

© В.А. Дербоба<sup>1</sup>, С.В. Алексеєнко<sup>1</sup>, А.А. Хлинін<sup>1</sup>, Д.І. Луценко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## КОМБІНОВАНА МЕХАНІЧНА ОБРОБКА ДЕТАЛІ НА ВЕРСТАТІ З ПРОГРАМНИМ КЕРУВАННЯМ І ОПТИМІЗАЦІЄЮ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ

V. Derbaba<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0002-3918-2177>

S. Alekseyenko<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-0320-989X>

A. Khlynin<sup>1</sup>, <https://orcid.org/0009-0009-7141-4386>

D. Lutsenko<sup>1</sup> <https://orcid.org/0009-0001-2634-3066>

<sup>1</sup>Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## COMBINED MACHINING OF THE PART ON A MACHINE WITH SOFTWARE CONTROL AND OPTIMIZATION OF MODE PARAMETERS

**Мета.** Вирішення науково-технічної задачі, пов'язаної з технологічним забезпеченням механічної обробки деталі з легованої сталі шляхом оптимізації та управління її оброблюваністю інструментом з твердих сплавів на сучасних верстатах з ЧПК.

**Методика.** Методологія ґрунтується на використанні чисельного та графо-аналітичному методах дослідження з метою встановлення системного зв'язку параметрів лезв'їної обробки з властивостями оброблюваного матеріалу, геометрією інструменту та його стійкістю і відповідною інтеграцією їх до керуючої програми верстата.

**Результати.** Одержані чисельні результати досліджень для науково-обґрунтованого підходу у розв'язанні науково-технічної задачі продуктивної комбінованої обробки деталі з легуваних сталей на верстаті, що містить сукупність скорегованих алгоритмів для прогнозування оброблюваності із забезпеченням надійності різального інструменту. Отримані результати порівнювалися з відомими роботами, пов'язаними з дослідженнями процесів механічного оброблення різних матеріалів, оцінкою надійності ріжучих інструментів, точності та шорсткості обробленої поверхні, результатами вимірювань силових параметрів різання.

**Наукова новизна.** Встановлення повного і системного зв'язку параметрів оброблення з властивостями оброблюваного матеріалу, геометрією інструменту і конструкторсько-технологічних чинників деталі на розрахунок оптимізованої технології автоматизованого виробництва. У математико-статистичному опрацюванні експериментальних даних, що дало змогу вперше одержати комплексні залежності в зручному для розрахунку й аналізу вигляді, які дають наочне уявлення про вплив кожного параметра процесу точіння на його енергетичні та часові показники.

**Практична значимість.** Полягає у виборі й обґрунтуванні оптимальних геометричних параметрах різальних інструментів, установленні характеру впливу умов лезової обробки легуваних сталей на основні показники процесу – час механічної обробки та режимні показники, в залежності від твердості матеріалу деталі і інструментального матеріалу. Надані практичні рекомендації щодо оптимального використання отриманих даних в САМ системах.

**Ключові слова:** механічна обробка, верстат, сплав, технологія, стійкість, ріжучий інструмент, режими різання, САД, САМ.

**Вступ.** Комбінована механічна обробка на багатоцільових верстатах з програмним керуванням набула значного поширення в сучасному виробництві Українського ринку. Тим самим, визначення раціонального технологічного процесу керування агрегатів має актуальне значення при механічній обробці визначених матеріалів. Також актуальною є проблема застосування розрахунків на деталі в САД-САМ програмах, при складанні технології виготовлення виробу та корегуванні режимів різання на стадії підготовки конструкторської та технологічної документації [1].

Без сучасних систем автоматизованого проектування (далі САПР), вже неможливо виробляти складні вироби, що вимагають високої точності. У всьому світі відбувається різке зростання комп'ютеризації на виробництві та автоматизації. Впровадження інженерних комп'ютерних технологій підвищує ефективність і продуктивність праці сучасного підприємства.

**Мета роботи і постановка задачі.** Оптимальним управлінням вважатимемо такий вплив на процес різання, що у кожний час забезпечує максимум продуктивності (мінімум собівартості) при задоволенні всім умовам обмежень. У цьому розумінні завдання оптимізації є однокритеріальною і може бути вирішена класичними методами нелінійного програмування, тобто можуть бути однозначно визначені оптимальні керуючі дії. Під керуючими впливами зазвичай розуміють подовжню подачу на оборот заготівлі та швидкість різання, а глибину різання вважають головним обуренням. Таким чином, теоретично, для заданих умов токарної обробки існують такі постійні значення подовжньої подачі на оборот заготівлі та швидкості різання, що призводять до максимуму продуктивності. Однак, на практиці, при виконанні будь-якого процесу різання жоден із його параметрів не залишається постійним. Це визначається безперервною зміною, як зовнішніх збурень, і характеристик самої технологічної обробної системи (ТОС) [1, 2].

Отримані результати оптимізованих режимів різання при точінні підставити до налаштувань САМ-програми та отримати оптимальну керуючу програму (НС-файл) для верстата з програмним керуванням.

**Основна частина.** Основні труднощі реалізації оптимального управління за допомогою замкнутої системи автоматизованого управління (САУ) обумовлені принциповою неможливістю створення вимірювального приладу продуктивності або собівартості, щоб застосовувати його як датчик зворотного зв'язку. Тому оптимально керувати процесом різання можна тільки на основі оцінки допоміжних параметрів, пов'язаних з необхідним критерієм оптимальності відповідної апріорної математичної моделі.

У сучасних інженерних системах технологічної підготовки виробництва найбільш раціональним є оптимальне керування, яке реалізовано програмними засобами. Взагалі, для оцінки обробки та отримання інформації про фактичний хід процесу різання в САУ оптимального управління застосовують різноманітні підходи, що ґрунтуються на непрямому вимірі припуску, температура зони різання темпи зношування інструменту. Найбільш близьким до запропонованої САУ є метод, який оцінює процес за поточним значенням перерізу шару припуску, що зрізається. [2].

Тому програмне забезпечення САУ оптимального управління має мати таку структуру (рис.1).

