрукована/Printed :29.9.2013 р.  
Рецензент: д.т.н., проф. Мазур М.П.