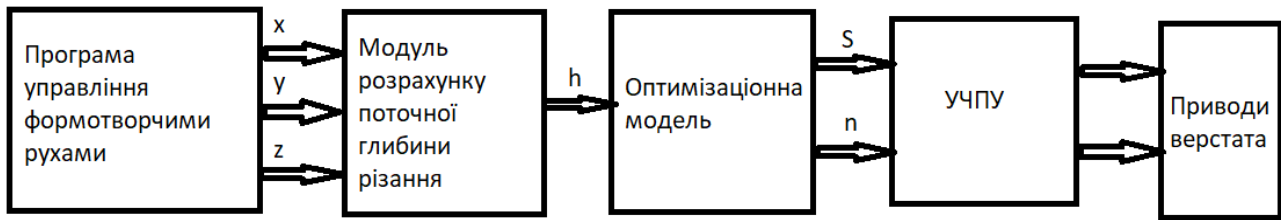


Рис. 1. Структура САУ оптимального управління [2]

Первинна інформація про хід процесу різання, крім констант, які вводяться раніше, виходить з модуля розрахунку поточної глибини різання, який пов'язаний із програмою управління формоутворюючими рухами. Далі, відповідно до оптимізаційної математичної моделі процесу різання визначаються оптимальні величини керуючих впливів (наприклад, подачі та швидкості різання). Розраховані таким чином величини надходять на модуль програмного управління, який виробляє команди відповідних приводів верстата.

Таким чином, основною такою САУ оптимізації процесу різання є його оптимізаційна математична модель, яка пов'язує критерій оптимізації з керуючими впливами-подачі та швидкістю різання. В результаті вирішення задачі оптимізації знаходять керуючий вплив, який забезпечує максимум продуктивності або мінімум собівартості при безумовному виконанні вимог обмежень щодо якості обробки. Крім традиційних критеріїв оптимізації (продуктивність та собівартість) залежно від результатів техніко-економічного аналізу застосовують критерій максимальної інтенсивності зняття припуску. Іноді з виробництва ставиться таке завдання-досягнення максимальної продуктивності чи мінімальної собівартості при заданих значеннях стійкості інструмента.

Розробка математичної моделі процесу різання є найважливішим етапом створення алгоритму оптимізації. При традиційному, класичному підході математична модель будується у вигляді системи рівнянь та нерівностей, які виражають зв'язки між керуючими впливами, обмеженнями та прийнятими критеріями оптимальності на основі класичних залежностей теорії різання [3, 4].

Для випадку обробки поздовжнім точінням за один прохід з постійною глибиною різання, що дорівнює припуску на обробку (ідеальний випадок), режим різання буде оптимальним при такому поєднанні подачі та швидкості різання, коли основний технологічний час буде мінімальним. Таке оптимальне рішення знаходять, відшукуючи такі невід'ємні значення керуючих впливів (подачі  $S$  і частоти обертання  $n$  шпинделя) при задоволенні всім обмеженням, які доставляють мінімум критерію оптимальності-технологічного часу  $t_0$ . Таким чином, для випадку поздовжнього точіння, оптимізаційна математична модель може бути виражена наступною системою рівнянь і нерівностей. Зв'язок між управліннями  $S$  і  $n$  та періодом  $T$  стійкості інструменту, які визначають його ріжучу здатність, отримують за відомою з теорії різання залежності:

$$v = \frac{\pi Dn}{1000} = \frac{C_v k_v}{T^m H^{x_v} S^{y_v}},$$

звідки

$$nS^{y_v} = \frac{318C_v k_v}{DT^m H^{x_v}}, \quad (1)$$

де,  $v$  – швидкість різання, м/хв;  $\pi$  – постійна величина 3,14;  $n$  – частота обертання, об/хв;  $H$  – глибина різання, мм;  $T$  – період стійкості інструменту, хв;  $S$  – подача мм/об,  $m, v, x, y$  – виправні коефіцієнти на матеріал, сил різання, режимів обробки.

Оскільки всі залежності, що становлять математичну модель, є емпіричними, слід не забувати про розмірність фізичних величин, що входять до них. Зазвичай ці розмірності не відповідають СІ-розмірностям.

У математичній моделі (1) необхідно враховувати відомі з практики обробки в'язанням в залежності від стійкості різця не тільки від матеріалу заготовки та інструменту, а й геометричних параметрів різальної частини різця в плані. Вплив головного та допоміжного кутів у плані різця відображається відомими [2, 3] залежностями для допустимої швидкості різання:

$$v = \frac{C_\varphi}{\varphi_{in}}, \quad v_1 = \frac{C_{\varphi 1}}{\varphi_{in1}}.$$

Такі залежності входять до математичної моделі процесу різання, а їх вплив на обмеження (1) виконується за рахунок коефіцієнта  $k_v$ , величина якого розраховується за конкретними умовами обробки. Наступне обмеження-за потужністю різання  $N_p$ , кВт:

$$N_p = \frac{P_z \pi Dn}{1000 \cdot 6 \cdot 10^4} = \frac{C_p h^{x_p} S^{y_p} k_p Dn}{6 \cdot 10^7} \leq N_{cm} \eta,$$

звідки

$$nS^{y_p} \leq \frac{1,91 \cdot 10^7 N_{cm} \eta}{C_p h^{x_p} k_p D}, \quad (2)$$

де  $N_{cm}$  – ефективна потужність верстата в кВт;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії;  $C_p, k_p, x_p, y_p$  – коефіцієнти та показники емпіричної залежності сили різання від режиму та умов обробки.

Подача, що допускається необхідною шорсткістю обробки, може бути визначена за детермінованою складовою профілю шорсткості обробленої поверхні, яка, у свою чергу, визначається за геометричними залежностями формування мікронерівностей поверхневого шару деталі для кожного з чотирьох можливих профілю [2].

#### *Блок-схема алгоритма досліджень*

Для вирішення такого завдання доцільно використати чисельний метод, який побудований за інтеративним принципом наближення із заданим кроком до вирішення відповідно до алгоритму, блок-схема якого представлена на рисунку 2.

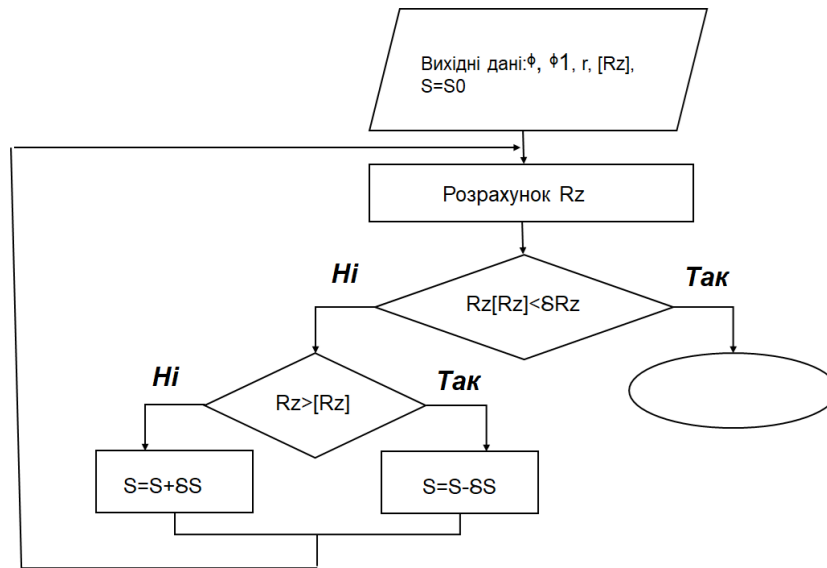


Рис. 2. Блок-схема алгоритму [2]

Такі випадки визначаються співвідношеннями між геометричними параметрами вершини різця у плані (головний  $\varphi$ , допоміжний  $\varphi_1$  кути в плані і радіус  $r$  округлення вершини різця в плані) і подачею  $S$  навпаки заготовки.

При  $\varphi < \arcsin(S/2r)$  і  $\varphi_1 < \arcsin(S/2r)$  виступ профілю формується перетином головного і допоміжного різальних лез інструменту, при  $\varphi > \arcsin(S/2r)$  і  $\varphi_1 < \arcsin(S/2r)$  виступ профілю формується перетином допоміжного різального леза і радіусною частиною вершини інструменту, при  $\varphi < \arcsin(S/2r)$  і  $\varphi_1 > \arcsin(S/2r)$  виступ профілю формується перетином головного різального леза і радіусної частини вершини інструменту, а при  $\varphi < \arcsin(S/2r)$  і  $\varphi_1 < \arcsin(S/2r)$  виступ профілю формується перетином винятково радіусних частин вершин інструменту. Таким чином, в умову визначення допустимої (по шорсткості) подачі входить сама подача, що унеможливорює отримання відповідної аналітичної залежності [3, 4].

Наступне обмеження, яке накладається на поздовжню подачу, вибирається з умов міцності жорсткості ТОС. Наприклад, подача за максимальною силою, яку забезпечує привід подачі верстата, може бути розрахована за наступною залежністю:

$$[S_p]_{\text{дон}} = \left( \frac{2P_n}{C_p h^{X_p} k_p} \right)^{\frac{1}{Y_p}}$$

Подача, що допускається, вибирається як найменша з подач, які розраховані за міцністю інструменту  $[S_l]_{\text{дон}}$  або тяговою силою механізму подачі верстата  $[S_p]_{\text{дон}}$ :

$$S \leq \min \{ [S_p]_{\text{дон}}, [S_l]_{\text{дон}} \} \quad (3)$$

Конструктивні обмеження які визначаються за можливостями металорізального верстата:

діапазон поздовжніх подач:

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max}, \quad (4)$$

діапазон частот обертання шпинделя:

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}. \quad (5)$$

Як оцінну функцію за критерієм максимальної продуктивності приймають

$$F = nS \rightarrow \max, \quad (1.6)$$

оскільки при цьому основний час обробки  $t_0 = L/n \rightarrow \min$  (де  $L$  – довжина обробки).

Отримана математична модель (1–6) складає ядро прикладної програми "Оптимізація точіння" [2, 4], яку ми будемо використовувати для оптимізація режимів різання при точінні.

#### *Оптимізація режимів різання при точінні*

Для виконання роботи використовується прикладна програма [1,2], інтерфейс представлений на рисунку 3. Інструкції та пояснення для роботи з програмою містяться в самій програмі та з'являються на екрані монітора при натисканні кнопки "Help".

Після активації програми, введення даних відповідно до варіанта та натискання кнопки "Застосувати дані" у графічному вікні інтерфейсу з'являються всі розраховані обмеження, що утворюють область  $D$  допустимих значень частоти обертання шпинделя та подачі, яка відповідає представленим на інтерфейсі вихідним даним верстата і процесу різання. На рисунку 3. ця область утворена перетином наступних обмежень: 1 – мінімальна подача, 3 – мінімальна частота обертання шпинделя, 5 – мінімальна подача по шорсткості поверхні, 7 – обмеження за стійкістю інструменту, 8 – обмеження за потужністю верстата. Лінія 9 відображає функцію оптимізації за максимальною продуктивністю і задовольняє залежності (6).

Лінія 9 з'являється у графічному вікні інтерфейсу та пересувається в ньому за перехрестям мишки. Для визначення оптимальних координат області допустимих значень необхідно перевести мишку так, щоб лінія максимальної продуктивності була дотичною до найбільш віддаленої від початку координат вершини області допустимих значень, а перехрестя мишки збігалось з такою вершиною.

Після натискання лівої клавіші мишки, при утриманні її перехрестя у вершині області допустимих значень, на інтерфейсі з'являються оптимальні величини режиму різання. Визначається такі складові режиму різання та його головні характеристики: частота обертання шпинделя (1989 об/хв), подача на оборот (0,483 мм/об), швидкість різання (312,3 м/хв), поздовжня подача (961 мм/хв), потужність різання (26,2 кВт), що становить сили  $P_z$  різання (5036,8 Н).

Звертаємо увагу на те, що відповідно до прийнятого критерію оптимальності – максимальна продуктивність – його величину зручно оцінювати безпосередньо за величиною поздовжньої подачі.

В якості прикладу виконання роботи нижче представлено перебіг досліджень для вихідних даних, які вказані у вікнах головного інтерфейсу програми на рисунку 3.

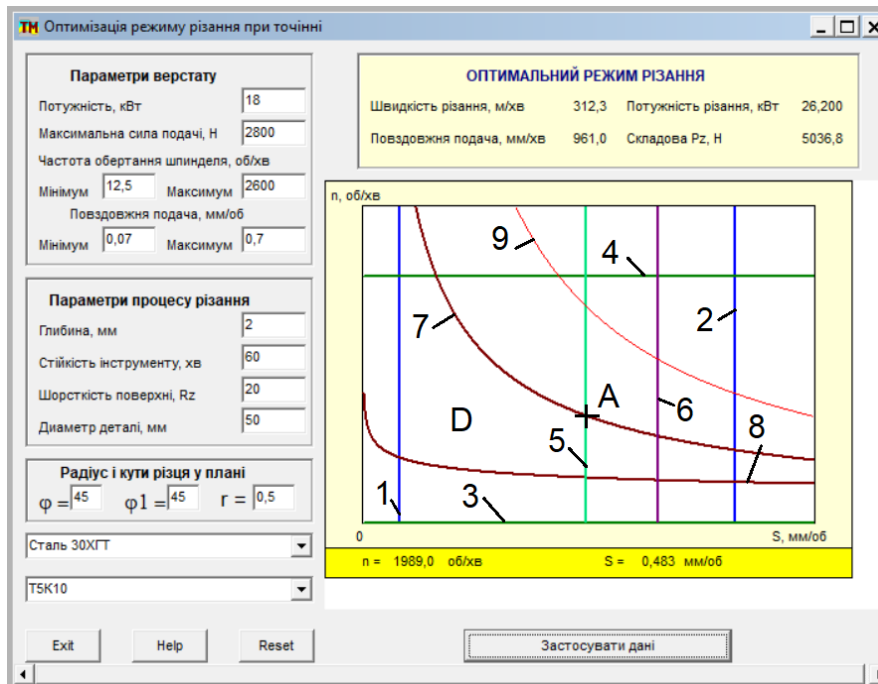


Рис. 3. Інтерфейс прикладної програми оптимізації режимів різання

Для виконання експериментальних досліджень за першими трьома завданнями, які виконуються у функції глибини різання, перед активацією прикладної програми необхідно скласти таблицю експериментальних даних визначивши діапазон і крок зміни глибини різання (табл. 1). На рисунку 4 представлено стан області  $D$  допустимих значення частоти обертання шпинделя та поздовжньої подачі під час проведення експериментальних досліджень за даними таблиці 1.

Таблиця 1

Експериментальні дані за одним технологічним переходом

№	H, мм	$n_{об}$ , об/хв	$S_{об}$ , мм/об	$N_{різ}$ , кВт	$P_z$ , Н	$S_{min}$ , мм/хв	$v$ , м/хв
1	0,3	2320	0,450	3,70	910	654	307
2	0,6	2192	0,450	5,87	2565	601	287
3	0,9	2120	0,440	7,75	3301	570	276
4	1,2	1952	0,421	8,50	4011	489	250
5	1,5	1768	0,417	8,48	4722	421	221
6	1,8	1648	0,416	8,51	5426	371	332
7	2,1	924	0,373	8,51	5600	126	212
8	2,4	624	0,298	8,52	5603	191	212

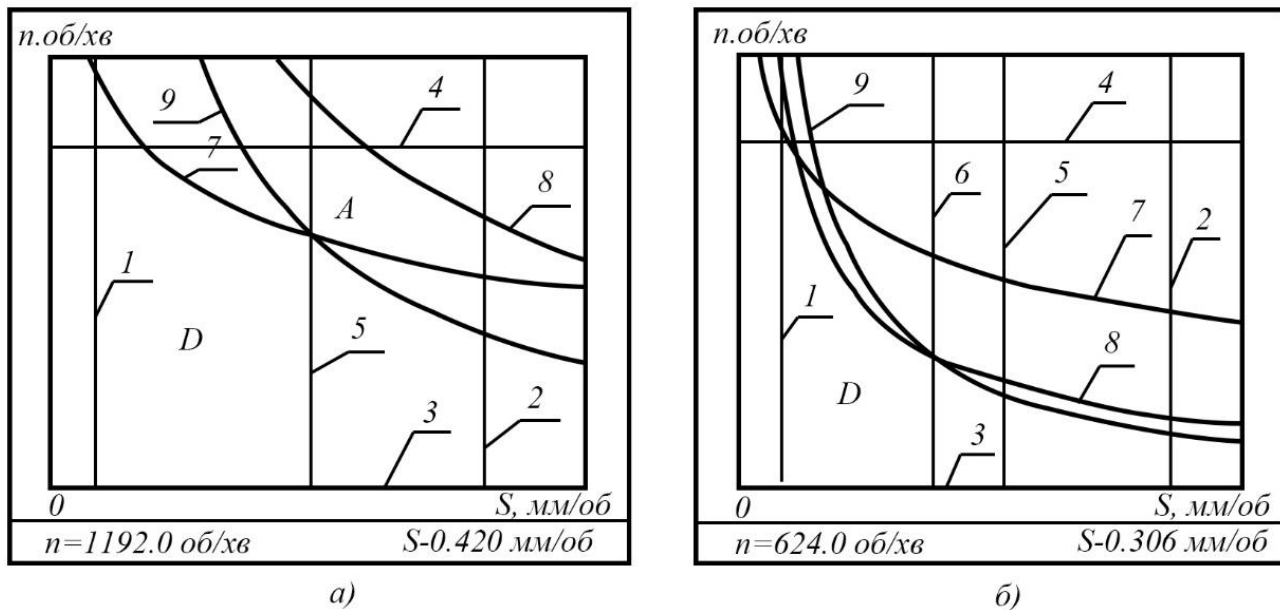


Рис. 4. Результати визначення оптимального режиму різання:  
 а) – при глибині різання 0.3 мм ( $n = 2320,0$  об/хв;  $S = 0,450$  мм/об);  
 б) – при глибині різання 2.4 мм ( $n = 624,0$  об/хв;  $S = 0,298$  мм/об)

Тут прийняті ті самі позначення, що і на рисунку 3: лінія 1 і 2 – обмеження по мінімальній і максимальній подачі, лінія 3 і 4 – обмеження по мінімальній і максимальній частоті обертання шпинделя, лінія 5 – обмеження подачі по заданій шорсткості, лінія 6 – обмеження подачі за допустимою силою механізму подачі приводу верстата, лінія 7 – обмеження за стійкістю інструменту, лінія 8 – обмеження потужності верстата. Лінія 9 відображає оцінну функцію оптимізації максимальної продуктивності. Видно, що зі зміною глибини різання вершина А області допустимих значень, яка відповідає оптимальному (за продуктивністю) режиму різання, утворюється перетином різних обмежень. Так, при глибині різання 1 мм ця вершина утворена обмеженнями по стійкості інструменту і необхідної шорсткості поверхні, а при глибині 4 мм – обмеженнями за потужністю різання і максимально допустимою силою приводу подачі. Отримані експериментальні дані, що визначають оптимальний режим різання за різних величин глибини  $H$  різання представлені в таблиці 1. За експериментальними даними з використанням пакету Excel [7, 8]. побудовано графіки відповідної залежності, що представлені на рисунку 3, 4.

Аналіз отриманих експериментальних результатів (рис. 5) свідчить, що закон оптимального управління має дві зони:

- 1) оптимальна обробка до глибини різання 3 мм відбувається з постійною подачею на заготівлю, проте частота обертання зменшується майже за лінійною залежністю;
- 2) оптимальна обробка з глибиною, яка перевищує 3 мм, виконується з постійною частотою обертання заготовки, проте поздовжня подача знижується також майже за лінійною залежністю.

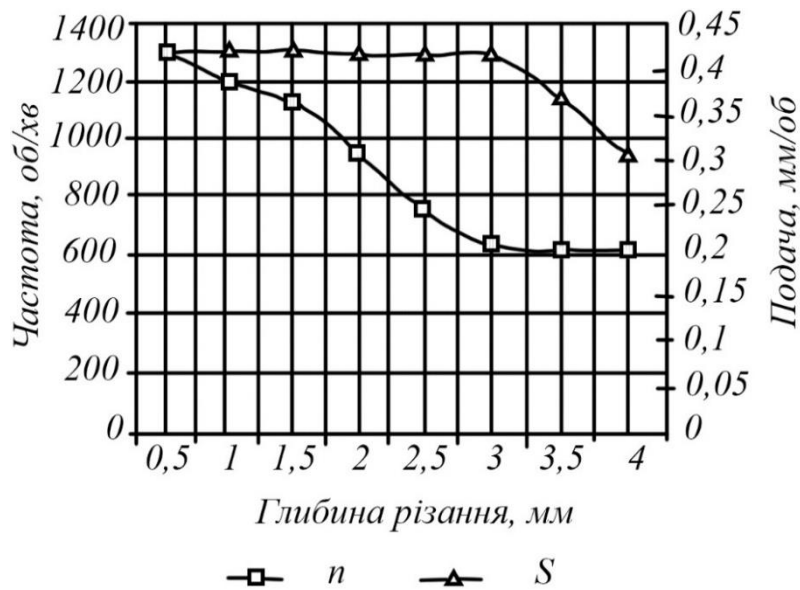


Рис. 5. Експериментальні залежності оптимального режиму різання від глибини різання

При проведенні експериментів можна помітити, що оптимальна точка фазової площини n-S утворюється в основному трьома обмеженнями: стійкістю, потужністю і шорсткістю. До глибини різання 3 мм основним обмеженням, яке накладається на подачу, є обмеження необхідної шорсткості обробленої поверхні. При збільшенні глибини різання набуває чинності четверте обмеження-за силою подачі верстата.

Подібні числові значення розрахунків режимів різання були отримані і при класичному аналітичному методі корегування стосовно геометрії ріжучого інструменту, матеріалу і параметрів деталі [9, 10], відносна похибка розрахунків не перевищувала 6–8%. Це говорить про те, що модель перевірна на адекватність результатів режимів механічної обробки стосовно нашої деталі «Клапан» (рис. 6) та його геометричних параметрів.

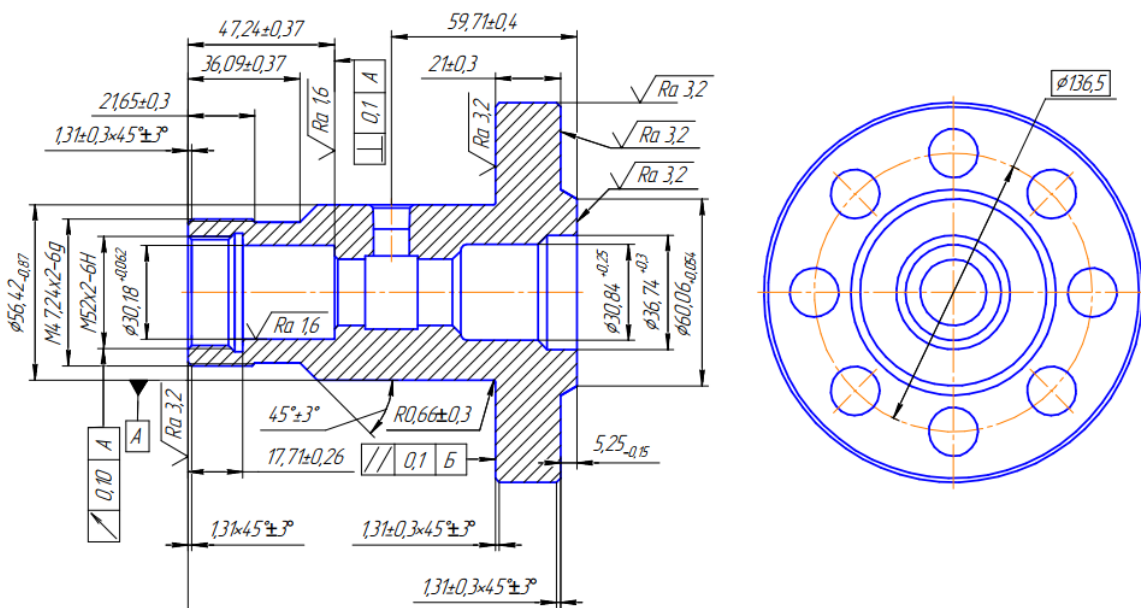


Рис.6. Ескіз деталі «Клапан»

Далі ми послідовно повторюємо процедуру зміни вхідних даних для кожного технологічного переходу при точінні (поперечному, подздовжньому, розточування, точінні канавки та відрізання). Отримані результати заносимо в таблицю 2, де скореговуємо режими різання для кожного випадку при точінні.

Таблиця 2  
Оптимізовані режими різання токарних операцій на верстаті з ЧПК

Назва операції	Глибина, мм	Подача, мм/об (мм/зуб)	Швидкість, м/хв
Підрізання торців	-	0,411	288
Точіння зовнішнє (чорнове)	2,15	0,411	282
Точіння зовнішнє (чистове)	0,85	0,142	307
Розточування (чорнове)	2,25	0,271	228
Розточування (чистове)	0,19	0,124	281
Точіння внутрішнього отвору	0,95	0,183	215
Відрізка деталі	-	0,198	204

Примітка. Значення режимів різання при фрезеруванні, свердлінні та формоутворенні нарізі не оптимізувались, а обирались як середьозважене з діапазону режимів рекомендованих виробником та врахуванням паспортних діапазонів режиму обробки верстата з ЧПК. [7, 8].

*Практична реалізація отриманих результатів у CAD-CAM системах.*

Для того щоб якісно та коректно підійти до складання автоматизованого технологічного процесу виготовлення необхідно дослідити конструкцію деталі, зробити відповідні висновки щодо лідійних, діаметральних та допускових розмірів на кресленнику. Проаналізувати з кресленника технічні вимоги до деталі, шорсткості та якості оброблювальних поверхонь. Проаналізувати хімічний склад і механічні властивості матеріалу деталі, надати загальну характеристику об'єкта дослідження та виконати якісний аналіз технологічності конструкції деталі. На прикінці розділу необхідно змодельовати в тривимірному вигляді деталей в CAD-системі Autodesk Inventor за розмірами згідно кресленника. Для прикладу обрана деталь «Клапан» (див. рис. 6).

*Виконання тривимірної моделі деталі у програмі Autodesk Inventor*

Autodesk Inventor це проста в засвоєнні та застосуванні CAD-система, що поєднує можливості поверхневого, твердотільного та фасетного 3D-моделювання. Має ефективний функціонал для реверсивного інжинірингу та відновлення пошкоджених імпортованих даних.

Використовуємо вказану програму для виконання тривимірної моделі деталі «Клапан». За допомогою простих ліній, простих геометричних форм та кривих інтерфейсу Inventor, створюємо крок за кроком об'єкт ра розмірами і пропорціями, в масштабі, ідеально схожий що на кресленнику, який в нас є технічним завданням. Створена модель деталі представлена на рисунку 7.

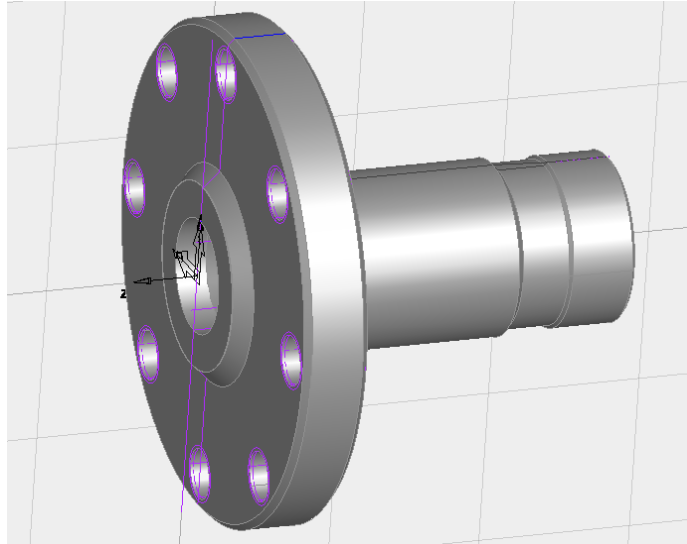


Рис. 7. Тривимірний модель у програмі Autodesk Inventor

*Методика складання автоматизованої технології обробки в сам-системі*

Для складання коректної автоматизованої технології механічної обробки деталі на верстаті з ЧПК за умов використання CAD-CAM систем необхідно виконати певну послідовність операцій:

- створити тривимірну модель за кресленником або ескізом (технічне завдання) в обраній CAD-системі;
- розрахувати та створити тривимірну модель заготовлі або скористатися функціоналом обраної CAM-системи;
- обрати логічну і вірну послідовність маршруту обробки деталі (МОД), приймаючи до уваги її геометрію, вимоги до точності та якості, матеріал, обладнання, режими та умови обробки деталі;
- підібрати необхідне обладнання, ріжучий інструмент, затискне оснащення та призначити режими різання за довідниками стандарту ISO;
- обрати CAM-систему та скласти в ній оптимальну послідовність операцій (технологічних переходів) задіявши чисельні розрахунки та режимні параметри, які отримані та описані переліком вище;
- візуалізувати в режимі 3D та на верстаті виконаний процес механічної обробки деталі, внести певні уточнення або рекції у параметри технології механічної обробки;
- зберегти NC-файл керуючої програми у відповідному форматі та проект технології у CAM-системі для подальшого корегування та переміщення інформації на CNC обладнання.

Імпортуємо 3D-модель деталі і інтерфейс програми FeatureCAM, призначаємо розміри заготовлі, встановлюємо локальну систему координат деталі, обираємо в базі даних існуючий постпроцесор верстата та модель тривимірний гібрид верстата MORI SEIKI TURNING CENTER, отримуємо слідуєчий вигляд комп'ютерного аналізу (рис. 8) [5, 6].

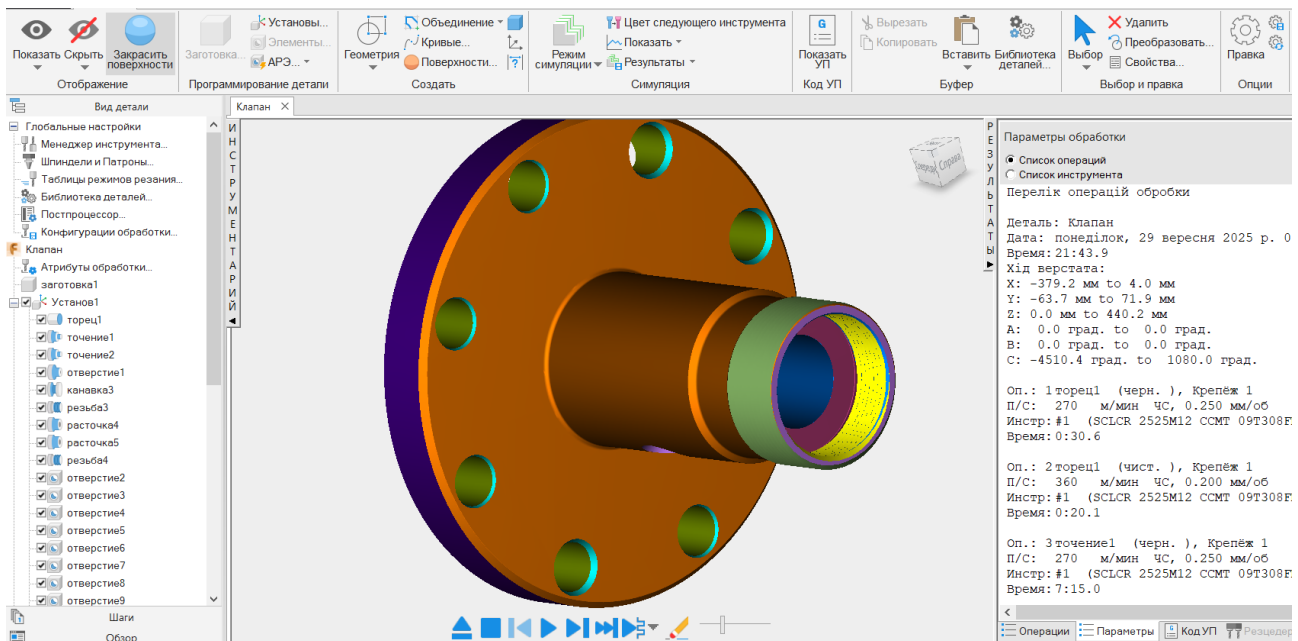


Рис. 8. Підготовка проекту до автоматизації інтерфейсу FeatureCAM

Послідовно згідно МОД таблиці 1 та 2 призначаємо відповідні операції обробки, обираючи з інтерфейсу програми відповідні опції: «Точіння», «Підрізка торцю», «Розточування», «Свердління», «Відрізка заготівлі».

На останньому етапі програмування механічних операцій, за допомогою функцій програми FeatureCAM, формуємо керуючу програму (КП) для верстата з ЧПК та зберігаємо її у форматі \*.txt. Фрагмент КП з інтерфейсу для верстата показаний на рис. 9.

```

Код УП
● P1: Верхний резцедержатель
○ P4: Нижний резцедержатель

ОКлапан ( КЛАПАН 9-29-2025 )
(
(
FEATURECAM MILL/TURN )
(MORI SEIKI TURNING CENTER )
(MITSUBISHI CONTROL WITH Y-AXIS )
(TURRET #1 )

N1 ( OPERATION: ROUGH TURN ТОЧЕНИЕ1 )
G28 V0
G18 G99 M46 ( TURN MODE )
G0 T0101 ( TOOL:01 SCLCR 2525M12 CCMT 09T308FM )
G50 S6000
G96 S885 M3
G0 X5.9456 Z0.1404 M8
G1 Z-4.2874 F0.0098
X6.0787
G3 X6.1289 Z-4.2978 R0.0354
G1 X6.2863 Z-4.3765
X6.3189
X6.3467 Z-4.3626
G0 Z0.1404
G1 X5.5723
Z-4.2874
X5.9456
X5.9734 Z-4.2735
G0 Z0.1404
G1 X5.199
Z-4.2874
    
```

Рис.9. Фрагмент КП для MORI SEIKI TURNING CENTER

Саме з табл. 2 беремо скореговані режимі різання і заносимо до налаштувань кожного технологічного переходу (операції) механічної обробки у інтерейсі програми FeatureCAM (рис. 10).

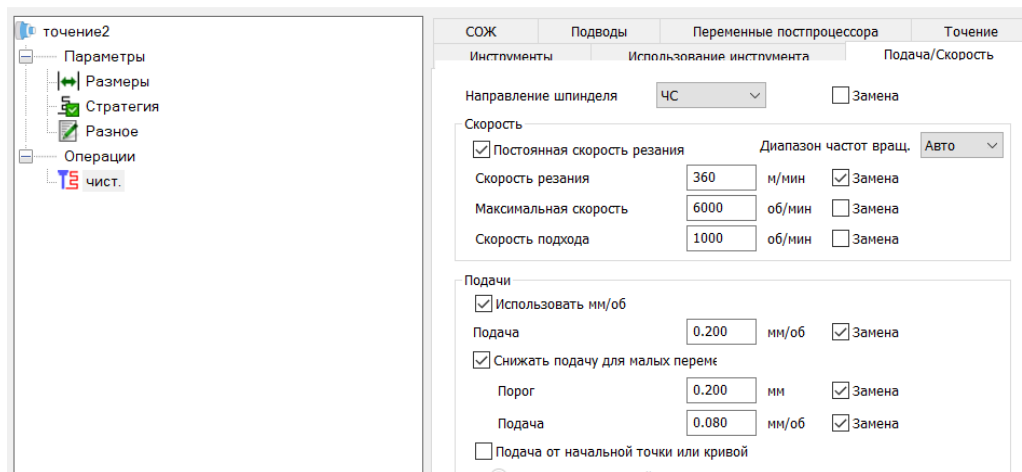


Рис.10. Інтерфейс програми FeatureCAM з оптимізованими режимами

### Висновки.

1. Одержані чисельні результати досліджень для науково-обґрунтованого підходу у розв'язанні технічної задачі токарної обробки деталей з легованої сталі на багатовісних обробних центрах, що містять сукупність скорегованих методик та алгоритмів для прогнозування їхньої оброблюваності із забезпеченням надійності різального інструменту з твердих сплавів. Отримані результати порівнювалися з відомими роботами, пов'язаними з дослідженнями процесів механічного оброблення різних марок сталей і сплавів, оцінкою надійності ріжучих інструментів, точності та шорсткості обробленої поверхні, результатами вимірювань силових параметрів різання. Максимальна відносна похибка розрахунків не перевищувала 5–8%.

2. Обґрунтований і встановлений повний системний зв'язок параметрів оброблення з властивостями оброблюваного матеріалу, геометрією інструменту, інструментального матеріалу і конструкторсько-технологічних чинників деталі на розрахунок оптимізованої технології токарної обробки.

3. Виконана методика значно спрощує громісткі аналітичні розрахунки за класичними методами з купою виправних коефіцієнтів та враховує сучасну геометрію інструментів показники і режимів різання стосовно конкретної деталі та більш того, може буди адаптована до інших типів деталей типу тіл обертів різних галузей виробництва.

4. Проаналізовані конструктивні особливості деталі, матеріалу та надана загальна характеристика об'єкта дослідження, виконаний якісний аналіз технологічності конструкції деталі. Якісно виконана тривимірна модель у CAD-системі.

5. Складена оптимальна технологія механічної обробки деталі. Застосований прогресивний ріжучий інструмент стандарту ISO, оснащення для сучасного багатоцільового верстата з ЧПК. Програмна реалізація і комп'ютерний

експеримент з розрахунку автоматизованої технології механічної обробки реалізований у програмі Autodesk FeatureCAM.

6. Надані практичні рекомендації щодо оптимального використання CAD-CAM систем, коригування результатів технології та режимних параметрів для отримання оптимальних результатів на стадії підготовки виробництва.

7. Виконане дослідження дозволяє моделювати абсолютно всі токарні роботи за рахунок застосування комп'ютерних програм в умовах дефіциту виробництва натурних експериментів та дистанційного навчання; індивіалізувати процес навчання та підвищити ефективність самостійної роботи учня або студента; надає змогу проводити дослідження в таких областях змінення параметрів, які неможливо або небезпечно реалізувати на реальному коштовному обладнанні.

#### Перелік посилань

1. Петраков, Ю.В., & Мацківський, О.С. (2015). Моделювання фрезерування кінцевими фрезами. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування*, 1(73), 78–83. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/87402a6f-1088-4b4c-b7a6-8b333afbac7/content>
2. Петраков, Ю.В. (2017). Методи управління процесами різання. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки*, (2), 124–134.
3. Дербаба, В.А., Пацера, С.Т., & Григоренко, В.У. (2022). Особливості механічної обробки зносостійких чавунів. *Збірник наукових праць НГУ*, 71, 217–230. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.217>
4. Петраков, Ю.В., & Мацківський, О.С. (2015). Моделювання системи адаптивного управління фрезеруванням на верстаті з ЧПК. *Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія : Машинобудування*, 2, 146–152.
5. Найкращі рішення для обробки. Лінійка необертальних інструментів. Токарна обробка. Обробка канавок. Різьбонарізання. Відрізання. Метрична версія каталогу 2019. 08/2020 3395080. Member IMC Group ISCAR. [www.iscar.com.ua](http://www.iscar.com.ua)
6. Найкращі рішення для обробки. Фрезерування. Свердління. Інструментальна оснастка. Метрична версія каталогу 2020-2021. 10/2020 3395081. Member IMC Group ISCAR / [www.iscar.ua](http://www.iscar.ua)
7. Кравченко, Ю.Г., Дербаба, В.А., & Смагін, Д.В. (2020). Визначення і взаємозв'язок кутів зсуву і тертя при стружкоутворенні. *Збірник наукових праць НГУ*, 61, 193–201. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.193>
8. Kravchenko, Yu., & Derbaba, V. (2020). Empirical definition of the shearing angle and chip-edge contact length when cutting. *Збірник наукових праць НГУ*, 63, 123–133. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.123>.
9. Щербина, Є.Ю., Дербаба, В.А., & Козечко, В.А., (2022) Критерії стійкості ріжучого інструменту для висошвидкісної обробки. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 67, 77–95. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/67.077>
10. Ruban, V., Derbaba, V., Bohdanov, O., & Shcherbyna, Y. (2023). Optimization of product processing modes in modeling and programming of machining on machine tools with program control. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 72, 222–238. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/72.222>

#### ABSTRACT

**Purpose.** To solve scientific and technical problems related to the technological support of mechanical processing of alloy steel parts by optimizing and controlling their machinability with hard alloy tools on modern CNC machines.

**Methods.** The methodology is based on the use of numerical and grapho-analytical research methods to establish a systematic relationship between the parameters of blade processing and the properties of the processed material, the geometry of the tool, and its stability, and their corresponding integration into the machine control program.

**Findings.** Numerical research results were obtained for a scientifically based approach to solving the scientific and technical problem of efficient combined machining of alloy steel parts on a machine tools, containing a set of adjusted algorithms for predicting machinability while ensuring the reliability of cutting tools. The results obtained were compared with known works related to the study of mechanical processing of various materials, assessment of the reliability of cutting tools, accuracy and roughness of the machined surface, and the results of measurements of cutting force parameters.

**The originality.** The study focused on establishing a complete and systematic relationship between processing parameters and the properties of the material being processed, tool geometry, and design and technological features of the part to calculate the optimized technology for automated production. Mathematical and statistical processing of experimental data, which made it possible for the first time to obtain comprehensive dependencies in a form convenient for calculation and analysis, was performed, which give a clear idea of the influence of each parameter of the turning process on its energy and time indicators.

**Practical implementation.** It consists in selecting and justifying the optimal geometric parameters of cutting tools, establishing the nature of the influence of alloy steel blade processing conditions on the main process indicators – machining time and operating parameters, depending on the hardness of the part material and tool material. Practical recommendations are provided for the optimal use of the obtained data in CAM systems.

**Keywords:** *mechanical processing, machine tool, alloy, technology, stability, cutting tool, cutting modes, CAD, CAM.*

дата першого надходження статті до видання	02.07.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	05.08.2025
дата публікації (оприлюднення)	09.09.2025